



HAL
open science

Couplages science – industrie à double impact : modélisation et tests empiriques

Quentin Plantec

► **To cite this version:**

Quentin Plantec. Couplages science – industrie à double impact : modélisation et tests empiriques. Gestion et management. Université Paris sciences et lettres, 2021. Français. NNT : 2021UPSLM027 . tel-03435091

HAL Id: tel-03435091

<https://pastel.hal.science/tel-03435091v1>

Submitted on 18 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ PSL

Préparée à MinesParistech

Couplages science – industrie à double impact : modélisation et tests empiriques

Soutenue par

Quentin PLANTEC

Le 02 juillet 2021

Ecole doctorale N° 543

**Sciences de la Décision, des
Organisations, de la Société
et de l'Échange (SDOSE)**

Spécialité

Sciences de Gestion



Composition du jury :

Marine, AGOGUÉ

Professeure, HEC Montréal

Rapportrice

Sylvain, LENFLE

Professeur, CNAM

Rapporteur

Nicola, MIRC

Professeure, TSM, Univ. Toulouse Capitole

Présidente du jury

Douglas, K. R. ROBINSON

Chargé de Recherche, LISIS, Univ. G. Eiffel

Examineur

Pascal, LE MASSON

Professeur, MinesParistech - PSL

Directeur de thèse

Benoît, WEIL

Professeur, MinesParistech - PSL

Co-directeur de thèse

Mines ParisTech et l'Institut National de la Propriété Industrielle (INPI) n'entendent donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse. Ces opinions doivent être considérées comme propres à l'auteur.

À mamie Liliane

« GALILÉE REMET À LA RÉPUBLIQUE DE VENISE UNE NOUVELLE INVENTION.

GALILÉE. Votre Excellence, éminente Signoria ! En tant que professeur de mathématiques à votre université de Padoue et en tant que directeur de votre grand arsenal, ici à Venise, j'ai toujours considéré qu'il était de mon devoir, non seulement de satisfaire à ma haute charge professorale, mais encore, de procurer par des inventions utiles des avantages exceptionnels à la République de Venise. Avec une joie profonde de toute l'humilité qui vous est due, je puis aujourd'hui vous présenter et vous remettre un instrument absolument nouveau, ma lunette ou télescope, fabriqué selon les plus hauts principes scientifiques et chrétiens, dans votre grand arsenal célèbre dans le monde entier, fruit de la recherche patiente de dix-sept années de votre humble serviteur. *Galilée quitte l'estrade et se place à côté de Sagredo. Applaudissements. Galilée s'incline.*

GALILÉE, à voix basse à Sagredo. Temps perdu !

SAGREDO, à voix basse. Tu vas pouvoir payer ton boucher, mon vieux.

GALILÉE. Oui, ça va leur rapporter de l'argent.

Il s'incline à nouveau.

LE CURATEUR monte sur l'estrade. Excellence, éminente Signoria ! Une fois de plus, une page glorieuse du grand livre des arts se couvre de caractères vénitiens. *Applaudissements polis.* Un savant de renommée mondiale vous remet ici, à vous et à vous seuls, un tube hautement commercialisable afin que vous le fabriquiez et le lanciez sur le marché tout comme il vous plaira. *Applaudissements plus appuyés.* Et avez-vous songé qu'au moyen de cet instrument nous pourrions en temps de guerre reconnaître le nombre et le genre des bateaux de l'ennemi deux bonnes heures avant qu'il ne puisse le faire des nôtres, et qu'ainsi nous pourrions, sachant sa force, nous décider à le poursuivre, le combattre ou le fuir ? *Applaudissements très appuyés.* Et maintenant, Excellence, éminente Signoria, monsieur Galilée vous prie de recevoir, des mains de sa charmante fille, cet instrument de son invention, ce témoignage de son intuition.

Musique. Virginia s'avance, s'incline, remet la lunette au curateur qui la remet à Federzoni. Federzoni la pose sur le trépied et la règle. Le doge et les conseillers montent sur l'estrade et regardent à travers la lunette.

GALILÉE, à voix basse. Je ne peux pas te promettre que je supporterai jusqu'au bout ce carnaval. Ces gens-là s'imaginent avoir reçu un joujou qui va leur rapporter, mais c'est bien davantage. La nuit dernière j'ai pointé cette lunette en direction de la lune. »

La vie de Galilée, Bertolt Brecht (p. 26 – 27)¹

¹ Traduit par Eloi Recoin, ed. L'Arche.

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont aux membres du jury, qui ont accepté avec enthousiasme de discuter mes travaux.

Tout d'abord, je souhaiterais remercier Pr. Marine Agogué et Pr. Sylvain Lenfle d'avoir accepté d'être rapportrice et rapporteur de ma thèse. Merci également d'avoir fait de ma pré-soutenance un moment chaleureux et intellectuellement challengeant : vos précieux conseils et votre bienveillance ont, je l'espère, permis de rendre ce manuscrit plus synthétique, plus lisible et plus impactant. Merci à Pr. Nicola Mirc d'avoir accepté d'être examinatrice de ce travail, et avec qui je me réjouis de pouvoir continuer mon aventure académique à Toulouse. Merci également à Pr. Douglas K.R. Robinson, avec qui je suis ravi de discuter mes travaux. Enfin, un grand merci également aux deux invités de ce jury, Clarisse Angelier et Nicolas Sennequier, d'avoir accepté d'échanger sur mes travaux, mais aussi pour vos apports tout au long de la thèse, et j'y reviendrai ci-dessous.

Que serait un travail de thèse sans ses directeurs pour guider le doctorant dans ses premiers pas dans le monde académique ? Pascal, Benoît, je vous suis infiniment reconnaissant d'avoir accepté d'être mes directeurs de thèse pour cette aventure, et également pour votre disponibilité à toute épreuve, votre bienveillance, votre enthousiasme inégalable. Je vous remercie de m'avoir poussé à aller toujours un cran plus loin, de m'avoir laissé la liberté d'exploration qui me convenait, d'avoir toujours accueilli avec bienveillance mes propositions et idées, et les avoir discutées et améliorées. Je suis ravi d'avoir travaillé à vos côtés pendant ces trois années, et je pense avoir eu la direction de thèse dont tout doctorant peut rêver. J'ai déjà hâte de continuer à travailler ensemble sur de futurs projets !

Dans la suite de ces remerciements, je souhaiterais remercier toutes les personnes qui m'ont permis l'accès au terrain, aux données, et avec qui j'ai pu avoir des discussions enrichissantes, qui se reflètent, je l'espère, dans ce manuscrit.

Cette thèse a été soutenue par l'INPI, que je souhaite remercier ici d'avoir accepté de m'accueillir. Un grand merci Frédéric d'avoir permis le démarrage de cette collaboration, pour ton éternel enthousiasme et ton franc-parler, pour m'avoir toujours poussé à sortir de mon bureau et à échanger avec les praticiens, pour l'organisation des séminaires du club, et pour la transmission d'une partie de tes connaissances du métier ! Merci à toi Nicolas, d'avoir accepté de reprendre ces travaux en vol. Je te suis très reconnaissant de ta relecture méticuleuse, à la fois détaillée et enrichissante, de mon manuscrit. Ta connaissance fine de la recherche et de ses pratiques (et ce sans anglicisme) a également été un moteur de questionnements tout au long de la thèse. Merci également à Ingrid d'avoir assuré, avec une motivation et une détermination à toute épreuve, le suivi de mes travaux à l'INPI. Je te remercie très sincèrement pour tes efforts pour monter ensemble mon projet d'échange à l'étranger, malheureusement balayé par le Covid. Enfin, je voudrais également remercier le Directeur Général, Pascal Faure, pour nos discussions lors de nos comités, et pour avoir souhaité garder un œil sur mes travaux. Merci également à Erwan, Aurélien, Éric, Vincent, Franck, Olivier, Valérie pour votre aide et nos échanges.

Je souhaiterais remercier également les équipes de l'ANRT pour notre travail collaboratif durant ces trois années. En particulier, Clarisse Angelier, pour m'avoir conduit à poursuivre cette voie de recherche originale et proposé l'accès à cette mine d'or que sont les dossiers de thèse CIFRE. Merci à Pascal Giat de nous avoir également aidés dans ce travail. Je vous suis également reconnaissant de m'avoir donné l'opportunité de présenter nos travaux pour les 40 ans des CIFRE, dans ce lieu prestigieux qu'est le Collège de France. Merci à Violette Nemessany pour l'organisation de ce colloque.

Merci également aux équipes de la R&D de Total pour le travail collaboratif ensemble pendant plus d'une année. Je voudrais remercier plus particulièrement Meriam Chebre d'avoir initié ces travaux, Carole Ruot pour son aide précieuse pour naviguer dans les données de brevets. Merci également à

celles et ceux qui ont discuté nos travaux dans les comités de suivis, et les personnes que j'ai pu interroger dans le cadre de cette étude.

Pour poursuivre, une thèse c'est aussi l'appartenance à une équipe de recherche. J'ai eu la chance d'être intégré à une équipe bienveillante, humaine et enthousiaste. Merci à Sophie de m'avoir lancé sur la conception avec ce sportif projet d'option IC, à Kevin d'avoir continué l'année suivante en me permettant de voir les processus d'innovation au travers des lunettes de la conception. Merci à tous les deux d'avoir constitué le comité de pilotage de mes travaux, d'avoir toujours su les prolonger par des pistes intrigantes et intéressantes. Merci également à Armand pour les confettis salutaires qui m'ont permis de voir mes travaux sous des angles nouveaux. Merci à Franck pour tes retours toujours fort à propos pendant les séminaires doctoraux. Plus largement, merci aux membres de la chaire TMCI et du CGS pour votre soutien ou juste nos discussions de couloirs, toujours fortes intéressantes !

Bien sûr, une équipe de recherche est aussi composée de ses doctorants, et post-docs (dont certains sont depuis devenus enseignants-chercheurs) et qui ont permis de rendre ces trois années passionnantes. Un grand merci à toi Benjamin, de m'avoir mis le pied à l'étrier dès mes débuts au CGS, et pour nos travaux ensemble auprès de l'ANRT ! J'étais très heureux de partager mon premier bureau avec Yohann et Joël qui ont facilité mon intégration au CGS. Chloé, être représentant des doctorants avec toi a été une superbe expérience, grâce à ta rigueur et ta motivation : je suis certain que cette journée CGS Alumni finira par être organisée ! Un grand merci Chipten pour notre partage d'expérience de la CIFRE à l'INPI et pour ce sujet d'option ensemble, Maxime pour nos nombreux cafés / thés et débats lorsque nous partagions un bureau, Samantha pour nos discussions toujours passionnantes sur la thèse ou à propos de la côte ouest. Merci, Agathe pour nos échanges sur Toulouse et ce sujet d'IC ensemble. Un grand merci également à mes « camarades de promo » : Raphaëlle, Honorine, Caroline et Pierrick. À Charlotte et Pierre d'avoir repris le flambeau de représentants des doctorants. À Anaëlle pour nos échanges enjoués sur la vie parisienne. À Louise, Alix et Justine avec qui j'ai toujours eu grand plaisir à discuter même si le covid a limité les occasions ces derniers temps. Enfin merci aux autres doctorants du laboratoire avec qui j'ai apprécié échanger et notamment Nabila, Corentin, Jérémy, Iris, Mariam. Enfin, je voudrais remercier très chaleureusement Stéphanie, Céline et Marie-Michelle sans qui tout cela ne serait pas possible.

Je tenais également à remercier celles et ceux qui, en dehors du CGS, ont fait de ces trois années une belle expérience académique ! D'abord Clément, pour tous ces moments passionnants à discuter bases de données, brevets et programmation. Je repense aussi à nos fascinantes expéditions en Autriche ou en Allemagne. A Estelle pour cette visite inattendue de Delft et de Rotterdam. À Thomas Gillier pour tes précieux conseils sur le job market et mes papiers. Merci également, pour nos échanges scientifiques passionnants, à Mikaël Bikard, Sam Arts, Dominique Guellec, Ludovic Dibiaggio, Didier Lebert, Jianxi Luo. Merci aux ingénieurs de recherche Amaury, Paul et Maureen pour votre rigueur et votre bonne humeur dans ce fastidieux travail. Merci à mes collègues allemands Michaël, Hüseyin, Anna, Mei Yun pour ce projet ensemble qui m'a permis de m'évader un peu de ma thèse. Merci à Elise pour ce projet à 1200km/h. Merci à mes collègues qui m'ont donné l'opportunité d'enseigner, notamment Colette, Sandra, Louis et Julie.

Enfin je souhaitais remercier plus particulièrement quelques-uns de mes enseignants qui m'ont mis sur la voie de la recherche au cours de mon cursus : Christophe Morot, Ivan Arpin, Christophe Sarteur, Hervé Dumez et Alain Jeunemaître.

Bien sûr, cette aventure académique n'aurait pas été si belle sans celles et ceux qui sont à mes côtés, qui m'ont soutenu pendant ces trois ans, qui m'ont permis de partager sur la thèse ou de tout simplement penser à autre chose, et que je voudrais ici remercier.

D'abord, toi Florent, mon poisson-pilote qui m'a ouvert la voie de la thèse. Nos déjeuners œufs brouillés - salades, ces moments passés ensemble en montagne, à Paris ou dans le sud, ainsi qu'avec

Sarah et mes deux filleules, ont été des moments de joie et de décompression intenses. Romain, merci pour ces soirées de débriefing de nos journées à l'Adresse (voire à l'Absinthe) qui me manque depuis que tu es retourné à Grenoble, pour toutes ces sorties randos/vélos bienvenues, pour nos aventures au Yunnan. Aux « entoilés », Naoil, Margaux, Vincent, Thomas, Paul, Maxime, Matthias, Jordan et Pierre qu'il a été si difficile de quitter à SNCF, pour tous ces moments pendant ces trois ans que ce soit en Normandie, à Paris, à Fontainebleau. À Éléonore et Théodore pour cette collocation gustative et heureuse dans l'ouest, qui ont fait de ces moments difficiles de confinement, une parenthèse heureuse. A Jacqueline, Audrey et Raphaël pour nos diners, restaurants et sorties parisiennes qui ont toujours été des parenthèses joyeuses !

À ma famille, de m'avoir soutenu dans mon retour vers la recherche et tout au long de ces trois années, malgré les difficultés que nous avons traversées. Maman, de m'avoir donné ton goût de la culture qui m'a permis des pauses bienvenues dans cette aventure. Papa pour tes encouragements constants, et pour la force que tu m'envoies systématiquement avant chaque point important. Merci à tous les deux de m'avoir transmis la détermination et le goût pour le challenge intellectuel. Laurine, merci pour nos goûters de la crème de la crème des pâtisseries parisiennes (malheureusement trop peu nombreux cette année avec le covid), les randonnées et escapades en Irlande notamment. Merci à Kouan, Manu, Elliot, Myrtille que je suis ravi de retrouver plus au Sud très vite. Un grand merci également à Nathalie, Georges-Antoine, Salomé, Nathan pour ces moments passés ensemble pendant ces trois ans.

Enfin, bien sûr, merci à toi, Marianne. Mon expérience de thèse te doit tellement. Merci pour ton soutien inébranlable, pour ton écoute, pour tes conseils, pour m'avoir redonné le goût de la recherche, et surtout pour tous ces moments de joie intense pendant ces trois années. J'ai été heureux, et je me sens chanceux, d'avoir partagé cette aventure de la thèse tous les deux, que l'on se soit soutenu et épaulé tout du long, dans nos succès, mais aussi dans nos moments plus difficiles. Je suis infiniment heureux de démarrer ce nouveau chapitre de notre vie ensemble.

STRUCTURE DE LA THESE

Cette thèse de doctorat en sciences de gestion s'intéresse aux relations entre des activités de recherches scientifiques et des activités de développement de produits, procédés et services pour favoriser les percées scientifiques et l'innovation.

Les travaux sont structurés autour de quatre essais. Ceux-ci sont précédés d'une brève *introduction générale*, puis d'une *première partie* qui présente la thèse. L'enjeu est d'explicitier les liens et la cohérence des quatre contributions entre-elles. Ce choix de présentation m'est apparu le plus pertinent au regard du caractère exploratoire de mes travaux, qui m'ont amené à traiter quatre situations empiriques distinctes, mais chacune mettant en lumière une facette particulière de la thèse. Cette première partie reprend la structure classique d'une thèse : cadrage de la problématique de recherche (Chapitre 1), revue de littérature (Chapitre 2), méthodologie (Chapitre 3), résultats (Chapitre 4 & 5) et discussion (Chapitre 6).

Dans la *seconde partie* du manuscrit, les quatre essais sont présentés de façon successive, sous la forme avec laquelle ils ont été acceptés en conférence à comité de lecture ou envoyés à une revue en sciences de gestion. Pour faciliter la lecture, dans le Chapitre 5 de la première partie, j'ai proposé un bref récapitulatif des quatre contributions, ainsi qu'une mise en contexte au regard de la thèse. Les contributions sont reprises dans le Tableau 1 ci-dessous.

Essais	Détails
Essai N°1	<i>Another way to get the Nobel Prize: The role of the industry in the emergence of new scientific breakthroughs</i> , Quentin Plantec, Pascal Le Masson, Benoît Weil.* - Présenté à <i>R&D Management Conference 2021</i> , Dublin (en ligne)
Essai N°2	<i>Market-pull or research push? Effects of research orientations on university-industry collaborative Ph.D. projects' performances</i> . Quentin Plantec, Benjamin Cabanes, Pascal Le Masson, Benoît Weil. - Présenté à <i>R&D Management Conference 2019</i> , Paris - Présenté à <i>Academy of Management Conference 2021</i> , Philadelphia (en ligne)
Essai N°3	<i>Impact of knowledge search practices on the originality of inventions: a study in the oil & gas industry through dynamic patent analysis</i> , Quentin Plantec, Pascal Le Masson, Benoît Weil - Présenté à <i>Academy of Management Conference 2020</i> , Vancouver (en ligne) - Publié dans <i>Technological Forecasting & Social Change</i> , vol. 168, 2021 (DOI : https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120782)
Essai N°4	<i>Crises sanitaires et contributions industrielles à la recherche scientifique : le cas des coronavirus</i> , Quentin Plantec, Clément Sternberger, Pascal Le Masson, Benoît Weil - Soumis à la revue <i>La Revue Française de Gestion</i> (accepté - en cours de publication)

* Soumis à *R&D Management Conference 2020* et *DRUID Conference 2020*, toutes deux annulées en raison de la pandémie de Covid-19

Tableau 1 - Essais de la thèse

Le lecteur remarquera que ces essais comportent différents co-auteurs, mais j'ai été l'instigateur principal de ces contributions, que j'ai rédigées dans leur intégralité et pour lesquelles je suis ainsi premier auteur. Bien que cette thèse représente mon parcours intellectuel personnel, particulièrement mis en exergue dans la première partie de cette thèse, mon travail s'est appuyé sur un collectif que ce soit avec mes co-auteurs au Centre de Gestion Scientifique de MinesParistech ou à l'Institut National de la Propriété Industrielle (INPI). A ce titre, j'ai fait le choix dans la première partie de cette thèse, de substituer au « je » le « nous ». L'enjeu ici est à la fois d'inclure le lecteur dans la dynamique du propos, mais aussi et surtout de mettre une emphase particulière sur la réflexion collective qui a nourri ces travaux.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	7
STRUCTURE DE LA THESE.....	11
TABLE DES MATIERES	13
TABLE DES ABREVIATIONS.....	18
INTRODUCTION GENERALE.....	21
PARTIE 1 : MODELISATION ET ANALYSES EMPIRIQUES DES COUPLAGES A DOUBLE IMPACT SCIENCE – INDUSTRIE.....	35
CHAPITRE 1 : PARADOXES MODERNES DES RELATIONS SCIENCE – INDUSTRIE	39
1. <i>Une perspective gestionnaire des relations science – industrie</i>	43
1.1. Les activités de recherche de scientifique : le rôle de la méthode	43
1.2. Les activités de développement de produits, procédés et services : le rôle de l’activation des connaissances.....	45
1.3. La notion de couplage science – industrie.....	47
2. <i>Les couplages classiques à l’aune des grands débats science – industrie.....</i>	50
2.1. Transfert : comment diffuser les connaissances scientifiques des OPR au monde industriel ?	50
2.2. Recherche industrielle : l’entreprise peut-elle (encore) contribuer de façon féconde à la science ?.....	58
2.3. Recherche partenariale : comment l’organiser et la piloter ? Pour quels résultats ?.....	65
3. <i>L’hypothèse d’un couplage à double impact simultané.....</i>	74
3.1. Le couplage à double impact simultané comme réponse aux paradoxes des relations science - industrie.....	74
3.2. Traces historiques du couplage à double impact simultané.....	80
<i>Synthèse du Chapitre 1</i>	82
CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTERATURE	85
1. <i>Stratégie d’analyse de la littérature.....</i>	87
2. <i>Effets causaux des activités de recherche scientifique sur les activités de développement de nouveaux produits.....</i>	90
2.1. Les connaissances scientifiques dans la conceptualisation de l’invention par la logique combinatoire	92
2.2. Effets de la science sur la qualité de l’innovation dans la perspective combinatoire	94
2.3. Les enjeux managériaux de l’innovation par la science	100

3.	<i>Effets causaux des activités de développement de nouveaux produits sur les activités de recherche scientifique</i>	104
3.1.	La difficile conceptualisation des effets des activités de développement de nouveaux produits sur la science.....	105
3.1.1.	Le rapprochement OPR – entreprise comme injonction perturbatrice sur le système vertueux de l’académie	106
3.1.2.	L’hybridation société - science comme catalyseur de la recherche scientifique.....	109
3.2.	Effets causaux des activités de développement de nouveaux produits sur la qualité de la science	112
3.2.1.	Conséquences d’une orientation vers l’usage sur la productivité scientifique.....	112
3.2.2.	Conséquences de l’engagement académique sur la production scientifique.....	114
3.2.3.	Orientation vers l’usage et engagement académique : l’ampleur du phénomène	118
3.3.	Management de l’engagement pour favoriser les retombées scientifiques positives.....	121
3.3.1.	Gains nets pour la recherche scientifique de l’engagement académique	121
3.3.2.	Management des couplages science – industrie pour favoriser l’impact scientifique.....	123
4.	<i>Synthèse de la littérature au regard du double impact simultané et questions de recherche</i>	127
4.1.	Apports et limites de la littérature	127
4.2.	Questions de recherche.....	132
	<i>Synthèse du Chapitre 2</i>	136
	CHAPITRE 3 : METHODOLOGIE	139
1.	<i>Démarche et itinéraire de recherche</i>	141
1.1.	Construction de la démarche de recherche	141
1.1.1.	Abduction : l’hypothèse du double impact simultané.....	142
1.1.2.	Déduction : un modèle formel des couplages science - industrie	143
1.1.3.	Tests empiriques : performances et dynamiques du couplage à double impact simultané	143
1.1.4.	Induction : cadres institutionnels pour le modèle à double impact simultané.....	144
1.2.	Itinéraire de recherche suivi pendant la thèse.....	145
2.	<i>Positionnement épistémologique</i>	150
2.1.	L’hybridation du « chercheur-acteur » et du « post-positivisme »	150
2.2.	Implications du positionnement théorique pour la conduite de la recherche :.....	153
3.	<i>Méthodologies de recherche et matériaux empiriques</i>	155
3.1.	QR1 – Modèle formel et cas d’étude	156
3.1.1.	Modèle formel des couplages science – industrie.....	156
3.1.2.	Démonstration empirique du modèle formel : le cas CRISPR-Cas9	157
3.2.	QR2 – Tests empiriques quantitatifs des conditions d’existence et de performances du modèle formel.....	160
3.2.1.	Test du modèle formel dans la recherche dite fondamentale	160

3.2.2.	Test du modèle formel dans la recherche dite appliquée	164
3.3.	QR3 – Analyse des cadres institutionnels et des conditions.....	171
3.3.1.	R&D industrielle : régimes de dynamique de l’expertise pour le double impact simultané	171
3.3.2.	Crises : conditions et cadres institutions pour le double impact simultané.....	178
4.	<i>Focus méthodologique : l’approche bibliométrique</i>	181
4.1.	La bibliométrie comme méthode scientifique	181
4.2.	Bases de données bibliométriques exploitées dans la thèse.....	182
4.2.1.	Base de données de publications scientifiques	182
4.2.2.	Bases de données de brevets d’invention.....	184
4.2.3.	Publications scientifiques dans les brevets (SNPL).....	189
4.3.	Principaux indicateurs et proxys utilisés et leurs limites	189
4.3.1.	Qualité d’une invention ou d’une découverte scientifique.....	190
4.3.2.	Orientation des travaux de recherche.....	192
4.3.3.	Publications scientifiques industrielles et efforts scientifiques des entreprises	192
5.	<i>Synopsis de la thèse</i>	193
	<i>Synthèse du Chapitre 3</i>	198

CHAPITRE 4 : MODELES DE COUPLAGE RECHERCHE SCIENTIFIQUE -

	DEVELOPPEMENT PRODUITS, PROCEDES OU SERVICES.....	201
1.	<i>Objectifs et stratégie de modélisation</i>	203
1.1.	Éléments à modéliser.....	203
1.2.	Le recours aux théories de la conception comme stratégie de modélisation	205
1.2.1.	Les théories de la conception pour décrire la conception de produits innovants	205
1.2.2.	Les théories de la conception pour concevoir des interactions entre deux concepteurs.....	209
1.2.3.	Théorie C-K et conception de connaissances scientifiques nouvelles	210
2.	<i>Modèle formel des couplages</i>	212
2.1.	Cadre général de l’analyse.....	212
2.1.1.	Formalisme du couplage activités de recherche scientifique – activités de développement de produits	212
2.1.2.	Performances scientifiques et industrielles	214
2.1.3.	Logique d’interaction entre les acteurs	216
2.2.	Étape 1 - <i>Matching</i>	217
2.2.1.	Cas M-1 : Couplage séquentiel.....	217
2.2.2.	Cas M-2 : Couplage hybridé.....	220
2.2.3.	Cas M-3 : Pas de matching	223
2.3.	Étape 2 – <i>Building</i>	223
2.3.1.	Cas B-1 : Échanges pour favoriser des intersections.	225
2.3.2.	Cas B-2 : Modèle à double impact simultané (préservation des espaces de conception).....	228
2.4.	Discussion et implications du modèle formel :.....	231
2.4.1.	Classe des couplages séquentiels	231

2.4.2.	Classe des couplages hybridés.....	236
2.4.3.	Couplage à double impact simultané.....	240
3.	<i>Cas d'étude du modèle à double impact simultané.....</i>	<i>243</i>
3.1.	Présentation du contexte du cas CRISPR-Cas9.....	243
3.2.	Formalisation en C-K et démonstration du double impact simultané.....	249
3.2.1.	Situation initiale.....	249
3.2.2.	Phase de Matching.....	254
3.2.3.	Phase de Building.....	255
3.3.	Synthèse des apprentissages du cas et de la modélisation C-K.....	267
4.	<i>Retour sur le modèle formel et effets sur les questions de recherche.....</i>	<i>269</i>
4.1.	Apports du modèle formel des couplages.....	269
4.2.	La modélisation comme levier d'exploration des relations science – industrie :.....	272
	<i>Synthèse du Chapitre 4.....</i>	<i>276</i>

CHAPITRE 5 : TESTS EMPIRIQUES ET CADRES INSTITUTIONNELS POUR LE DOUBLE

	IMPACT SIMULTANE.....	279
1.	<i>Tests empiriques du modèle de couplage à double impact simultané.....</i>	<i>281</i>
1.1.	Dynamique historique et performances des couplages à double impact dans la « recherche fondamentale » (Essai N°1).....	282
1.2.	Performances des couplages à double impact dans la « recherche appliquée » (Essai N°2) ..	284
1.3.	Le double impact simultané : une nouvelle catégorie théorique d'intérêt pour la compréhension des relations science – industrie.....	286
2.	<i>Conditions et cadres institutionnels pour le couplage à double impact simultané.....</i>	<i>290</i>
2.1.	Double impact simultané et régimes de dynamique de l'expertise dans l'industrie : le cas des entreprises du pétrole et du gaz (Essai N°3).....	292
2.2.	Conditions et cadres institutionnels pour le double impact simultané en période de crise (Essai N°4).....	293
2.3.	Régimes d'actions et cadres institutionnels pour promouvoir le double impact simultané	296
	<i>Synthèse du Chapitre 5.....</i>	<i>300</i>

CHAPITRE 6 : DISCUSSION..... 303

1.	<i>Rappel des résultats de la thèse.....</i>	<i>305</i>
2.	<i>Contributions théoriques.....</i>	<i>310</i>
2.1.	Contribution à la littérature sur l'engagement académique.....	310
2.1.1.	Richesse des formes d'engagement académique et couplage à double impact simultané .	310
2.1.2.	Engagement académique, types de couplages science – industrie et performances scientifiques et industrielles.....	314
2.2.	Contributions à la littérature sur la R&D industrielle.....	317
2.3.	Contribution à la littérature en sciences de la conception.....	321

2.4.	Contribution à la littérature sur l'analyse combinatoire de l'invention	322
3.	<i>Apports pour les praticiens</i>	323
3.1.1.	Apports pour les relations OPR – entreprises	323
3.1.2.	Apports pour la R&D industrielle	325
4.	<i>Perspectives de recherche</i>	326
	<i>Synthèse du Chapitre 6</i>	329
PARTIE 2 : ESSAIS DE LA THESE		331
	ESSAI N°1 ANOTHER WAY TO GET THE NOBEL PRIZE: THE ROLE OF THE INDUSTRY IN THE EMERGENCE OF NEW SCIENTIFIC BREAKTHROUGHS	335
	ESSAI N°2 MARKET-PULL OR RESEARCH PUSH? EFFECTS OF RESEARCH ORIENTATIONS ON UNIVERSITY-INDUSTRY COLLABORATIVE PH.D. PROJECTS' PERFORMANCES	375
	ESSAI N°3 IMPACT OF KNOWLEDGE SEARCH PRACTICES ON THE ORIGINALITY OF INVENTIONS: A STUDY IN THE OIL & GAS INDUSTRY THROUGH DYNAMIC PATENT ANALYSIS	411
	ESSAI N°4 CRISES SANITAIRES ET CONTRIBUTIONS INDUSTRIELLES A LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE : LE CAS DES CORONAVIRUS	459
BIBLIOGRAPHIE		479
ANNEXE N°1 – LISTE DES ENTRETIENS, EVENEMENTS ET REUNIONS		493
ANNEXE N°2 – ARTICLE CONFERENCE ICED SOUMIS EN 2019 SUR LES COUPLAGES SCIENCE – INDUSTRIE		497
TABLE DES FIGURES DE LA PARTIE 1.....		513
TABLE DES TABLEAUX DE LA PARTIE 1		515
TABLE DES ENCADRES DE LA PARTIE 1.....		516

TABLE DES ABBREVIATIONS

ANRT	Association Nationale de la Recherche et de la Technologie
ARPA-E	<i>Advanced Research Projects Agency - Energy</i>
C-K	<i>Concept – Knowledge</i>
CIFRE	Convention Industrielle de Formation à la Recherche
CRISPR	<i>Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats</i>
DOE	<i>US Department of Energy</i>
GMR	Magnétorésistance Géante
INPI	Institut National de la Propriété Industrielle
INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
IPC	<i>International Patent Classification (ou CIB)</i>
IRT	Institut de Recherche Technologique
MESRI	Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation
MPO	<i>Market-pull orientation</i>
OCDE	Organisme de Coopération et de Développement Economie
OEB	Office Européen des Brevets
OPR	Organisme Public de Recherche
QR	Question de Recherche
R&D	Recherche & Développement
RPO	<i>Research-push orientation</i>
SATT	Sociétés d'Accélération du Transfert Technologique
SDI	<i>Simultaneous Discovery Invention orientation</i>
SNPL	<i>Scientific Non Patent Literature</i>
TTO	<i>Technology Transfer Office</i>
USPTO	<i>United States Patent and Trademark Office</i>

INTRODUCTION GENERALE

QUELS COUPLAGES SCIENCE – INDUSTRIE POUR L’INNOVATION ET LA RECHERCHE ?

En 1956, William Shockley, Walter H. Brattain et John Bardeen obtiennent le Prix Nobel de Physique pour leurs recherches sur les semi-conducteurs et la découverte des effets du transistor. En 2007, Albert Fert obtient le Prix Nobel de Physique, pour ses travaux sur la magnétorésistance géante (GMR). En 2020, Emmanuelle Charpentier et Jennifer Doudna obtiennent le Prix Nobel de Chimie pour leurs travaux sur les « ciseaux à ADN ». Mais quel est le point commun entre ces trois découvertes qui courent sur plus d'un demi-siècle ? Ce sont leurs impacts socio-économiques massifs, liés aux produits nouveaux et innovants développés grâce à leurs découvertes. Le nombre de transistors est désormais pléthorique, de nos téléphones à nos voitures, la GMR a permis le développement des disques durs modernes type SSD, et les ciseaux à ADN, bien que récents, permettent déjà de soigner des maladies génétiques jusqu'alors incurables².

Pourtant, bien que leurs découvertes scientifiques aient conduit à des innovations majeures, Shockley, Brattain, Bardeen, Fert, Charpentier et Doudna entretiennent des rapports très différents à l'industrie. Charpentier et Doudna, toutes deux affiliées à de grands Organismes Publics de Recherche (OPR), respectivement à l'Université de Berkeley et au Max Planck Institute, semblent mener leurs travaux sans liens particuliers avec des industriels. En revanche, Albert Fert, bien qu'affilié au CNRS et à l'Université Paris Saclay, continue de conduire des travaux de recherche partenariale avec Thomson CSF (devenu Thalès) au travers d'un laboratoire commun³. Shockley, Brattain et Bardeen étaient quant à eux, affiliés directement à un industriel pour leur découverte : les AT&T Bell Laboratories. Mais comment, au travers de ces situations hétérogènes, comprendre les effets sur l'innovation et la recherche scientifique des liens entre scientifiques et industriels ?

Dans cette thèse de sciences de gestion, nous traitons des relations entretenues entre *activités de recherche scientifique* et *activités de développement de produits, procédés ou*

² « CRISPR/cas9 : l'arme fatale de la thérapie génique », Sciences & Vie, ed. 07/10/2020

³ Unité Mixte de Physique CNRS/Thalès

services. Plus précisément, nous nous intéressons aux *couplages science - industrie*. Un couplage correspond à un modèle de liaisons entre ces deux activités, pouvant induire des effets réciproques de potentiel d'exploration et de créativité, mais aussi des effets de dépendance. Après tout, ne peut-on pas considérer qu'une part de l'industrie des biotechs s'est « construite » uniquement sur la base des découvertes de Doudna et Charpentier sur CRISPR⁴ ? Ne peut-on pas considérer que Fert a été « inspiré » par Thomson CSF et Thalès pour la découverte de la GMR⁵ ? Ou que Shockley, Brattain et Bardeen ont été spécifiquement poussés par les AT&T Bell Laboratories à poursuivre leurs voies de recherche particulière (Gertner, 2012) ? D'ailleurs Shockley défendra lui-même un paradigme de recherche fondé sur le « *respect pour les aspects scientifiques des problèmes pratiques* »⁶ (Shockley, 1976, p. 1545). Bien sûr, bien d'autres cas que ceux évoqués ci-dessus pourraient être discutés, d'autant qu'il s'agit là des avancées reconnues comme les plus significatives sur le plan scientifique. Au-delà de ces quelques cas particuliers, à grande échelle, on peut s'interroger sur les différents *modèles de couplages science - industrie*. Comment fonctionnent-ils ? Lesquels sont dominants, nouveaux ou classiques ? Pour quelles performances en matière d'innovation et de recherche scientifique ?

DES COUPLAGES CLASSIQUES À L'HYPOTHÈSE DU DOUBLE IMPACT SIMULTANÉ

Les sciences économiques ont montré que l'investissement dans la science était l'un des principaux facteurs de la croissance⁷. L'organisation des rapports science - industrie, et la place prise par l'État dans ce processus sont ainsi des sujets essentiels des agendas politiques (OCDE, 2013). S'il existe une littérature scientifique pléthorique et multidisciplinaire sur ce sujet (sciences politiques, économie, sociologie, gestion), l'organisation des rapports science – industrie évolue aussi au grès des doctrines étatiques.

En s'appuyant sur un travail d'analyse historique des différentes doctrines sur les rapports science - industrie et leurs évolutions, deux grands modèles semblent émerger. D'une part, des couplages hérités du *modèle linéaire* (Bush, 1945) : une logique de séparation des activités, où la recherche scientifique est menée dans un « paradigme de la curiosité » (Merton, 1973) et ses résultats *transférés* vers l'industrie. Ce modèle semble favoriser l'impact

⁴ « L'effet Nobel de chimie, GenOway bondit de 100% en bourse en trois jours », Les Echos, ed. 12/10/2020

⁵ « Albert Fert : l'art de la physique », Université Paris Saclay – portrait de chercheurs, ed. 03/12/2020

⁶ Traduction de l'auteur.

⁷ Voir par exemple : Aghion, Dewatripont et Stein, 2008 ; Nelson, 1959

scientifique au détriment de l'innovation et de l'industrie⁸. D'autre part, des couplages qui s'inscrivent dans une logique de *science résolutoire* (Le Masson et Weil, 2016) : des cas de *recherche partenariale* où la science est au service de la résolution de problèmes industriels locaux. À l'inverse, ce modèle semble favoriser l'impact industriel au détriment de l'impact scientifique⁹.

Ainsi, le choix d'un modèle de couplage semble alors cornélien : choisir l'un de ces couplages, c'est nécessairement au prix de la promotion d'un impact, scientifique ou industriel, à défaut de l'autre. D'ailleurs, les pouvoirs publics soulignent régulièrement les résultats en deçà des attentes de ces deux modèles (voir par exemple Cour des Comptes, 2018a ; MESRI, 2020 ; OCDE, 2013), malgré des efforts financiers et d'innovations organisationnelles importants. Et pour brouiller encore davantage les pistes de compréhension, la rencontre de ces deux activités peut conduire au meilleur, et nous l'avons illustré par nos exemples introductifs, mais aussi au pire. Comme nous l'indiquent les avancées récentes de l'agnotologie, la science est parfois une arme d'influence d'industriels peu scrupuleux pour « fabriquer l'ignorance » (Mirowski, 2011 ; Oreskes et Conway, 2010 ; Proctor et Girel, 2014) : scandales du tabac, du bisphénol A, des néonicotinoïdes, etc.

Pourtant, si dans les deux types de couplages précédant, un choix doit s'opérer entre impact scientifique ou impact industriel, les crises et les grandes transitions écologiques, énergétiques, numériques, nécessitent la production de nouveaux savoirs scientifiques, et dans le même temps, de nouveaux produits, procédés ou services. Le cas de la crise du covid-19, survenue au cours de cette thèse, est emblématique : il faut en un temps record, produire des vaccins, des remèdes, mais aussi et pour cela comprendre les mécanismes d'actions du nouveau virus, ses modes de diffusions. Ainsi, nous pourrions faire l'hypothèse, presque naïve, d'un modèle de relations science – industrie qui favoriserait, au cours d'un même projet, l'impact scientifique (ie. nouvelle découverte scientifique) et l'impact industriel (ie. nouveau produit, procédé ou service innovant). Nous parlerons dès lors d'un ***couplage à double impact simultané***. Or, cette logique est défendue par plusieurs institutions : Stanford, les Fraunhofer Institute, les instituts Carnots, l'École des Mines¹⁰, *Harvard Engineering School*, etc. Et

⁸ Voir notamment les débats actuels sur les *Technology Transfer Offices* (TTO) – par exemple (Miller, McAdam et McAdam, 2016), ou les résultats en deçà des attentes soulignés par la Cour des Comptes (2018a), le MESRI (2020).

⁹ Pour donner un exemple contemporain, on soulignera que l'on retrouve ces deux grands modèles dans le Programme d'Investissement d'Avenir (PIA), structuré autour d'actions pour la recherche partenariale d'une part, et du transfert d'autre part (Cour des Comptes, 2018a).

¹⁰ Voir notamment Archambault (2019)

plusieurs situations historiques pourraient être réinterprétées à l'aune de ce modèle de couplage, y compris les cas de Fert et Thomson CSF / Thalès, ou Shockley, Bardeen et Brattain et les AT&T Bell Laboratoires.

Pour tester cette hypothèse, nous pouvons nous baser sur les travaux précurseurs de Narayanamurti et Odumosu (2016) qui défendent, à partir d'une collection de cas empiriques, un tel modèle. Pourtant, leurs travaux ont principalement une vocation doctrinale (en proposant la mise en place de nouveaux mécanismes de financement de la recherche) et ne fournissent que peu d'explications sur les conditions d'existence d'un tel couplage. Par ailleurs, Goldstein et Narayanamurti (2018), qui introduisent le vocable de « simultanété », proposent la première démonstration empirique des performances d'un tel modèle. Pour cela ils étudient la création d'une nouvelle division à l'US *Department of Energy* intitulée *Advanced Research Projects Agency – Energy* (ARPA-E), et chargée de financer des projets qui adressent des questions de recherche fondamentale dans le cadre de projets appliqués. Ils démontrent que la division ARPA-E obtient des performances industrielles et scientifiques significativement supérieures aux autres divisions de l'institut, qui relèveraient davantage de la science résolutoire ou du modèle linéaire. Pourtant, compte tenu des spécificités de cette institution, des efforts conséquents devraient être menés pour généraliser ce résultat.

Ainsi, l'étude approfondie d'un possible couplage à double impact simultané s'avère prometteuse. Toutefois, au regard de nos apprentissages sur les modèles de couplages plus classiques (hérités du modèle linéaire, de la science résolutoire), si ce couplage existe, ses conditions sont probablement particulièrement restrictives et il sera nécessaire de les spécifier. Pour nous prononcer sur la possibilité d'un tel modèle, nous pouvons d'abord explorer la littérature en science de gestion.

LES APPORTS DE LA LITTÉRATURE EN SCIENCES DE GESTION POUR UN COUPLAGE À DOUBLE IMPACT SIMULTANÉ

Pour explorer les possibilités d'un couplage à double impact simultané, nous procédons en deux temps. D'abord, nous investiguons la possibilité d'un lien causal positif entre connaissances scientifiques et innovation, à partir de la littérature stabilisée sur l'invention combinatoire. Dans un second temps, nous explorons la littérature qui traite des effets de l'exposition des scientifiques aux activités de développement (principalement la littérature sur

l'engagement académique), un « *phénomène encore mal compris et [pour lequel la littérature est] peu consensuel* »¹¹ (Bikard, Vakili et Teodoridis, 2019, p. 426).

Ainsi, premièrement, les connaissances scientifiques peuvent être combinées à d'autres connaissances (ex., Fleming, 2001) ou faciliter le processus même de combinaison (ex., Fleming et Sorenson, 2004) pour concevoir des inventions. Or, en utilisant des techniques bibliométriques, il semble que les inventions qui intègrent des connaissances scientifiques soient plus originales et qualitatives (Arts et Fleming, 2018), et que ce type d'invention devient de plus en plus essentiel dans les régimes d'innovations contemporains (Poege *et al.*, 2019). Soulignons toutefois que le lien entre connaissance scientifique et innovation n'est pas mécanique (Arora, Belenzon et Pataconi, 2018 ; Cohen et Levinthal, 1990). Les entreprises font face à des difficultés d'absorption importantes de ce type de connaissances pour développer des produits nouveaux, et même si elles sont produites en interne de l'organisation (Zahra, Kaul et Bolívar-Ramos, 2018). À ce titre, le management de l'expertise devient un sujet d'intérêt majeur (Cabanès, Le Masson et Weil, 2020).

Deuxièmement, l'analyse des effets des activités de développement sur la recherche scientifique est un sujet sur lequel la littérature est moins pléthorique, notamment parce que le rôle de l'entreprise dans les activités de recherche partenariale est souvent simplifié à l'extrême (de Wit-de Vries *et al.*, 2018). Soulignons que la littérature décrit certains effets délétères potentiels du rapprochement science – industrie pour l'académie, par le développement du secret et la diminution potentielle de la circulation des connaissances scientifiques qui s'en suit (ex., Blumenthal *et al.*, 1996 ; Czarnitzki, Grimpe et Toole, 2015 ; Slaughter et Campbell, 2002 ; Toole et Czarnitzki, 2010). Pourtant, la littérature récente sur *l'engagement académique* (Perkmann *et al.*, 2013, 2021) montre que les deux activités peuvent être complémentaires pour les scientifiques (ex., Agrawal et Henderson, 1997), avec des effets, en moyenne, positifs sur la productivité scientifique des chercheurs engagés (ex., Bikard, Vakili et Teodoridis, 2019). Néanmoins, il faut souligner qu'il existe une très forte hétérogénéité dans les performances scientifiques de ces chercheurs (Van Looy, Callaert et Debackere, 2006), et l'effet de l'engagement sur la qualité des découvertes scientifiques n'est pas démontré (Perkmann *et al.*, 2021). En particulier, plusieurs appels pour étudier l'effet du type de modèle de recherche sur les performances scientifiques des chercheurs engagés avec l'industrie ont été lancés (Callaert *et al.*, 2015 ; Tijssen, 2018), mais peu d'études s'y sont attelées.

¹¹ Traduction de l'auteur

Ainsi, il semble exister une possibilité, en s'appuyant sur la littérature, pour un couplage à double impact simultané. Outre les conditions spécifiques de l'impact industriel qu'il faudra creuser, il sera nécessaire de démontrer par quels mécanismes un scientifique pourrait capitaliser sur son exposition aux activités de développement de produits, procédés, et services, pour des découvertes scientifiques novatrices, un point dur de cette thèse. Or, certaines avancées récentes de la littérature suggèrent que la piste d'une approche cognitive, basée sur les théories de la conception et notamment la théorie C-K (Hatchuel et Weil, 2003, 2009), pourrait s'avérer féconde pour investiguer lesdits mécanismes. Par exemple, les travaux de Gillier *et al.* (2010) montrent comment la théorie C-K permet de décrire certains mécanismes d'échanges de connaissances entre différents « concepteurs » dont des scientifiques et des industriels. Hatchuel *et al.* (2013) montrent par ailleurs que ce cadre théorique s'avère utile pour modéliser l'émergence de découvertes scientifiques, et Klasing Chen *et al.* (2017) l'ont appliqué avec succès à une situation de relations science – industrie.

QUESTIONS DE RECHERCHE & PRINCIPAUX APPORTS

Le premier enjeu de cette thèse est de décrire précisément les mécanismes, les conditions de succès, d'échecs, et de performances d'un couplage à double impact simultané. Pour cela, nous procéderons de façon déductive et tenterons de proposer une modélisation formelle de ce couplage. Cela constitue notre première question de recherche :

Question de Recherche N°1 : Comment modéliser un couplage à double impact simultané entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits, procédés ou services ?

Nos travaux vont nous amener à documenter finement, par le recours à un modèle formel qui se base sur la théorie C-K (Hatchuel et Weil, 2003, 2009), différents modèles de couplages possibles entre un concepteur scientifique et un concepteur industriel. En particulier, à l'issue de notre modélisation, nous allons proposer trois modèles de couplages distincts : ***classe des couplages séquentiels, classe des couplages hybridés, et couplage à double impact simultané.*** Cette typologie s'appuie sur une analyse des interactions entre deux concepteurs à partir du modèle dit « *matching – building* » (Gillier *et al.*, 2010) que nous avons réinterprété et généralisé pour l'appliquer à notre cas des relations science – industrie. Les performances sont envisagées à travers la notion de *dépassement des fixations* (ex., Agogué, 2012), et de *préservation des espaces de conception* (notion développée pour cette thèse).

Nous montrons que le couplage à double impact simultané est théoriquement possible, semble plus performant que les autres classes de couplages, mais que ses conditions d'existence sont particulièrement restrictives (indépendantisation des connaissances, non-hybridation des espaces conceptuels, échange bidirectionnel de connaissances originales, *k-reordering* etc.). Ce type de couplage étant particulièrement en rupture par rapport aux modèles classiques, **nous validerons son existence à partir d'un cas d'étude approfondi dans la R&D industrielle** : la découverte du mécanisme de défense immunitaire adaptatif des bactéries basée sur CRISPR-Cas9 et ses applications chez DuPont-Danisco. Nos travaux nous permettent également de discuter les modèles classiques hérités du modèle linéaire et de la science résolutoire en adoptant une approche cognitive novatrice.

Ainsi, la démonstration par le modèle formel nous amène à nous interroger plus largement sur la pertinence de la catégorie nouvellement introduite de couplage à double impact simultané pour réinterpréter des situations classiques (relevant des classes de couplages hybridés ou séquentiels). Nous avons par ailleurs démontré la pertinence du modèle sur un cas d'étude particulier, il nous faut désormais procéder à des tests de plus grande envergure. Nous pouvons ainsi proposer notre seconde question de recherche :

Question de Recherche N°2 : Quelle dynamique historique et quelles performances pour le modèle de couplage à double impact simultané dans les couplages relevant traditionnellement de la « recherche fondamentale » et de la « recherche appliquée » ?

Cette seconde question de recherche, développée au travers des essais N°1 et N°2, nous a permis de mettre en lumière la persistance historique des couplages à double impact simultané dans les régimes contemporains des relations science – industrie, et leurs performances.

Premièrement, nous montrons **qu'une part conséquente des découvertes les plus fondamentales et majeures de l'histoire des sciences a été réalisée par des chercheurs qui s'inscrivent dans le couplage à double impact simultané**. De plus, une analyse longitudinale permet d'observer que ce couplage semble s'imposer dans les périodes récentes vis-à-vis des couplages plus classiques. Deuxièmement, en étudiant des cas traditionnellement interprétés comme relevant de la recherche appliquée, nous avons pu documenter les performances respectives des différents types de couplages précédemment identifiés dans ce contexte. Nous montrons ainsi que **le couplage à double impact simultané est celui qui maximise l'impact scientifique relativement aux autres couplages, avec des performances similaires en termes industriels que la classe des couplages hybridés, couplage le plus performant en la**

matière. Nous montrons également que le choix du couplage est un déterminant principal des performances académiques et scientifiques d'un projet de recherche.

Ainsi, compte tenu de l'importance du double impact simultané dans les régimes d'innovation contemporain, de ses performances, nous souhaitons dès lors creuser les cadres institutionnels qui permettraient de le favoriser. Ces éléments constituent notre troisième question de recherche :

Question de Recherche N°3 : Quels cadres institutionnels et conditions pour favoriser les performances du modèle de couplage à double impact simultané ?

Dans cette dernière partie, développée au travers des essais N°3 et N°4, nous avons cherché à mettre en exergue des propriétés qui permettraient de favoriser les couplages à double impact simultané. Les éléments ci-dessus invitent à un large choix possible de situations qui seraient d'intérêt pour une telle étude. Deux contextes spécifiques ont été sélectionnés. D'une part, celui de la dynamique de l'expertise, qui est apparu dans la littérature comme un élément essentiel de l'intégration de connaissances scientifiques dans les produits industriels (Cabanes, Le Masson et Weil, 2020). D'autre part, alors que la crise du Covid-19 est survenue pendant nos travaux, nous nous sommes questionnés sur le contexte de la R&D industrielle en période de crise.

Premièrement, en développant une méthode novatrice d'identification du régime de dynamique de l'expertise sous-jacent à une invention, nous montrons que le **choix d'un régime dit de *recomposition* (ie. qui implique de combiner des expertises distantes de la base de connaissances d'une organisation, et potentiellement en y ajoutant des expertises externes nouvelles) est le plus à même de soutenir le couplage à double impact simultané dans la R&D industrielle.** Deuxièmement, nous démontrons **qu'en période de crise, où le couplage à double impact simultané a des propriétés intéressantes pour faire face au besoin de savoirs scientifiques et produits nouveaux, des conditions spécifiques doivent être mises en place pour assurer ses performances.** Nous montrons d'une part que les collaborations OPR – entreprises permettent de favoriser les performances de ce couplage, si et seulement si elles sont antérieures à la survenue de la crise. D'autre part, l'expertise scientifique préalable avant crise de l'entreprise sur la thématique de recherche favorise ce type de couplage.

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE DE LA RECHERCHE & MATÉRIAU EMPIRIQUE

La démarche de cette thèse, conduite dans le cadre du dispositif CIFRE auprès de l'Institut National de la Propriété Industrielle (INPI), est basée sur quatre principales phases.

D'abord une phase *d'abduction* basée sur l'analyse des grandes doctrines des relations science – industrie et de la littérature en sciences de gestion afin de proposer l'hypothèse d'un couplage à double impact simultané.

Ensuite, dans une phase de *déduction*, nous proposons un modèle formel des couplages science – industrie à double impact. Une emphase particulière est mise sur le couplage à double impact simultané. Le cadre théorique utilisé est celui des théories de la conception qui permet un cadre unifié pour décrire les activités de développement de produits, procédés et services, et les activités de recherche scientifique (Hatchuel *et al.*, 2013). Les conditions d'existence et de performance des différents modèles de couplage proposés seront discutées, et une attention particulière sera donnée au couplage à double impact simultané, modèle le plus en rupture. Il sera nécessaire, pour le valider, de démontrer qu'il permet de décrire efficacement au moins une situation empirique. Ici, la méthode du cas d'étude qualitatif sera retenue (ex., Goffin *et al.*, 2019 ; Yin, 2003) et appliquée au cas de la découverte fondamentale du mécanisme immunitaire adaptatif des bactéries basé sur CRISPR-Cas9 chez DuPont-Danisco. Ici, nous travaillerons à partir de documents d'archives pour démontrer les différentes conditions du modèle formel.

Dans une troisième phase de notre démarche, nous recourons à une approche de *tests empiriques* du modèle formel. Ici, nous utilisons une méthode hypothético-déductive et quantitative afin de tester la dynamique historique et les performances du couplage à double impact simultané. Compte tenu du caractère exploratoire de notre démarche, il nous faudra développer des méthodes originales pour qualifier des situations comme relevant du couplage à double impact simultané. Dans un premier temps, pour tester la dynamique historique du modèle dans le cas de la recherche dite « fondamentale », nous utilisons comme matériaux empiriques les publications et les brevets écrites et déposés par des lauréats du Prix Nobel de Physique, Chimie et Médecine sur longue période. Dans un second temps, pour tester les performances du modèle dans la recherche dite « appliquée », nous exploitons des données contractuelles et de questionnaires sur des projets de thèses CIFRE. Nous développons une méthode qualitative de codage des résumés des thèses pour qualifier les couplages à l'œuvre, et étudions quantitativement leurs performances scientifiques et industrielles, en contrôlant pour les caractéristiques et le déroulé des thèses.

Enfin, dans un quatrième temps, nous adoptons une démarche plus *inductive*. Sur la base des résultats précédents, nous cherchons des leviers pour promouvoir les couplages à double impact simultané par une réflexion sur les cadres institutionnels. Nous explorons d’abord quels régimes de dynamique de l’expertise sont les plus propices. Pour cela, nous conduirons une étude dans le secteur du pétrole et du gaz, secteur retenu pour sa dynamique de renouvellement de l’expertise lié à la transition écologique (Perrons, 2014). Nous développons une méthode novatrice de spécification du potentiel de double impact simultané par l’étude bibliométrique des brevets des entreprises leaders du secteur. Nous proposons également une typologie des régimes de renouvellement de l’expertise basée sur la structure des connaissances de l’organisation (Yayavaram et Ahuja, 2008 ; Yayavaram et Chen, 2015). Enfin, nous traitons du cas du double impact simultané en période de crise en étudiant sur longue période, les contributions des industriels à la recherche scientifique sur les coronavirus, et en spécifiant les périodes de crises (SARS-Cov1, MERS-Cov, Covid-19) et de non-crisis, et à partir d’une approche bibliométrique. Les données seront complétées par l’analyse des brevets sur cette thématique et des projets de vaccins contre la Covid-19.

PLAN DE LA THÈSE

Ce manuscrit est séparé en deux grandes parties distinctes. La première explicite la thèse : l’architecture de la réflexion scientifique, la démarche et les raisonnements menés, les résultats. La seconde présente successivement les quatre essais qui composent la thèse.

La première partie est organisée autour de six Chapitres dont l’architecture est présentée dans la Figure 1. D’abord, dans le **Chapitre 1**, nous contextualisons nos travaux par un travail de définition. Nous proposons ensuite une lecture des couplages entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits, procédés et services en mettant en exergue trois grands paradoxes modernes de ces relations. Ces éléments nous permettent de formuler l’hypothèse d’un modèle de couplage à double impact simultané, qui s’appuie sur quelques rares travaux émergents dans la littérature, mais principalement sur la revendication récente d’un tel modèle par certaines institutions. Ces éléments nous conduisent au **Chapitre 2** à analyser la littérature en sciences de gestion pour mieux comprendre les relations entre ces deux activités et déterminer s’il serait ainsi possible d’envisager un tel couplage. Il apparaît que l’effet positif des activités de recherche scientifique sur les activités de développement de produits, procédés et services est particulièrement bien documenté, mais quelques limites à l’absorption et l’exploitation de ces connaissances par les entreprises ont été soulignées, en lien avec le management de l’expertise. À l’inverse, les travaux sur les effets des activités de

développement sur la recherche scientifique sont moins consensuels. Ces éléments nous conduisent à proposer trois questions de recherche. Au **Chapitre 3** nous revenons sur le positionnement épistémologique du chercheur, la démarche de recherche, les méthodologies développées pour y répondre et les matériaux empiriques associés. Un focus est également proposé sur les méthodes bibliométriques, centrales dans cette thèse. Enfin, nous concluons ce Chapitre par un synopsis des résultats de la thèse. Ces éléments nous amènent à proposer deux Chapitres de résultats.

Le **Chapitre 4** constitue un premier résultat de nos travaux qui répond à la première question de recherche. Nous y développons un modèle formel des couplages entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits, procédés et services, et basé sur les théories de la conception. Ces éléments nous permettent de mettre en exergues les grandes propriétés, conditions de succès ou d'échecs et les performances escomptées de trois types de couplages : *classe des couplages séquentiels*, *classe des couplages hybridés* et *couplage à double impact simultané*. Nous menons également un cas d'étude approfondi (CRISPR-Cas9 chez DuPont-Danisco) pour valider son existence. Ensuite, le **Chapitre 5** vise à synthétiser la présentation des quatre essais en répondant aux questions de recherche N°2 et N°3. D'abord, nous analysons deux situations archétypales : la recherche dite « fondamentale » par l'étude des lauréats du Prix Nobel (essai N°1), puis la recherche dite « appliquée » par l'étude des thèses CIFRE (essai N°2). Ces éléments permettent d'attester l'intérêt et la dynamique récente des couplages à double impact simultané dans ces deux environnements, et de démontrer que les performances de ce modèle sont supérieures à celles des autres types de couplages. Ensuite, nous discutons les cadres institutionnels et les conditions qui permettent de favoriser les couplages à double impact simultané. Nous analysons d'abord comment dans le secteur du pétrole et du gaz, la dynamique de l'expertise dans la R&D industrielle peut permettre de favoriser ce type de couplage (essai N°3). Nous explorons également les conditions de réalisation de ce type de couplage en période de crise, ici sanitaire, en analysant l'effort de recherche des industriels pendant les crises sanitaires successives liées aux coronavirus (essai N°4). Enfin, nous concluons nos travaux au **Chapitre 6** par une synthèse de nos principaux apports théoriques, en particulier à trois champs de littérature clé pour cette thèse : l'engagement académique, l'invention combinatoire et les théories de la conception. Nous revenons également sur les apports pour les praticiens et proposons quelques pistes de recherche pour prolonger ce travail de thèse.

La seconde partie de cette thèse présente successivement les quatre essais, contextualisés au **Chapitre 5** de la partie précédente.

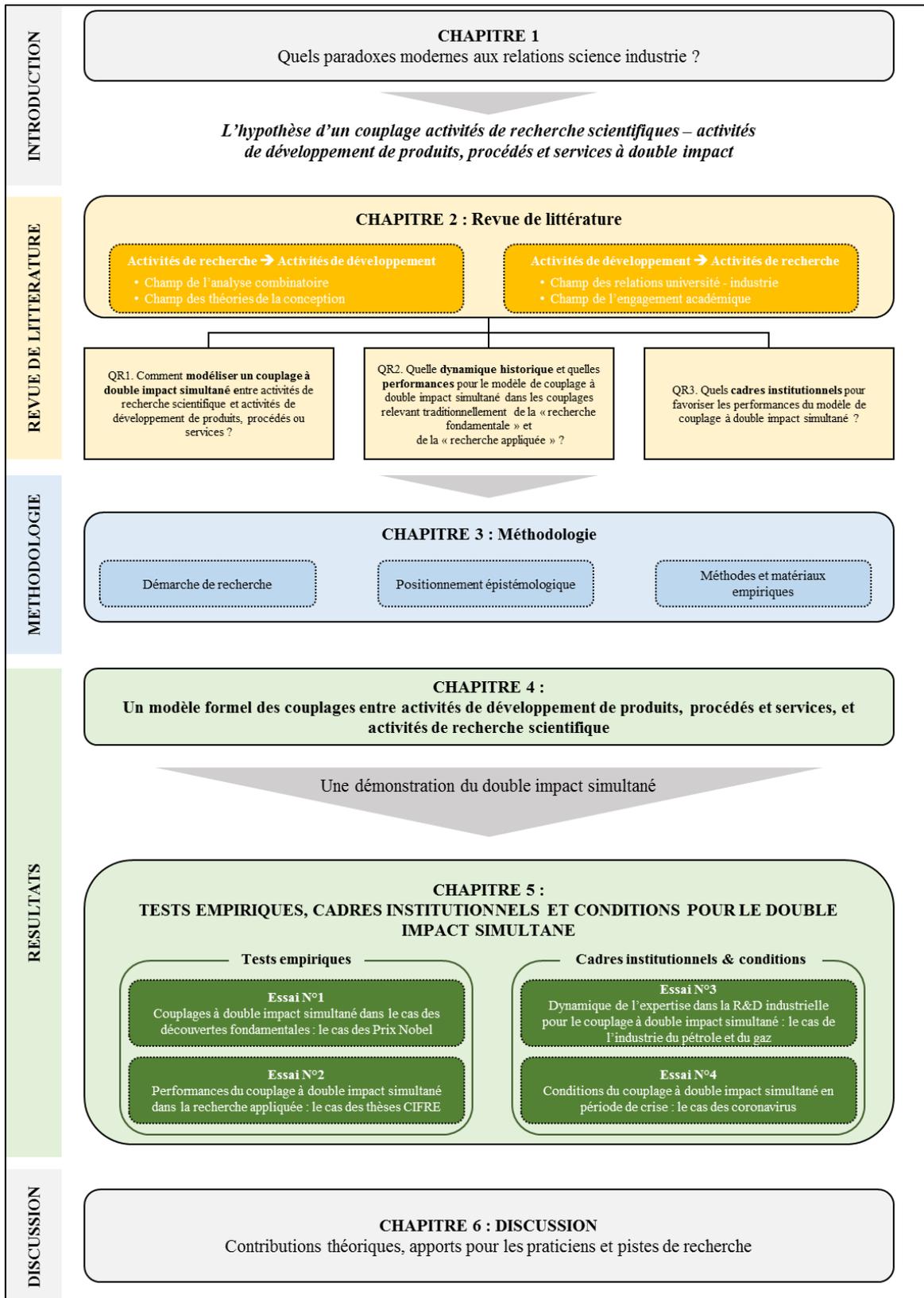


Figure 1 - Plan de la thèse



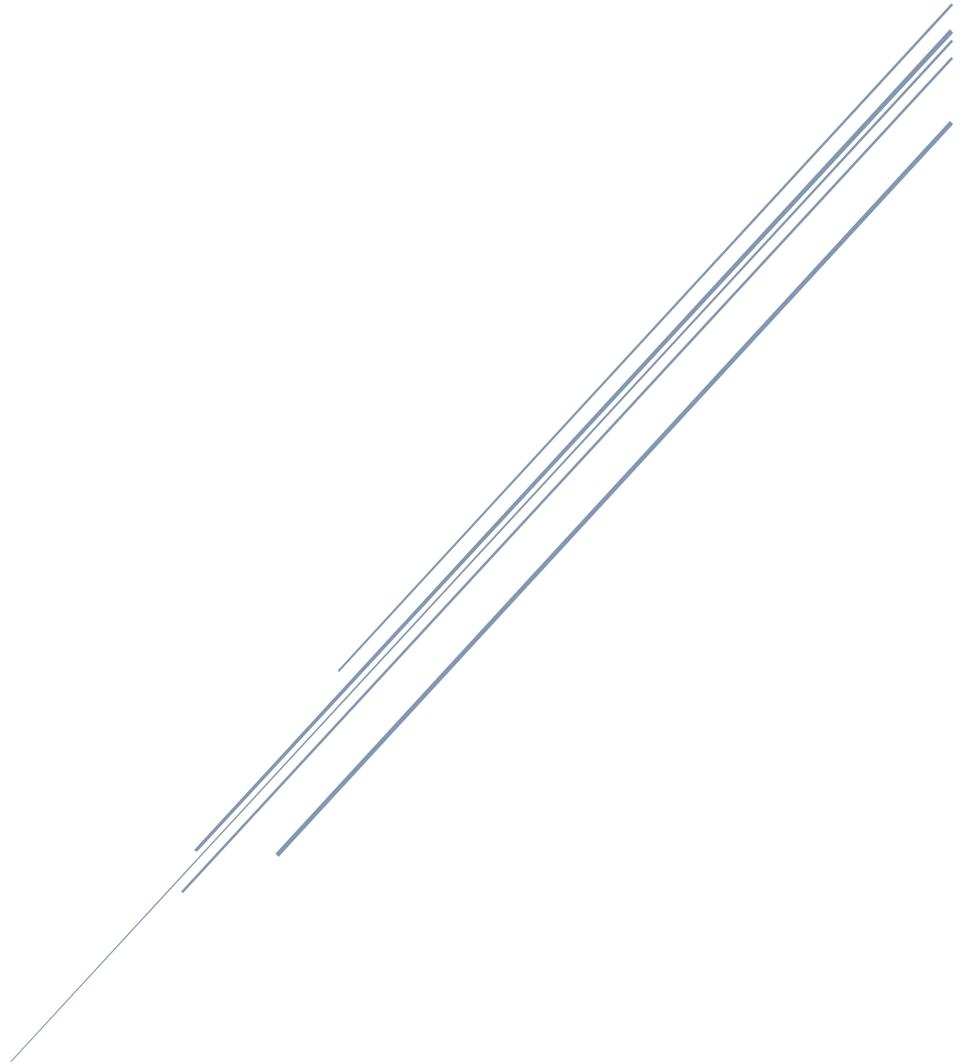
PARTIE 1 :
MODELISATION ET ANALYSES
EMPIRIQUES DES COUPLAGES A
DOUBLE IMPACT SCIENCE –
INDUSTRIE

Cette première partie vise à présenter ce travail de thèse et les essais qui composent la seconde partie de ce manuscrit. L'objectif est de contextualiser les travaux et de les inscrire dans une démarche de recherche structurée, d'explicitier les liens et la cohérence des quatre contributions entre-elles.

Chapitres	Pages
Chapitre 1 : Paradoxes modernes des relations science – industrie	p. 39
Chapitre 2 : Revue de littérature	p. 85
Chapitre 3 : Méthodologie	p. 139
Chapitre 4 : Modèles de couplage recherche scientifique - développement produits, procédés ou services	p. 201
Chapitre 5 : Tests empiriques et cadres institutionnels pour le double impact simultané	p. 279
Chapitre 6 : Discussion	p. 303

CHAPITRE 1 :

PARADOXES MODERNES DES RELATIONS SCIENCE – INDUSTRIE



Ce chapitre vise à présenter l'objet de recherche de cette thèse : les couplages science - industrie. Pour cela, nous proposons de revenir sur les définitions des principales notions de ces travaux : activités de recherche scientifique, activités de développement de produits, procédés et services, couplages science - industrie. Pour ancrer le sujet dans les questionnements actuels sur les relations science – industrie, nous revenons sur trois débats transverses portant successivement sur le transfert, la recherche industrielle et la recherche partenariale. Nous en tirons trois paradoxes clés et proposons l'hypothèse d'un couplage à double impact simultané, visant à les dépasser.

CHAPITRE 1 :

PARADOXES MODERNES DES RELATIONS SCIENCE – INDUSTRIE

1.	<i>Une perspective gestionnaire des relations science – industrie.....</i>	43
1.1.	Les activités de recherche de scientifique : le rôle de la méthode.....	43
1.2.	Les activités de développement de produits, procédés et services : le rôle de l’activation des connaissances	45
1.3.	La notion de couplage science – industrie	47
2.	<i>Les couplages classiques à l’aune des grands débats science – industrie.....</i>	50
2.1.	Transfert : comment diffuser les connaissances scientifiques des OPR au monde industriel ?.....	50
2.2.	Recherche industrielle : l’entreprise peut-elle (encore) contribuer de façon féconde à la science ?	58
2.3.	Recherche partenariale : comment l’organiser et la piloter ? Pour quels résultats ?	65
3.	<i>L’hypothèse d’un couplage à double impact simultané.....</i>	74
3.1.	Le couplage à double impact simultané comme réponse aux paradoxes des relations science - industrie	74
3.2.	Traces historiques du couplage à double impact simultané	80
	<i>Synthèse du Chapitre 1.....</i>	82

Ce travail de thèse s'intéresse aux relations entretenues entre science et industrie. Il semble aujourd'hui évident que ces deux « mondes » entretiennent de fortes relations : on parlera par exemple de la « Cité des Sciences & de l'Industrie » fondée à Paris en 1983, du slogan du CEA « *de la recherche à l'industrie* », du programme « *science-industry partnerships* » au Royaume-Uni, du Ministère « *Industry, Science, Energy & Ressources* » en Australie. Les exemples historiques où science et industrie s'entremêlent sont d'ailleurs pléthoriques : Galilée et les représentants de commerce, Pasteur et les brasseurs lillois, Coolidge, Langmuir et le laboratoire de General Electric. Nous pourrions prendre des exemples plus récents : Wittingham et son travail sur « l'intercalation » qui permit de concevoir les batteries lithium-ion, Doudna et Charpentier et leur travail sur le système immunitaire bactérien qui permit de développer les ciseaux à ADN avec des retombées en médecine et dans l'agroalimentaire. S'il s'agit d'incontestables succès scientifiques et industriels, les relations science – industrie ne semblent pas toujours être aussi fluides et fécondes. On pourrait d'abord adopter une position radicale et évoquer les scandales et les manipulations de la science par l'industrie : l'entreprise Surgisphere et l'hydroxychloroquine¹² pendant la crise du Covid-19, ou les efforts de manipulation de la science par l'industrie du tabac ou des produits chimiques¹³. Mais nous pourrions aussi plus simplement évoquer les collaborations parfois peu fructueuses entre ces deux mondes, les délais particulièrement longs d'absorption des connaissances scientifiques par les industriels, le ralentissement de la circulation des connaissances par le développement du secret dans l'industrie, ou encore les difficultés des pouvoirs publics pour organiser ces relations et proposer des cadres institutionnels favorisant avancées scientifiques et innovation.

Ainsi, comprendre les relations entretenues entre science et industrie qui pourraient mener à des succès scientifiques et industriels ne semble pas une tâche aisée. Paradoxalement, si ces deux mondes semblent indissociables, il est tout à fait possible d'étudier leur fonctionnement de façon totalement indépendant l'un de l'autre. Dans l'industrie par exemple, les connaissances scientifiques ne sont après tout qu'une possible source de connaissances parmi d'autres pour innover (Chesbrough, 2003 ; Cohen, Nelson et Walsh, 2002 ; Mansfield, 1995). Du côté de la science, les efforts de professionnalisation du travail scientifique à partir de la fin du 19ème siècle ont permis de rendre cette dernière la plus indépendante possible de l'industrie (Carnino, 2015 ; Galvez-behar, 2018). Et pourtant, il existe de très nombreux écrits

¹² « Covid-19 : les dessous de Surgisphere, l'entreprise de données dans la tourmente avec l'affaire du Lancet », *Sciences et Avenir* (ed. 11/06/2020)

¹³ Voir par exemple : « Sciences et Industrie : tous vendus ? », *La méthode scientifique*, podcast France Culture (ed. 18/02/2021), ou le documentaire « La fabrique de l'ignorance » de F. Cuveillier et P. Vasselín (2021)

sur la manière et le besoin quasi impérieux de rapprocher ces deux mondes, d’organiser et de piloter les relations qu’ils entretiennent. Des auteurs d’horizons très variés ont d’ailleurs contribué à établir une vaste littérature sur le sujet : des scientifiques issues de diverses disciplines (sciences politiques, économiques, sociales, gestion), mais aussi des politiques et des industriels. On pourrait citer l’exemple particulièrement récent du débat au Royaume-Uni sur la création d’une nouvelle agence de recherche dont l’objectif serait de « *support visionary high-risk, high-pay off scientific, engineering, and technology idea* »¹⁴ et qui devrait permettre de financer des projets de recherche fondamentale avec des enjeux industriels immédiats. Ainsi, les relations entre science et industrie se situent aux confins d’enjeux politiques, économiques et sociétaux majeurs et conduisent au développement et à l’adoption de doctrines par les décideurs publics quant à leur organisation.

Si les relations entre sciences et industrie peuvent être analysées par la sociologie (voir par exemple Merton, 1973), ou par une approche économique (voir par exemple Arrow, 1962), dans ce travail de thèse nous adoptons un point de vue gestionnaire (voir par exemple David, Hatchuel et Laufer, 2012). En effet, nous nous intéressons ici à la nature des activités inhérentes aux relations science – industrie et à leur organisation. Nous étudions les conditions, notamment institutionnelles, à mettre en place pour établir différents types de *couplages* entre ces activités, et les effets de ces derniers sur les performances. Ce vocable n’est pas anodin et nous souhaitons dans une première partie de ce Chapitre 1, revenir précisément sur ces notions. Cet effort est d’autant plus nécessaire que la multiplication des doctrines à travers le temps a conduit à une complexification du vocabulaire : science pure, recherche appliquée, recherche fondamentale, mode 2 de recherche, valorisation, transfert, etc. Dans une seconde partie de ce Chapitre 1, nous menons une analyse des principaux types de couplages science – industrie classiques et de leurs performances. Pour cela, et afin d’ancrer notre questionnement dans les défis modernes de la science et de l’industrie, nous revisiterons trois principaux débats et en tirons trois paradoxes. Dans une troisième partie, nous nous baserons sur les paradoxes précédemment identifiés pour faire l’hypothèse d’un modèle de couplage à double impact simultané science – industrie. Nous montrons que les propriétés d’un tel couplage semblent particulièrement restrictives : elles nécessitent d’étudier finement la littérature éparse qui nous permettrait de discuter cette hypothèse, mais aussi de modéliser finement les interactions entre activités de recherche scientifique et activité de développement de produits, procédés et services.

¹⁴ “A new UK research funding agency” – UK Parliament (fev. 2021) - <https://committees.parliament.uk/work/265/a-new-uk-research-funding-agency/publications/>

1. Une perspective gestionnaire des relations science – industrie

Comme nous l'avons indiqué, nous nous intéressons à la nature des activités et des relations entretenues entre science et industrie. Pour cela, nous nous efforcerons d'abord de proposer une définition des notions clés de cette thèse : les activités de recherche scientifique, les activités de développement de produits, procédés et services, et les couplages entre ces deux activités.

1.1. Les activités de recherche de scientifique : le rôle de la méthode

Nous souhaitons dans un premier temps définir la notion d'**activités de recherche scientifique**. Le terme de « recherche » d'abord, peut se définir d'après le dictionnaire Larousse comme un « *ensemble d'études et de travaux menés méthodiquement par un spécialiste et ayant pour objet de faire progresser la connaissance* », ou encore comme « *l'action de chercher à découvrir quelque chose, à parvenir à une connaissance nouvelle* ». Ces définitions nous permettent d'envisager une distinction entre la **nature** de l'activité de recherche qui repose sur la méthode, et le **résultat** de l'activité c'est-à-dire la connaissance nouvelle. On retrouve d'ailleurs cette dichotomie dans la définition donnée par l'OCDE : « [la recherche englobe] *les activités créatives et systématiques entreprises en vue d'accroître la somme des connaissances – y compris la connaissance de l'humanité, de la culture et de la société* » (OCDE, Manuel de Frascati, 2015, p. 46). Cet accent mis sur la méthode n'est pas anodin et fait écho aux grands débats épistémologiques qui ont animé les communautés scientifiques : Descartes (1637), Popper (1959), Kuhn (1962). Cette épineuse question, « qu'est-ce qui fait une *bonne* recherche scientifique ? », fait d'ailleurs toujours l'objet de réflexions et d'avancées récentes (voir pour une synthèse : Mårtensson et al., 2016), notamment dans un contexte où la lutte contre la fraude scientifique est devenue un enjeu essentiel (voir notamment Horton et al., 2020). Ainsi, la caractéristique clé de l'activité de recherche semble d'abord être celle de l'adoption d'une méthode spécifique.

Pourtant, historiquement, il faut attendre le début du 20^{ème} siècle pour que le terme de « recherche » soit associé au domaine scientifique, période jusqu'à laquelle on préférera parler de « science » et de « savants ». Le dictionnaire Larousse précise pour le terme « science » qu'il s'agit notamment d'un « *ensemble cohérent de connaissances relatives à certaines catégories de faits, d'objets ou de phénomènes obéissant à des lois et/ou vérifiés par les méthodes expérimentales* ». Ainsi, la recherche scientifique vise à produire des connaissances dans des catégories spécifiques, c'est-à-dire à proposer des propriétés des lois de la nature. Cette

définition fait également écho à celle du *British Science Council*¹⁵ qui met en exergue à la fois cet intérêt pour les lois de la nature, mais aussi pour l'adoption d'une méthode spécifique propre à cette activité : « *Science is the pursuit of knowledge and understanding of the natural and social world following a systematic methodology based on evidence* » (British Science Council, 2009). Le terme de « recherche scientifique » permet de décrire un processus, une action collective menée par les « chercheurs », au contraire du terme « science » qui correspond davantage au résultat en tant que tel, à un stock de connaissances (Le Masson, 2001). Ce résultat peut quant à lui prendre par exemple la forme d'une publication scientifique. Soulignons à ce titre que la productivité des activités de recherche scientifique a profondément évolué depuis l'après-Seconde Guerre mondiale, avec une forte accélération à partir des années 2000. À titre de comparaison, en 1950, environ 210 000 articles scientifiques étaient publiés par an. Aujourd'hui, ce chiffre est atteint en à peine plus de 15 jours : 4,8 millions d'articles scientifiques ont été publiés en 2020, sans que la crise du covid-19 semble avoir affecté cette productivité¹⁶.

Ces éléments nous permettent de proposer la définition suivante (dérivée de Le Masson, 2001) pour décrire cette activité :

Activités de recherche scientifique : la production contrôlée de connaissances scientifiques nouvelles et originales, en s'appuyant sur les méthodes scientifiques, et qui vise à définir ou tester des propriétés décrivant les lois de la nature.

Cette définition est clé pour ce travail de thèse : en adoptant cette perspective, nous pouvons nous intéresser aux conditions de réalisation de cette activité, et discuter les paramètres qui permettent ou non de favoriser la production de connaissances nouvelles et originales. Cette définition permet par exemple de discuter de l'intérêt de mener cette production contrôlée de connaissance en lien (ou non) avec des enjeux industriels, et d'en discuter les conditions institutionnelles. En effet, ici, le lien avec le développement de produits, procédés ou services n'est pas une nécessité : c'est un lien qu'il est possible ou non d'envisager. Rappelons d'ailleurs que si jusqu'à la fin du 19^{ème} siècle, science et industrie ont pu se confondre (voir section 2.2 p. 58 notamment), des efforts massifs ont été menés pour rendre la profession de savant la plus autonome possible, et donc de favoriser l'indépendance entre ces deux mondes (Carnino, 2015 ;

¹⁵ <https://sciencecouncil.org/about-science/our-definition-of-science/>

¹⁶ Source des données de publications scientifiques : Lens.org

Galvez-behar, 2018). De plus, remarquons que cette définition évite les écueils d'une approche institutionnelle, car elle n'implique pas de spécifier une organisation responsable de cette activité. En effet, les activités scientifiques peuvent tout à fait être menées dans une entreprise industrielle, ou dans un laboratoire de recherche public traditionnel. Comme l'accent est mis sur la méthode, les activités de recherche scientifique doivent répondre à des questions formulées au préalable, une donnée d'entrée, mais peu importe quel type d'institutions a posé la question ou quel est l'objet d'étude (Le Masson et Weil, 2021).

Ainsi, nous pouvons désormais spécifier plus précisément ce que nous entendons par activités de développement de produits, procédés et services.

1.2. Les activités de développement de produits, procédés et services : le rôle de l'activation des connaissances

Nous cherchons dans cette seconde sous-section à préciser la **notion d'activité de développement de produits, procédés et services**. Là encore, le dictionnaire Larousse nous indique que le développement peut notamment se définir comme « *la mise au point d'un appareil, d'un produit, en vue de sa vente ; période précédant la commercialisation* ». Cette définition permet de replacer le produit dans les grands phasages de la conception : il s'agit de l'activité qui précède immédiatement la commercialisation. À ce titre, la définition de l'OCDE précise que le développement consiste « *en des travaux systématiques – fondés sur les connaissances tirées de la recherche et l'expérience pratique et produisant de nouvelles connaissances techniques – visant à déboucher sur de nouveaux produits et procédés ou à améliorer les produits ou procédés existants* » (OCDE, Manuel de Frascati, 2015, p. 54). Il est par ailleurs précisé que « [l'] *issue est incertaine dans la mesure où les essais réalisés peuvent aboutir à des résultats négatifs ; l'activité présente un élément de créativité dans la mesure où elle consiste principalement à adapter des technologies à un nouvel usage ; elle est formalisée, car elle nécessite la participation d'une main-d'œuvre spécialisée* » (OCDE, Manuel de Frascati, 2015, p. 55). Ainsi, ces éléments de définitions nous permettent de mieux spécifier la **nature** de cette activité : c'est-à-dire l'utilisation de connaissances, scientifiques ou non, afin de produire de manière contrôlée des connaissances techniques nouvelles afférentes à un nouveau produit, procédé ou service. Le **résultat** consiste en la spécification d'un système, que l'on peut approcher par exemple par le dépôt d'un brevet d'invention. Pour contextualiser notre analyse, soulignons là encore que la productivité de cette activité a fortement évolué depuis l'après-Seconde Guerre mondiale. À titre de comparaison, en 1950, environ 100 000 brevets

étaient délivrés par les Offices chaque année contre environ 1,5 million en 2020, avec une forte accélération de la productivité à partir des années 1990¹⁷.

Ainsi, nous pouvons définir les activités de développement de produits, procédés et services de la façon suivante (dérivée de Le Masson, 2001) :

Activités de développement de produits, procédés et services : la spécification d'un système qui doit répondre à des critères donnés (coûts, délais, qualité, valeur) par l'activation de compétences et connaissances existantes, et qui résulte en la production de connaissances techniques formalisées nouvelles.

Là encore, cette définition constitue une notion clé de cette thèse. Au même titre que la définition précédente, elle permet d'étudier la nature particulière de cette activité dans une perspective gestionnaire. Il faut souligner la double forme d'indépendantisation de cette activité vis-à-vis des connaissances scientifiques. Premièrement, avec cette définition, la connaissance scientifique n'est qu'une source parmi d'autres de connaissances qui viennent alimenter les activités de développement de produits, procédés et services. En effet, la connaissance des produits des concurrents, les connaissances possédées par les consommateurs ou les connaissances sur les business modèles peuvent être tout à fait suffisantes pour développer de nouveaux produits (Chesbrough, 2003 ; von Hippel, 1986). Deuxièmement, le management des activités de développement de produits, procédés et services tend à favoriser une indépendance vis-à-vis de la science en supposant que le caractère innovant du produit, procédé ou service nouveau doit être un critère *ex ante*, conçu avant le démarrage de l'activité. Ainsi, le développement relèverait largement de la résolution de problèmes locaux, avec un rapport particulièrement limité à la science (Iansiti et West, 1997 ; Sieg, Wallin et Von Krogh, 2019). Remarquons également que la définition de l'activité est exempte de toute préconception institutionnelle : les activités de développement peuvent tout à fait être menées par des Organismes Publics de Recherche (voir les développements récents sur l'entrepreneuriat académique, par exemple Fini, Perkmann et Michael Ross, 2021) ou par des entreprises.

Il nous faut désormais nous intéresser à la conceptualisation des relations entre ces deux activités.

¹⁷ Source des données sur l'invention : Lens.org

1.3. La notion de couplage science – industrie

Cette thèse s'intéresse aux relations entretenues entre les activités de recherche scientifique (« la science ») et les activités de développement de produits, procédés et services (« l'industrie »). Nous avons donné quelques rapides exemples introductifs pour montrer à quel point ces deux activités sont historiquement entremêlées, et capables du meilleur (découvertes scientifiques à impact socio-économique important) comme du pire (fraudes et manipulations scientifiques) rendant leur conceptualisation difficile. Nous cherchons ici à décrire quels peuvent être les interfaces et les liens entre ces deux activités, ce qui nous amène à proposer la notion de *couplages science – industrie*. Tout d'abord, il nous faut expliquer pourquoi nous avons besoin d'introduire cette notion.

Premièrement, remarquons que les relations entretenues entre ces deux activités dépassent la notion traditionnelle de collaboration de recherche (Katz et Martin, 1997) ou de partenariats d'exploration (Segrestin, 2005). En effet, dans cette thèse, nous traitons plus largement de relations entre science et industrie sans que celles-ci relèvent nécessairement d'un effort conjoint. Par exemple, une voie de ressourcement privilégiée de la connaissance scientifique pour les activités de développement de produits, services ou procédés est la consultation de publications scientifiques par les industriels (Cohen, Nelson et Walsh, 2002), une activité n'impliquant pas de contact direct entre les parties. Soulignons qu'il existe une littérature qui traite spécifiquement des « collaborations science – industrie » définies comme les efforts conjoints de chercheurs issus des OPR avec des chercheurs issus d'une entreprise industrielle privée, pour produire des connaissances scientifiques (D'Este et Patel, 2007 ; Veugelers et Cassiman, 2005). Bien que nous contribuons à cette littérature (et plus largement à la littérature sur l'engagement académique, voir Chapitre 2), dans cette thèse nous souhaitons également discuter des interactions entre ces deux activités sous toutes leurs formes, des collaborations visant la co-exploration, aux relations plus distantes.

Deuxièmement, l'objet d'étude de cette thèse nous semble également dépasser la notion de valorisation, abondamment promue ces dernières années notamment par les pouvoirs publics. Dans le cadre des activités de recherche scientifique, la valorisation consiste à accroître la valeur d'une découverte en la faisant fructifier auprès d'entreprises ou d'industriels. En France, c'est la loi du 15 juillet 1982 d'orientation et de programmation pour la recherche et le développement technologique en France qui érige pour la première fois la notion de valorisation

comme un enjeu essentiel de l'activité scientifique publique¹⁸ (voir notamment sur ce sujet les travaux de Robin, 2014). Nous pouvons en donner une définition juridique à partir de la loi du 22 juillet 2013 : « *Valoriser les résultats de la recherche au service de la société. À cet effet, elle s'attache au **développement de l'innovation**, du **transfert de technologie** lorsque celui-ci est possible, de la **capacité d'expertise et d'appui** aux associations et fondations, reconnues d'utilité publique, et aux politiques publiques menées pour répondre aux défis sociétaux, aux besoins sociaux, économiques et du développement durable.* » (loi n°111-1 C, art. 14). Ainsi, la notion de valorisation semble englober à la fois les logiques de développement de l'innovation et de transfert. Pourtant elle présente une limite clé pour notre approche : ici, la connaissance scientifique est considérée comme pré-existante. Adopter une telle perspective ne permet pas d'envisager les effets potentiels (rétroactifs) des activités de développement sur les activités de recherche scientifique.

Troisièmement, nous souhaitons rendre compte des possibilités d'une des activités de « soumettre » l'autre à certains de ses objectifs. Ainsi, par la spécification d'un objet d'étude particulier, de questions de recherche spécifiques, il est par exemple possible d'imaginer que les activités de recherche scientifiques soient « contraintes » par les activités de développement de produits, procédés ou services. Dans le cas radical de l'industrie du tabac (voir Encadré 3 p. 73) par exemple, les travaux récents d'agnotologie ont montré comment les lobbyistes ont spécifié et orienté à leur intérêt les questions de recherche, sans que la méthode scientifique en elle-même doive être remise en cause (Oreskes et Conway, 2010 ; Proctor et Girel, 2014). Ainsi, les activités de développement ont ici contraint l'espace d'exploration de la science, son potentiel créatif a été influencé, ou déterminé, par celles-ci. La notion de couplage permet de prendre en compte ces logiques.

Ainsi, compte tenu de ces éléments, nous proposons le concept de ***couplage*** entre *activités de recherche scientifique* et *activités de développement de produits, procédés et services* pour décrire les relations entretenues entre ces deux activités. Le dictionnaire Larousse précise qu'un couplage peut se définir comme la « *liaison de deux circuits électriques, séparés par ailleurs, permettant le transfert réciproque de leur énergie ; mode de connexion de conducteurs ou de dispositifs* ». Cette analogie mécanique nous semble forte à propos pour notre sujet. D'une part, nous avons montré que les activités de recherche scientifique et les activités de développement

¹⁸ « La politique de la recherche et du développement technologique vise à l'accroissement des connaissances, à la valorisation des résultats de la recherche, à la diffusion de l'information scientifique et technique et à la promotion du français comme langue scientifique » (n° 82-610 du 15 juillet 1982, art. 5).

peuvent être considérées comme totalement indépendantes l'une de l'autre (ie. « *séparées par ailleurs* »). D'autre part, nous avons souligné qu'historiquement ces deux activités s'entremêlent et nous souhaitons étudier comment l'une et l'autre peuvent alimenter réciproquement leur capacité à générer des connaissances scientifiques et techniques nouvelles et originales. Ainsi, il ne s'agit pas seulement de les arrimer ou de les fixer entre-elles, mais bien de concevoir que leurs connexions puissent générer des formes d'échanges de potentiel de création. Une définition alternative du couplage dans le dictionnaire Larousse précise que l'action de coupler peut consister à « *réunir deux pièces, deux appareils, deux voitures motrices, etc., pour rendre leur manœuvre ou leur commande solidaire et simultanée* ». Ainsi, cette dimension du vocable nous permet également d'envisager les cas où les activités de développement et les activités de recherche scientifique viennent s'asservir mutuellement, se contraindre l'une à l'autre. Nous pouvons donc proposer la définition suivante :

Couplage science - industrie : un modèle de liaisons entre des activités de recherche scientifique et des activités de développement de produits, procédés et services qui peut induire (1) des effets réciproques de potentiel d'exploration et de créativité, et (2) des effets de dépendances entre ces deux activités.

Le corolaire de cette définition est qu'il existe une pluralité de couplages, qu'il nous faut déterminer. Pour les distinguer, nous utiliserons les termes de *modèles* ou de *régimes* de couplages (de façon interchangeable), car ils nécessitent la mise en place d'efforts de coordinations entre différents acteurs pour assurer les liaisons entre les deux activités, des cadres institutionnels et des dispositifs spécifiques.

Nous pouvons également préciser la notion de couplage science – industrie en l'articulant avec les notions de *recherche appliquée* (ie. travaux scientifiques menés avec un objectif pratique, un but particulier), et de *recherche fondamentale* (ie. travaux scientifiques menés sans objectif pratique, dans un paradigme de la curiosité) qui sont également importantes dans cette thèse. Premièrement, soulignons que ces deux notions relèvent de la définition proposée des *activités de recherche scientifique* : ces deux pratiques distinctes de la recherche visent à produire des connaissances scientifiques nouvelles en se fondant sur la méthode scientifique. Deuxièmement, ce qui les distingue, c'est le régime de couplages science – industrie dans lequel elles s'opèrent. La recherche fondamentale n'implique pas que les activités de recherche scientifique soient « alimentée » par des besoins issus des activités de développement : le transfert possible de potentiel de création et d'exploration est

unidirectionnel (des activités de recherche scientifique vers les activités de développement). À l'inverse, dans le cas de la recherche appliquée, les questions de recherche peuvent être alimentées par les activités de développement (avec des effets sur le potentiel de créativité et d'exploration). Les activités de recherche scientifique peuvent alors devenir dépendantes des activités de développement, elles-mêmes dépendantes des résultats de la recherche scientifique, créant ainsi une logique de « circuit fermé ».

Nous pouvons désormais tenter de distinguer plusieurs modèles de couplages au travers des grands débats historiques sur les relations science – industrie.

2. Les couplages classiques à l'aune des grands débats science – industrie

Dans cette section, nous souhaitons revenir sur trois grands débats historiques qui portent sur les relations science – industrie. Notre approche présente ici un double d'intérêt. D'une part, nous pouvons nous appuyer sur ces derniers pour identifier et discuter les principales formes de couplages science – industrie. D'autre part, comme nous l'avons fait remarquer, le sujet des relations science – industrie se situe aux confins d'enjeux politiques et socio-économiques. Or, en revenant sur ces débats contemporains, nous pouvons ancrer cette thèse dans des questionnements et enjeux actuels de la thématique.

2.1. Transfert : comment diffuser les connaissances scientifiques des OPR au monde industriel ?

Dans cette section, nous revenons brièvement sur les principales doctrines des décideurs publics de l'après-guerre quant à la diffusion des connaissances scientifiques issues des Organismes Publics de Recherche (OPR) au monde industriel, et en particulier les pratiques dites de transfert. Nous cherchons à dégager de ces doctrines des éléments pour discuter différents régimes possibles de couplages science – industrie. Nous procéderons en trois temps : (1) nous présenterons d'abord le modèle linéaire et chercherons à décrire les caractéristiques de ce couplage particulier, puis (2) discuterons ses critiques et ses évolutions afin d'adapter ses propriétés, avant d'enfin (3) évoquer ses performances.

La doctrine sans aucun doute la plus discutée (et probablement la plus décriée) sur les rapports science – industrie est celle du modèle dit linéaire, dont la paternité est attribuée à V. Bush pour son rapport datant de 1945 (voir Encadré 1) : *Science: The Endless Frontier*. Dans

ce document, Bush conceptualise les activités de recherche et développement (R&D) comme un processus séquentiel. Dans un premier temps, des activités de recherche fondamentale (qui s'opèrent dans un paradigme de la curiosité) puis de recherche appliquée (qui visent à proposer des applications expérimentales) menées par les OPR. Dans un second temps seulement, des activités de développement de nouveaux produits, procédés ou services, conduites par les entreprises. Cette conceptualisation des rapports science – industrie entraîne plusieurs implications. Premièrement, il devient nécessaire de financer massivement la recherche fondamentale, et donc les OPR, pour favoriser l'innovation et la compétitivité des entreprises. C'est une vision en entonnoir : pour obtenir de nouveaux produits, il faut nécessairement en amont de nombreux projets issus de la recherche fondamentale. Deuxièmement, les rapports science – industrie doivent être organisés de manière à garantir que la recherche fondamentale s'opère sans interaction avec ses applications potentielles, et donc sans interaction avec les industriels (Lamy, 2006). Ce cloisonnement est basé sur l'hypothèse que l'efficacité du système réside dans l'émergence de connaissances scientifiques générales par le paradigme de la curiosité, et permettant des applications variées. Soulignons que cette hypothèse est un héritage des orientations de la science dès le 19^{ème} siècle, époque à laquelle on utilise plus volontiers le vocable de « science pure » popularisé notamment par l'académicien Armand de Quatrefages (Carnino, 2014). Cette hypothèse, qui s'est notamment répandue via le terme de « sérendipité » (ie. logique de découverte fortuite) s'est diffusée dans la communauté scientifique et a été particulièrement performative, y compris dans la manière dont ont été établies certaines institutions scientifiques comme le CNRS¹⁹.

Ainsi, la conceptualisation de Bush du modèle linéaire et ses implications permettent de proposer un premier régime de couplage science – industrie. La doctrine du modèle linéaire peut être conceptualisée comme telle : (1) une division institutionnelle des activités entre OPR (ie. en charge des activités de recherche scientifique) et entreprises (ie. en charge des activités de développement), (2) une approche séquentielle des activités où les activités de recherche scientifique déterminent les activités de développement, et (3) la source de performance du

¹⁹ Jean Perrin par exemple, qui était en France l'un des défenseurs principaux de cette doctrine et qui sera le premier directeur du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) déclare dès 1935 : « *Est-il besoin de vous dire qu'en exécutant des recherches ayant pour but de pénétrer l'intérieur invisible du corps humain, recherches dirigées vers un but précis, on peut bien trouver l'ossification mais on ne trouvera pas les rayons X qui résolvent d'un coup le problème et qu'on a découverts, vous le savez, par des recherches sur les décharges électriques en apparence bien éloignées du but auquel on les appliquait ensuite sans effort* » (J. Perrin, cité dans Eidelman, 1988, p.44).

couplage réside dans la capacité à mener en amont des recherches fondamentales qui suivent le paradigme de la curiosité (et donc sans lien avec l'industrie).

Pourtant cette conceptualisation des rapports science - industrie en 1945 semble anachronique. Alors que le rapport de V. Bush est censé tirer les enseignements du projet Manhattan mené pendant la Seconde Guerre mondiale, il ne semble pas en décrire véritablement les ressorts : industriels et scientifiques ont largement co-exploré, y compris sur des travaux relevant de la recherche fondamentale, dans un projet où la linéarité prétendue semble éloignée de la réalité du terrain (Gillier et Lenfle, 2019). De plus, l'essor des laboratoires industriels date de la fin des années 1880, période à laquelle recherche fondamentale et développement peuvent parfois se confondre (Le Masson et Weil, 2016, voir également sous-section suivante). Bien sûr, le modèle linéaire ne semble donc pas le modèle unique de couplage science – industrie. Mais si le modèle semble aisément critiquable, comme le rappelle Godin (2006), ce n'est pas un cadre théorique proposé par V. Bush : ce dernier cherchait à défendre d'abord un modèle de financement de la recherche où l'État fédéral jouerait un rôle majeur (rappelons qu'avant la guerre, l'État fédéral ne finance pas la recherche). D'ailleurs dès les années 1960 le débat sur l'organisation des relations science – industrie se structure et plusieurs contributions permettent de critiquer le modèle linéaire (Godin et Lane, 2013). Price et Bass expliquent par exemple en 1969 dans la revue *Science* que « *the dialogue between science and technology plays an important, but usually non linear, role in innovation* » (p. 802). Par ailleurs, le projet Hindsight mené par le Département de la Défense aux États-Unis entre 1963 et 1967 (et dont le rapport est publié en 1969) et qui vise à étudier de façon systématique la conduite des projets de recherche militaires américains durant la Seconde Guerre mondiale, tend à proposer un tout autre modèle que celui de Bush. En effet, l'étude montre que la plupart des projets financés ne relèvent pas de la « science » mais plutôt du développement, et que pour les projets à teneur scientifique, une très faible proportion relève de la recherche fondamentale. Le nouveau théorique va être petit à petit porté par les apports de diverses conceptualisations successives qui feront l'objet de débat : le « modèle d'innovation à boucle de rétroactions » (Kline, 1985), le « du modèle de recherche N°2 » (Gibbons *et al.*, 1994), le modèle de la « triple hélice » (Etzkowitz et Leydesdorff, 2000), ou encore le paradigme de l'innovation ouverte (Chesbrough, 2003 ; Laursen et Salter, 2006). Nous reviendrons au Chapitre 2 plus en détail sur ces éléments théoriques, mais nous pouvons nous attarder sur les changements qu'ont entraînés ces critiques dans l'organisation des relations science – industrie, et la façon dont ils nous renseignent sur les évolutions des couplages science - industrie.

En particulier à partir des années 1980, à la suite de nombreuses critiques du modèle linéaire, des efforts massifs ont été menés par les décideurs publics pour favoriser l'absorption par les industriels des connaissances développées par les OPR (Cohen et Levinthal, 1990), dans une logique offre – demande : c'est l'essor de la thématique du *transfert* de connaissances (Mowery, 2009 ; Mowery *et al.*, 2001). À titre d'illustration de l'intérêt pour cette thématique, la revue scientifique *The Journal of Technology Transfer* est créée en 1977²⁰. L'objectif des décideurs publics est alors d'éviter que la production des connaissances scientifiques des OPR ne se déroule dans « une tour d'ivoire » (Thursby et Thursby, 2002), avec des connaissances nouvelles qui n'atteignent pas le monde industriel. Ce mouvement se cristallise aux États-Unis avec le *Bayh-Dole Act* en 1980 (Mowery *et al.*, 2001) et la possibilité laissée aux Universités américaines de tirer profit de leurs découvertes scientifiques par le biais de brevets, et qui constitue une véritable révolution organisationnelle (Miller, McAdam et McAdam, 2018). L'enjeu est donc d'inciter les OPR à organiser et promouvoir ces logiques de transfert, notamment par le biais d'incitations financières. À cette même époque en France, le transfert devient même une mission à part entière des personnels de recherche. En effet, l'article 24 de la loi d'orientation de la recherche du 15 juillet 1982 précise que parmi leurs missions figure le « *transfert et [l']application [des connaissances scientifiques] dans les entreprises, et dans tous les domaines contribuant au progrès de la société* » (n° 82-610 du 15 juillet 1982, art. 24). Le mouvement s'est poursuivi jusqu'à la période récente avec le développement des *Technology Transfer Offices* (TTO) désormais responsables de la gestion de cette activité dans la plupart des OPR (Miller, McAdam et McAdam, 2016, 2018). Dans le cas français, de très nombreux mécanismes ont été mis en place pour renforcer le transfert comme en témoigne la Figure 2 ci-dessous : citons par exemple la création des 14 Sociétés d'Accélération du Transfert de Technologies (SATT) dans le cadre du Programme d'Investissement d'Avenir de 2009 (Cour des Comptes, 2018b). **Mais que nous apprennent ces évolutions majeures sur les couplages science – industrie ?**

²⁰ Voir : <https://link.springer.com/journal/10961/volumes-and-issues/1-2>

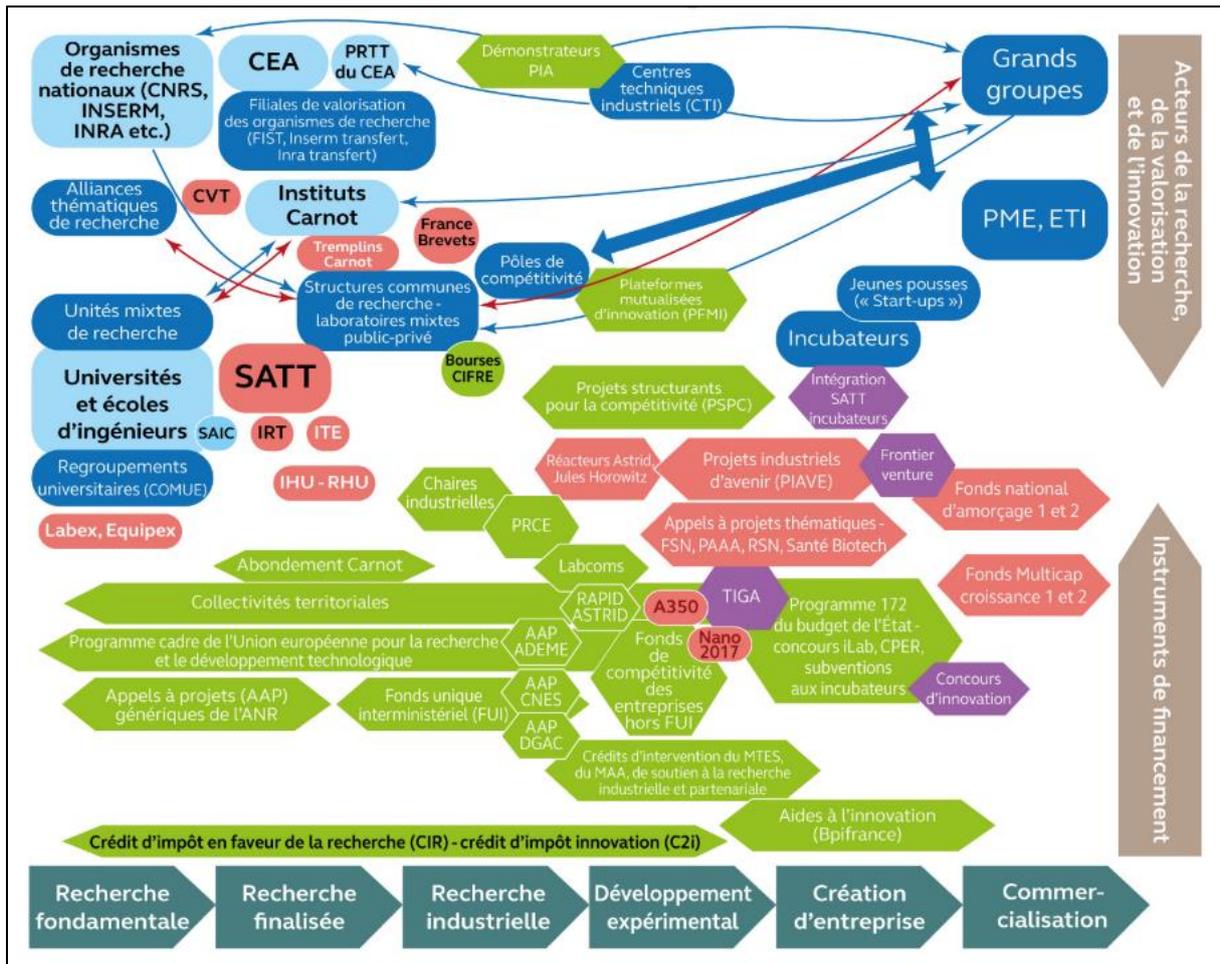


Figure 2 - Les outils de la valorisation et du transfert en France (source : Cour des Comptes, 2018)

Premièrement, l'hypothèse sous-jacente à ces évolutions est la suivante : les scientifiques des OPR produisent de nouvelles connaissances de qualité, mais la diffusion de ces connaissances vers l'industrie est insuffisante (Amara, Olmos-Peñuela et Fernández-de-Lucio, 2018), hypothèse ne remettant pas en cause ni les efforts réalisés pour promouvoir l'autonomie de la recherche fondamentale, ni la séquentialité des activités, et ce en écho avec le modèle linéaire. Ainsi, dans les activités de transfert, la logique de séquentialité inhérente au couplage science – industrie que nous avons dérivée de V. Bush ne semble pas avoir été profondément modifiée : il n'y a a priori pas véritablement de modèle alternatif dominant qui se serait imposé face au modèle linéaire. Comme le rappelle Godin : « *recent efforts to modify or replace the [linear] model have been limited with regard to their impact* » (Godin, 2006, p. 660). Nous pouvons d'ailleurs remarquer que les exemples directs actuels de l'héritage du modèle linéaire sont encore particulièrement nombreux. Citons par exemple, le Commissariat à l'Énergie Atomique (Cour des comptes, 2018), ou le Département de l'Énergie (DOE) aux États-Unis

(Goldstein et Narayanamurti, 2018) qui sont aujourd’hui toujours organisés avec une division de recherche fondamentale (ie. CEA Sciences) d’une part, et une division de recherche appliquée (ie. CEA Tech) davantage en lien avec le tissu industriel d’autre part. Nous pourrions conclure en citant cet extrait du Rapport de la Chambre des Représentants aux États-Unis : « *Vannevar Bush's writings in Science The Endless Frontier, which despite being more than 50 years old are still largely recognized as the basis for the Nation's existing science policy, reinforced the simplified demarcation between basic and applied research.* » (US House of Representatives, 1998, p. 8). Narayanamurti et Odumosu écrivent également à ce sujet « *The linear model concepts are still alive and well [...] As long as the distinction of research into a “basic” type vs. an “applied” type still holds, the linear model will remain a phoenix, constantly beaten down, but destined to rise again* » (p. 144). **Ainsi, malgré les évolutions et changements profonds du système d’organisation de la recherche, la logique séquentielle du modèle de couplage linéaire semble largement perdurer.**

Deuxièmement, si le couplage hérité du modèle linéaire semble dominant, on peut considérer que certains cadres institutionnels, par le biais de dispositifs spécifiques (SATT, incitations financières, etc.), peuvent favoriser le potentiel du couplage et accroître la fluidité des transferts de potentiel d’exploration. D’ailleurs, alors que ce modèle de couplage semble dominant, nous avons montré que depuis l’après-Seconde Guerre mondiale, la productivité scientifique s’est particulièrement accélérée : le paradigme de la curiosité associé à la recherche fondamentale réalisée de façon autonome de l’industrie semble ainsi favoriser les avancées scientifiques. Mais intéressons-nous maintenant aux performances du transfert dans les pratiques héritées du modèle linéaire. D’abord, citons quelques succès clés : la découverte du docétaxel, un médicament anticancéreux, par Pierre Potier à l’Institut CNRS de Chimie des substances naturelles à Gif-sur-Yvette en 1989 et générant 1,7 Mds € de revenus de licence pendant la période de protection pour le CNRS (Cour des Comptes, 2018b). Autre exemple, le graphène synthétisé par les Prix Nobel de Physique André Geim et Konstantin Novoselov en 2004 dans leur laboratoire de l’Université de Manchester, un matériau impactant de nombreuses industries comme les semi-conducteurs avec la création de marchés potentiels conséquents (Batra, Santhanam et Surana, 2018). Pourtant, les résultats escomptés des efforts de transferts sont dans l’ensemble en deçà des attentes. Les outils d’évaluation des performances du transfert généralement utilisés sont : le nombre de demandes de brevets déposées par un OPR, les revenus de licences accordés à des industriels pour ces brevets, voire le nombre de start-up académiques (que l’on peut voir comme un mécanisme de « transfert forcé » par la création d’une entité ad hoc). D’abord, concernant les revenus de licences des OPR, ceux-ci sont

particulièrement faibles : seuls quelques « blockbusters » génèrent des revenus conséquents (OCDE, 2013). À titre d'exemple, les revenus de licences du docétaxel représentaient 90% des revenus de licences du CNRS sur la période couverte par les brevets (Cour des Comptes, 2018). Par ailleurs, le nombre de start-up académiques générées par OPR est également particulièrement limité. L'OCDE rapporte notamment que pour les 156 plus grandes universités américaines, le nombre moyen de spin-off créé par an était seulement de 4 en 2011 (OCDE, 2013). Enfin, nous pouvons présenter le tableau bilan établi par la Cour des Comptes en 2018 concernant les performances des SATT et qui montre des écarts de performances significatifs sur l'ensemble des indicateurs de valorisation proposés (Tableau 2).

	Déclarations d'inventions	Brevets	Licences signées	Revenus issus du transfert
Prévisions	3 593	2 260	487	17,5 M€
Réalisations	3 066	1 082	237	4,7 M€
Ecart	- 14%	- 52%	- 51%	-73 %

Tableau 2 - Performances des SATT en 2018 (source : Cour des Comptes)

Ainsi, les décideurs publics ont encouragé une division du travail entre des activités de recherche scientifique et de développement, avec des activités de recherche scientifique qui doivent être menées en autonomie par les OPR mais qui se doivent aussi d'avoir un impact de plus en plus significatif pour l'innovation industrielle. **Dans les cadres institutionnels établis, performe une vision des industriels comme demandeurs de connaissances scientifiques pour nourrir leur processus créatif. On soulignera la “dissatisfaction with the measurable and direct returns of public research results” (OCDE, 2013, p. 14) associés à ces politiques centrés sur une logique de transfert, malgré des succès non négligeables.** On remarquera également que les retombées scientifiques d'un tel engagement des chercheurs dans le transfert ne sont jamais évoquées.

L'ensemble de ces éléments nous permettent de conclure cette sous-section avec le paradoxe N°1 ci-dessous :

Paradoxe N°1 : Un premier modèle de couplage science - industrie (hérité du modèle linéaire de Bush) repose sur la séquentialité et la séparation institutionnelle des activités de recherche scientifique et de développement entre OPR et entreprise. Pourtant, s'il semble favoriser la productivité scientifique, les résultats en termes de retombées socio-économiques sont considérés en dessous des attentes par les décideurs publics.

Nous pouvons désormais nous intéresser plus précisément au cas de la recherche industrielle.

Encadré 1 - le modèle linéaire chez v. Bush (1945)

Nous détaillons ici la conceptualisation des relations science – industrie chez V. Bush, en nous appuyant sur l'analyse du rapport *Science: The Endless frontier*.

Premier élément du modèle : la recherche fondamentale est considérée comme le point de départ de tout progrès socio-économique. La rhétorique de Bush est basée sur une analyse historique de quelques produits phares (notamment militaire, mais aussi des biens de grande consommation comme la télévision). Pour lui, tout produit nouveau n'est possible qu'à partir des résultats issus des travaux de la recherche fondamentale. Or, c'est bien la production de ces produits qui permettra d'assurer le plein emploi et donc la croissance économique, ou qui permettra la lutte contre les maladies et la production de vaccins ou médicaments. Comme il l'indique :

« We want plenty of new, vigorous enterprises. But new products and processes are not born full-grown. They are founded on new principles and new conceptions which in turn result from basic scientific research. Basic scientific research is scientific capital. » (V. Bush, Executive Summary, version numérique html proposée par la NSF – numéros de page non disponible).

Dans le Chapitre 3 - *Science & the public Welfare*, Bush donne une définition plus précise de ce que doit être selon lui la recherche fondamentale. Pour lui, elle se focalise sur (1) la compréhension des lois de la nature et ce, (2) sans se préoccuper d'éventuelles applications pendant cette activité. Soulignons ici que ces deux propositions pourraient tout à fait ne pas aller de pair. Mais la seconde assertion permet à V. Bush de développer une logique relativement processuelle : la recherche fondamentale se focalise sur la compréhension des lois de la nature sans se préoccuper d'éventuelles applications car c'est la recherche appliquée, qui en capitalisant sur les découvertes fondamentales précédentes, permet d'aller jusqu'au développement de produits. La recherche appliquée est donc considérée dans une logique de résolution de problème. Le passage suivant est à ce titre particulièrement éclairant :

« Basic research is performed without thought of practical ends. It results in general knowledge and an understanding of nature and its laws. This general knowledge provides the means of answering a large number of important practical problems, though it may not give a complete specific answer to any one of them. The function of applied research is to provide such complete answers. » (V. Bush, Chapitre III, version numérique html proposée par la NSF – numéros de page non disponible).

Ainsi, la recherche fondamentale doit être exempte de tout objectif applicatif et se focaliser uniquement sur les lois de la nature pour permettre de fournir les réponses à des problèmes pratiques qui seront traités par la recherche appliquée. Dès lors, il devient crucial de financer et d'investir dans ce type de recherche. Mais Bush ne conduit pas d'effort spécifique pour expliciter les hypothèses sous-jacentes de son modèle qui permettrait de définir une performance pour la production de connaissances scientifiques nouvelles. Il expose cependant les mécanismes des découvertes scientifiques dans la recherche fondamentale à partir d'une analyse fondée sur une logique statistique :

« One of the peculiarities of basic science is the variety of paths which lead to productive advance. Many of the most important discoveries have come as a result of experiments undertaken with very different purposes in mind. Statistically it is certain that important and highly useful discoveries will result from some fraction of the undertakings in basic science; but the results of any one particular investigation cannot be predicted with accuracy. » (V. Bush, Chapitre III, version numérique html proposée par la NSF – numéros de page non disponible).

Ainsi, dans ce passage, V. Bush montre que l'intérêt de la recherche fondamentale résiderait dans son idiosyncrasie et sa non-prédictibilité : les grandes découvertes proviendraient d'objectifs de recherche non

prescriptibles en amont, par opposition à une science dirigée. On entend ici en écho la notion de sérendipité. Bush insiste d'ailleurs dès le sommaire exécutif sur la liberté d'exploration (ie. « *Freedom of inquiry must be preserved* ») qui doit être laissée aux chercheurs :

« As long as they [colleges, universities, and research institutes] are vigorous and healthy and their scientists are free to pursue the truth wherever it may lead, there will be a flow of new scientific knowledge to those who can apply it to practical problems in Government, in industry, or elsewhere. » (V. Bush, Executive Summary, version numérique html proposée par la NSF – numéros de page non disponible).

Dès lors, c'est bien les universités et les centres de recherche publics qui ont l'apanage de la recherche fondamentale puisqu'assurant par nature la liberté d'exploration du chercheur, contrairement à la recherche industrielle qui se veut nécessairement résolutoire :

« Generally speaking, the scientific agencies of Government are not so concerned with immediate practical objectives as are the laboratories of industry nor, on the other hand, are they as free to explore any natural phenomena without regard to possible economic applications as are the educational and private research institutions. » (V. Bush, Chapitre III, version numérique html proposée par la NSF – numéros de page non disponible).

Ainsi, pour V. Bush, le progrès scientifique en temps de paix ne peut pas être dirigé par une entité externe comme ce fut le cas pendant la Guerre sur le projet Manhattan, comme il l'indique dans le passage suivant :

« Many of the lessons learned in the war-time application of science under Government can be profitably applied in peace. The Government is peculiarly fitted to perform certain functions, such as the coordination and support of broad programs on problems of great national importance. But we must proceed with caution in carrying over the methods which work in wartime to the very different conditions of peace. We must remove the rigid controls which we have had to impose, and recover freedom of inquiry and that healthy competitive scientific spirit so necessary for expansion of the frontiers of scientific knowledge. » (V. Bush, Executive Summary, version numérique html proposée par la NSF – numéros de page non disponible).

2.2. Recherche industrielle : l'entreprise peut-elle (encore) contribuer de façon féconde à la science ?

Si, comme nous l'avons montré, les politiques centrées sur le transfert placent les entreprises comme « demandeuses » de connaissances scientifiques, elles semblent paradoxalement apparaître comme un lieu clé de production de connaissances scientifiques. Nous explorons ici les enjeux et débats sur la conduite d'activités scientifiques dans le contexte industriel : l'objectif est d'en tirer des enseignements pour conceptualiser d'autres modèles de couplages science – industrie.

Commençons par un détour historique : pour Buderer (2000), c'est à partir des années 1870' que se développent les premiers laboratoires de recherche industrielle dans l'industrie chimique. À cette époque les industriels allemands décident de ne plus être dépendants des chimistes des *Technische Hochschulen*, à qui les industriels tels que BASF ou Höchst fournissent de «

generous consulting feed, providing the legal support necessary to patent and defend an invention, and paying royalties on any inventions » (Buderi, 2000, p. 53). Alors qu'il ne devient plus possible de copier les procédés chimiques de concurrents²¹, les industriels leaders de la chimie s'engagent dans une course pour recruter un très grand nombre de jeunes docteurs. BASF constituera l'un des premiers laboratoires de recherche à grande échelle : la structure qui démarra avec la synthèse de l'indigo perdurera pendant 17 ans et déposera 152 demandes de brevets (Buderi, 2000). Autre exemple chez Bayer où Carl Duisberg développe une nouvelle division de recherche interne dans laquelle il met en place des séminaires de présentation de recherche similaire à ceux des universités pour favoriser les collaborations entre les scientifiques du centre de R&D, un programme de mobilité des chercheurs dans différentes usines de l'entreprise pour comprendre les processus de production et leurs besoins associés, des incitations à breveter. Il développera également un laboratoire à Elberfeld en 1889 avec les machines les plus innovantes de son temps, sur un format ouvert, là encore inspiré des laboratoires universitaires, pour faciliter la diffusion dans l'entreprise des découvertes scientifiques. À partir de l'exemple allemand, la vague de création de laboratoires de recherche industrielle va s'étendre dans l'ensemble des pays développés. En 1900, les États-Unis comptent 39 laboratoires industriels (Buderi, 2000, p. 66) : dès 1876 à la Pennsylvania Railroad, puis en 1900 chez General Electric, en 1907 chez AT&T (Le Masson and Weil, 2016). En 1912, alors que Kodak est fortement dépendant de fournisseurs allemands, George Eastman visite le laboratoire Bayer et rencontre Carl Duisberg. À son retour, il embauche C.E. Kenneth Mees, un éminent chimiste, qui sera nommé vice-président chargé de la R&D pour Eastman-Kodak jusqu'en 1955, et en charge du premier laboratoire de l'entreprise. En 1932, Irving Langmuir, est le premier chercheur américain dans un laboratoire industriel, à General Electric, à recevoir le Prix Nobel. Or le laboratoire de General Electric, qualifié de *House of Magic* par la Presse de l'époque, a notamment inventé le rayon X, la radio, les émissions d'électron par les filaments ou le plasma : autant d'inventions qui nécessitent le développement et l'intégration de connaissances scientifiques clés (Buderi, 2000). Ce phénomène se produit également en France, on l'on pourrait évoquer le cas de Dion-Bouton, entreprise de production automobile qui fonde dès 1897, son laboratoire de recherche (Le Masson and Weil, 2016).

Ce rapide détour historique sur l'émergence des laboratoires de recherche industrielle nous permet d'établir que l'entreprise est un lieu privilégié de la production de connaissances

²¹ En particulier, la loi sur l'unification des droits de propriété intellectuelle en Allemagne de 1977 va permettre la mise en place d'un cadre favorable à l'essor de ces laboratoires de recherche d'un genre nouveau.

scientifiques nouvelles (Arora, Belenzon et Pataconi, 2018 ; Pisano, 2010 ; Rosenberg, 1990 ; Zahra, Kaul et Bolívar-Ramos, 2018). En particulier, nous évoquons ici les laboratoires de *corporate science* que nous pouvons définir en nous appuyant sur la définition de Zahra et al. (2018):

“We define corporate science as business companies’ funded officially sanctioned and supported, discovery-driven research aimed at developing basic new knowledge. [...] Corporate sciences focuses primarily on basic research, aiming to develop fundamentally new knowledge and addressing long-term research questions that may not have immediate commercial applications.” (Zahra, Kaul et Bolívar-Ramos, 2018, p. 157)

Bien sûr, les entreprises se sont massivement désengagées de la recherche fondamentale depuis les années 1980 (nous y reviendrons), mais elles semblent posséder des ressources uniques pour générer des connaissances scientifiques nouvelles (Mansfield, 1995). Les exemples sont nombreux en particulier dans les années 1960’ - 1970’, souvent considérées comme un âge d’or de la recherche industrielle (Gertner, 2012). Comme rappelé par Arora et al. (2019) :

« DuPont’s central R&D unit, a pioneer in polymer chemistry, published more articles in the Journal of American Chemical Society than MIT and Caltech combined in the 1960s. AT&Ts Bell Labs, home to the transistor and information theory, boasted 14 Nobel Prize winners and five Turing Award recipients among its alumni”. (Arora et al., 2019, p. 6)

Au niveau global, aujourd’hui les entreprises conduisent une part encore importante de la recherche fondamentale (Arora, Belenzon et Pataconi, 2018 ; Gambardella, 1992 ; Pisano, 2010). Aux États-Unis où la comptabilité permet de distinguer les investissements des entreprises entre recherche fondamentale, recherche appliquée et développement, il apparaît que les entreprises réalisent 28.8% des investissements totaux en recherche fondamentale²². Des études récentes montrent notamment que la recherche fondamentale en IA par exemple, est particulièrement pilotée par des industriels (Hartmann et Henkel, 2020). Citons le cas de AlphaGO en 2016, programme développé par Alphabet Inc’s Google et qui a battu le grand maître Lee Sedol au jeu de Go (pourtant huit fois champion du monde) et réputé un défi

²² Données National Science Foundations 2020 - <https://ncses.nsf.gov/pubs/nsb20201/u-s-r-d-performance-and-funding>

scientifique majeur (Hartmann et Henkel, 2020, p. 359), ou encore le cas AlphaFold sur le repliement des protéines²³.

Que nous apprennent ces éléments sur les couplages science – industrie ? D’abord, à l’instar du découpage institutionnel inhérent au modèle linéaire, **les entreprises sont indéniablement un lieu de production de connaissances scientifiques, et donc de conduite d’activités de recherche scientifique.** D’autre part, **il semble qu’il puisse parfois exister une forme particulière de couplage au sein de l’entreprise, où activités de recherche scientifique et activités de développement semblent parfois pouvoir s’auto-alimenter.** Le cas Bell Laboratories semble emblématique : alors que certains des scientifiques de l’entreprise sont des récipiendaires du Prix Nobel par exemple pour avoir contribué à l’explication du big bang par l’exploration des ondes cosmiques, l’entreprise développe notamment en parallèle le transistor, le laser et la télévision (Gertner, 2012 ; Lipartito, 2009). Pourtant, bien que la recherche industrielle soit responsable d’une part importante de la recherche fondamentale et que des succès (y compris récents comme dans le cas de l’IA) puissent être identifiés, elle souffre d’une déconsidération importante depuis les années 1990’, à de rares exceptions près. **Comment décrire cette évolution et que nous apprennent-elles sur les couplages science – industrie ?**

Premièrement, les acteurs majeurs de la recherche industrielle comme IBM, DuPont ou AT&T Bell Laboratories se désengagent fortement de cette activité à partir du début des années 1990’. Par exemple, en 1990 AT&T diminue ses dépenses de R&D de 8% (Gertner, 2012), en 1991 des coupes budgétaires majeures sont réalisées dans la R&D de General Electric, en 1992 Arno Penzia alors directeur de la R&D de IBM coupe un tiers des dépenses (Buderi, 2000). Comme l’indique Buderi (2000) : *“The dark days lingered for years – as the research bloodbath in many ways spurred by the big early-1990s upheavals at Bell Labs and IBM rolled around the world”* (Buderi, 2000, p. 30). Pour Buderi (2000), trois facteurs influencent cette diminution marquée de l’investissement en recherche fondamentale : le démantèlement des grands monopoles américains et la réduction de leurs marges qui ne permet plus de financer la recherche amont (voir les cas Kodak, IBM, GE, AT&T), l’augmentation drastique de la production scientifique mondiale qui laisse penser que les solutions peuvent être trouvées auprès des OPR (naissance du « *Proudly Invented Elsewhere* »), et enfin les succès de firmes qui n’investissent pas en R&D comme Compaq ou Dell. Notons que l’accent mis sur l’absorption

²³Voir notamment : <https://deepmind.com/blog/article/alphafold-a-solution-to-a-50-year-old-grand-challenge-in-biology>

des connaissances scientifiques (et donc l'importance renouvelée du transfert de technologie avec les OPR – voir ci-dessus) peut être observé au travers de nombreux articles des journaux destinés aux praticiens de la R&D aux titres évocateurs : « Is the Central R&D Lab Obsolete? » (2001) ou « Does Corporate Research Still Matter? » (2015) dans la *MIT Technology Review*, « Corporate Labs Disappear. Academia Step In » (2007) dans le *New York Times*, ou encore « The rise and fall of corporate R&D: Out of the dusty labs » dans *The Economist* en 2007. Ainsi, **le modèle de couplage science – industrie où les activités de recherche scientifique et de développement semblent s'auto-alimenter semble s'éroder du fait d'un désinvestissement marqué des entreprises dans les activités scientifiques.**

Deuxièmement, depuis les années 1980 les dépôts de brevet des industriels ont fortement augmenté et les stratégies de protection et de valorisation de la propriété intellectuelle sont devenues plus prégnantes (Bhaskarabhatla et Hegde, 2014a ; Laursen et Salter, 2014 ; Pisano, 2010). Par exemple, Bhaskarabhatla and Hegde (2014) montrent que IBM a mis en place à partir de 1989 une politique interne favorable au dépôt de brevet qui a conduit à une augmentation à la fois des dépôts et des accords de licences, mais aussi à une diminution de la diffusion des connaissances au sein de l'industrie, mouvement observable dans d'autres grands groupes technologiques. On observe en parallèle un développement accru du recours au secret (Blumenthal *et al.*, 1996), comportement devenant une norme aujourd'hui dans certaines organisations, par exemple chez Tesla²⁴. Couplées aux coupes budgétaires opérées sur la recherche fondamentale, nous pouvons observer en parallèle une chute massive des contributions de l'industrie à la « science ouverte » par le biais des publications scientifiques (Arora, Belenzon et Pataconi, 2018 ; Tijssen, 2004). Les analyses de Arora et al. (2018) sur la recherche industrielle sur la période 1980 – 2007 aux États-Unis permettent de qualifier ces évolutions. La Figure 3 ci-dessous extraite de leurs travaux permet de décrire la chute massive des publications scientifiques des industriels aux États-Unis (ie. papier scientifique avec au moins un auteur affilié à un industriel), par rapport à l'augmentation annuelle des dépôts de brevet²⁵.

²⁴ « Le plaidoyer anti-brevets d'Elon Musk, le patron de Tesla », Le Monde, ed. 13/06/2014.

²⁵ La figure présente une moyenne par an pour les entreprises US avec des dépenses de R&D positives, l'intensité de R&D correspond à la part des investissements par rapport au chiffre d'affaires

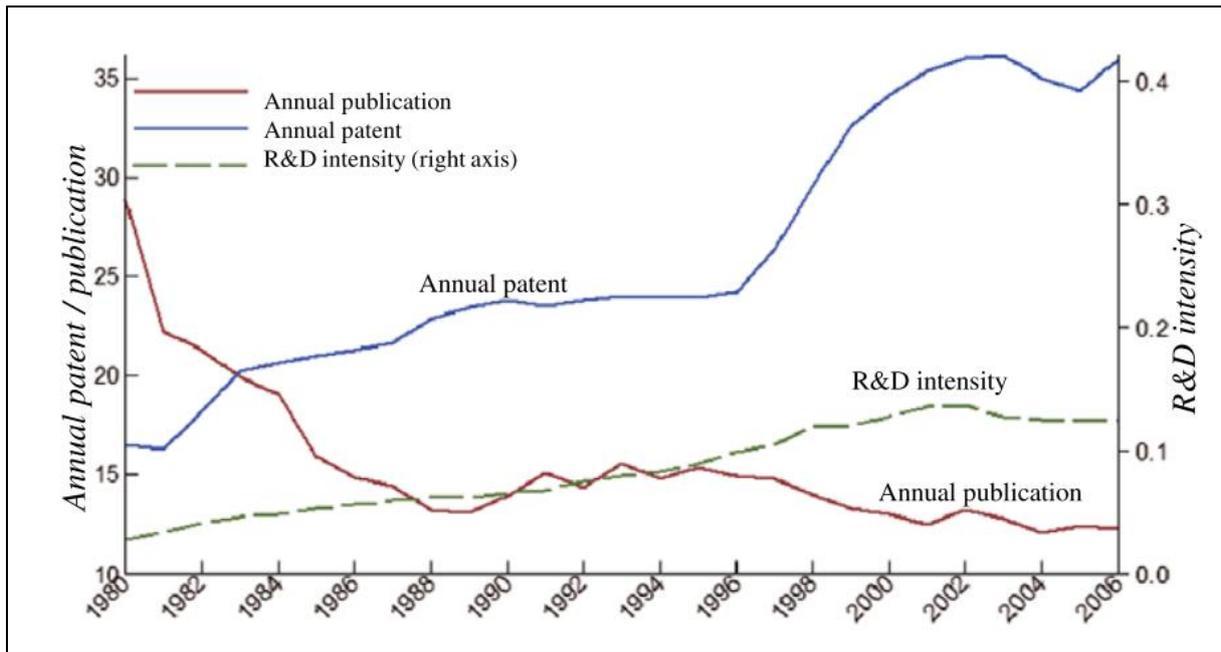


Figure 3 - Évolution des dépôts de brevet, intensité de R&D et publications scientifiques par les industriels

Par ailleurs, Arora & al. (2018) soulignent que la chute des publications scientifiques industrielles est brutale en particulier pour les publications de haut niveau. Tijssen (2004) dans une étude sur la même thématique montrait également que les publications sans collaboration avec des scientifiques des OPR étaient les plus impactées par cette baisse (ie. uniquement auteurs affiliés à l'industrie). **Si la productivité des activités de développement semble s'être accrue dans les entreprises depuis les années 1980', tandis que les efforts de recherche ont diminué, cela pourrait signifier que le modèle de couplage dominant a probablement évolué au profit d'un modèle davantage tourné vers l'absorption de connaissances scientifiques pour la gestion de problèmes industriels locaux, et que l'on pourrait qualifier de science résolutoire** (Le Masson, 2020 ; Le Masson et Weil, 2016). Or, les problèmes circonscrits ne permettent pas d'explorer l'inconnu et de répondre aux enjeux de la rupture scientifique (Sieg, Wallin et Von Krogh, 2019).

Troisièmement, soulignons les difficultés de pilotage de la recherche industrielle afin de favoriser des découvertes qui soient commercialisables et qui puissent permettre de proposer des produits innovants. Comme le rappellent Zahra et al. (2018), le sujet de la recherche industrielle a suscité très peu d'intérêt en sciences de gestion ces dernières années (on peut aussi y voir une forme de performativité du modèle linéaire qui supposerait que la recherche fondamentale n'est que l'apanage des OPR), et nous manquons d'études sur le sujet du pilotage et l'exploitation des résultats de la recherche industrielle. En particulier, l'hypothèse que les

découvertes scientifiques de la recherche industrielle conduisent de manière routinière à des produits innovants semble peu robuste (Zahra, Kaul et Bolívar-Ramos, 2018). Seule une très faible fraction des produits innovants sortis par les industriels seraient issus des découvertes scientifiques en interne (Markham et Lee, 2013) et une majorité des découvertes seraient inexploitées (Ganco, 2013 ; Markham et Lee, 2013 ; Penders, Verbakel et Nelis, 2009). Ainsi, la recherche industrielle constituerait surtout une voie permettant d’assimiler plus facilement des connaissances développées par des OPR (Gambardella, 1992), voire simplement d’identifier des partenaires de recherche (Cohen, Nelson et Walsh, 2002). À ce jour, les recherches sur les spécificités des découvertes scientifiques réalisées dans l’industrie, leurs interactions avec les divisions chargées des produits, le management de ces projets (par différence avec un projet d’innovation classique) semblent limitées. **Étonnement, la façon d’organiser des couplages science – industrie féconds dans le cadre d’une même entreprise semble être un sujet relativement peu discuté dans la littérature récente en sciences de gestion.** D’ailleurs, la revue *Administrative Science Quarterly* y consacre le troisième numéro de son histoire, en 1956, qui soulignent déjà ces difficultés managériales : « Probably no other branch of industrial activity causes as much managerial unrest and uncertainty as does research and development » (Shepard, 1956, p. 295). Depuis lors, le sujet semble tombé en désuétude comme le souligne (Zahra, Kaul et Bolívar-Ramos, 2018).

Que nous apprend ce débat sur les couplages science – industrie ? Nous avons montré que l’entreprise peut être un lieu clé de la production de connaissance scientifique, avec parfois (et notamment dans des cas historiques) des formes de couplages originales et intrigantes où activités de recherche scientifiques et activités de développement semblent s’entremêler. Toutefois, les spécificités de ces couplages ne semblent pas avoir été particulièrement explorées dans la littérature récente et les évolutions contemporaines de la recherche industrielle ont conduit au développement d’une *science résolutoire*, davantage tournée vers le soutien au développement et la résolution de problèmes locaux, avec une contribution scientifique moindre. Ces éléments nous conduisent à proposer le paradoxe suivant :

Paradoxe N°2 : Des exemples historiques permettent de montrer que l'entreprise semble être un lieu clé permettant des approches scientifiques nouvelles et originales, avec des formes de couplages avec les activités de développement parfois intrigantes. Pourtant, les difficultés de pilotage de ces modèles et le désinvestissement des entreprises dans la recherche ont conduit à l'émergence d'une « science résolutoire », qui favorise principalement la productivité des activités de développement, mais conduit à des activités de recherche peu féconde, et uniquement au service de l'amélioration de produits, procédés ou services nouveaux.

Après avoir discuté l'émergence de deux modèles de couplages traditionnels (hérité du modèle linéaire ou relevant de la science résolutoire), nous pouvons discuter les cas où l'on cherche à rapprocher entreprises et OPR : la recherche partenariale.

2.3. Recherche partenariale : comment l'organiser et la piloter ?

Pour quels résultats ?

La recherche partenariale entre Organismes Publics de Recherche (OPR) et entreprises constitue aujourd'hui une caractéristique clé des relations entretenues entre ces deux types d'institutions. Afin de mieux comprendre les couplages possibles entre science et industrie, nous revenons ici sur l'intensité de ces collaborations, leurs formes et les efforts menés par les décideurs publics pour les promouvoir. Nous expliciterons dans un second temps les résultats limités de ces collaborations et les difficultés posées par leur management, et reviendrons sur ce qu'elles nous apprennent des possibilités de couplage.

La recherche partenariale est considérée par les décideurs publics comme un vecteur de croissance économique, qui facilite la co-création de savoirs nouveaux directement intégrables dans les entreprises (Cour des Comptes, 2018a ; OCDE, 2013). Ce mécanisme permet de répondre à un double défi. D'un côté, pour les entreprises, l'accélération de la compétition mondiale et le dynamisme de l'innovation nécessitent d'accéder plus rapidement à des connaissances scientifiques nouvelles pour inventer des produits ou des services nouveaux, d'autant que « *la recherche est devenue trop coûteuse, trop compliquée et trop incertaine pour qu'on la mène seul* » (FutuRIS, 2016, p. 7). D'un autre côté, pour les OPR, le contexte de restriction budgétaire et la diminution des financements étatiques les amènent à identifier de nouvelles sources de financements compatibles avec leurs missions de recherche. Sur cette base, de nombreux mécanismes ont été développés pour faciliter les collaborations (au-delà d'accords bilatéraux que peuvent passer les Universités et Écoles avec des partenaires

industriels) suite aux nombreux rapports d'expertise qui en ont fait une priorité, à l'instar du transfert. Dans le cas français, citons par exemple le rapport Alain Juppé et Michel Rocard de 2009 qui donnera lieu au Programme d'Investissement d'Avenir (PIA), ou le Rapport Suzanne Berger de 2016 sur la valorisation qui appelait à augmenter fortement, par tous les moyens possibles, les contacts entre industriels et OPR, et ce au-delà de la simple volonté de favoriser transfert de technologie (Berger, Dorman et Starbuck, 2016). Le PIA de 2009 prévoyait d'ailleurs de conférer davantage de moyens à la recherche partenariale en débloquant 1,9 milliard d'euros de crédits sur 10 ans pour la recherche partenariale (Cour des Comptes, 2018b). Ces crédits étaient principalement dédiés à la création de huit Instituts de Recherche Technologique (IRT) et à un financement additionnel des Instituts Carnot : deux moyens de favoriser la recherche partenariale en France. Les Instituts Carnot créés en 2006 sont des laboratoires préexistants dans des OPR qui reçoivent une labélisation et des financements publics pour réaliser un plan à 5 ans et centrés sur la création ou le renforcement de partenariats de recherche avec des industriels (voir Encadré 2). À l'inverse, les IRT, créés en 2009, sont des laboratoires établis de façon ad hoc qui permettent d'adosser non pas une, mais plusieurs entreprises à un OPR à des fins de recherche partenariale (le dispositif visant notamment à compléter les laboratoires mixtes CNRS – entreprise qui sont le plus souvent bilatéraux) avec une gouvernance mixte (voir Tableau 3). Il est d'ailleurs intéressant de noter que la création des IRT ou des Carnot s'inscrit en parallèle d'initiatives (parfois anciennes) dans d'autres pays : Fraunhofer en Allemagne, Catapult au Royaume-Uni, instituts Manufacturing USA aux États-Unis.

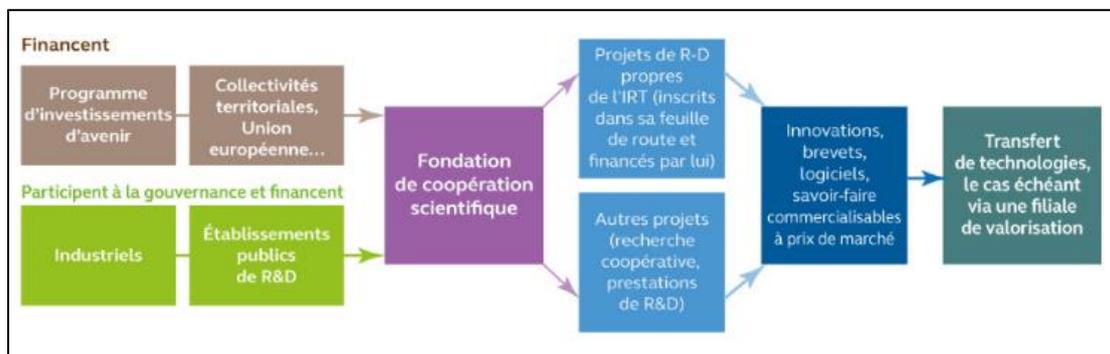


Tableau 3 - Fonctionnement des IRT (source : Cour des Comptes)

Encadré 2 - Les instituts Carnot

Les instituts Carnot sont des laboratoires qui reçoivent un label par le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, pour une durée de 5 ans et adossés à des fonds publics pour favoriser la recherche partenariale. Créés en 2006 en s'inspirant des Fraunhofer allemands, les instituts Carnot se définissent comme tels :

« Les Carnot sont des structures de recherche publique, labélisées par le ministère de la recherche, qui prennent des engagements forts pour mener et développer une activité de recherche partenariale au bénéfice de l'innovation des entreprises – de la PME au grand groupe – et des acteurs socioéconomiques. » (site des instituts Carnot, consulté le 15/01/2021).

Aujourd'hui, les Carnot représentent une part importante de la recherche partenariale française :

« Les instituts Carnot réunissent aujourd'hui 20% des moyens humains de la recherche publique française et également 55% des contrats de R&D externalisés par les entreprises de la recherche publique » (site des instituts Carnot, consulté le 15/01/2021).

Lors de leur labélisation, les instituts Carnot prennent des engagements à moyen terme en matière de croissance de leurs activités partenariales, ressourcement scientifique, objectifs de professionnalisation et de mutualisation. En contrepartie, ils reçoivent un abondement de l'ANR pour financer ces activités.

En 2016, les instituts Carnot revendiquaient avoir créé des partenariats avec 2,000 entreprises dont 900 PME et conduit à plus de 20 000 publications de rang A (FutuRIS, 2016).

Si les décideurs politiques mettent des moyens à disposition de la recherche partenariale, évoquons brièvement quelques succès français récents : le développement d'un procédé de production d'anticorps contre le cancer par un partenariat entre l'Institut Français de la Santé et de la Recherche Médicale (INSERM) et Innate Pharma (FutuRIS, 2016), ou encore pendant la crise du Covid-19, les travaux de recherche partenariale conduits par le CEA et Michelin pour concevoir des masques réutilisables et produits par la société Ouvry²⁶. Plus largement, soulignons que la corrélation entre l'intensité de la collaboration avec des OPR et la performance économique de l'entreprise a été démontrée à de nombreuses reprises dans la recherche en sciences de gestion. Par exemple, Cockburn et Henderson (1998) montrent que les connexions entretenues par les industriels dans l'industrie avec les scientifiques des OPR (mesurées par les publications co-écrites) sont corrélées au nombre de médicaments nouveaux découverts. Zucker, Darby et Armstrong (2002) montrent que les connexions des industriels avec des scientifiques « stars » dans des OPR entretiennent une corrélation positive avec les capacités d'innovations et les performances financières des entreprises dans le secteur des

²⁶ « Ouvry va fabriquer 5 millions de masques réutilisables conçus par Michelin et le CEA », Les Echos, ed. 16/04/2020

biotechnologies. Owen-Smith et Powell (2004) démontrent que la proximité géographique et la densité des collaborations de recherche entre OPR et industriels favorisent le transfert de connaissance en lien avec les capacités d'innovation des entreprises. Lacetera (2009) explique pour sa part en quoi la répartition des risques dans les collaborations OPR – Industrie et le contrôle par les pairs pour les chercheurs des OPR, favorisent les performances d'innovation pour les industriels impliqués dans de telles collaborations. Baba, Shichijo et Sedita (2009) en prenant l'exemple de 455 entreprises dans les domaines de la photo-catalyse au Japon, montrent qu'un accroissement des collaborations avec OPR accroît significativement la productivité de la R&D des entreprises. Enfin, et en adoptant une perspective davantage macro-économique et en prenant l'exemple allemand, Comin *et al.* (2018) montrent que +1% d'augmentation de financement publics dans les Fraunhofer-Gesellschaft conduit à +1% d'augmentation de croissance économique et +0,7% d'accroissement de la productivité générale des facteurs. Ainsi, le lien entre recherche partenariale et innovation semble largement démontré. On constate donc que **la recherche partenariale, qui semble présentée comme un type de couplage science – industrie particulier, a été particulièrement promue par les pouvoirs publics en s'appuyant sur des dispositifs spécifiques, et contribue notamment positivement aux résultats des activités de développement.**

Néanmoins, soulignons que derrière ce terme de recherche partenariale, se cache une réalité multiple et qu'il est difficile de mesurer les performances de ces collaborations, notamment en termes de retombées scientifiques. Dans *l'État de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'innovation en France* de 2020, le Ministère de l'Enseignement Supérieure, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI, 2020, p. 78) considère que ces collaborations peuvent prendre trois formes distinctes : la *recherche contractuelle* pour laquelle une entreprise finance des travaux de R&D auprès d'un OPR sans participer à la réalisation de ces travaux ; la *recherche collaborative*, pour laquelle une entreprise s'associe avec un OPR pour mener un projet de R&D conjoint dont les coûts et les risques sont partagés ; les *travaux de consultance* qui prennent la forme d'avis d'experts, en étant souvent mandatés et rémunérés directement par l'entreprise. D'autres études envisagent même une plus grande variété d'interactions comme Cohen, Nelson et Walsh (2002) ou D'Este et Perkmann (2011), mais force est de constater que l'intensité des échanges entre OPR et industriels que requièrent ces différents types de collaborations varie très fortement. On peut imaginer sans difficulté que la recherche contractuelle peut impliquer des échanges très limités entre les parties prenantes avec l'émission d'un rapport final par le laboratoire public pour l'industriel, quand la recherche collaborative nécessite un partage de connaissances entre les parties et des efforts de co-explorations

(Segrestin, 2005), de construction de plateformes cognitives communes (Créplet, Kern et Schaeffer, 2007). Malheureusement, les statistiques publiques ne permettent pas de distinguer entre ces différents types de recherche et les indicateurs utilisés portent sur les collaborations en général : part des financements des OPR par les entreprises, co-publications de brevets ou de publications scientifiques, part des entreprises faisant appel à des OPR dans leur processus de R&D. Ainsi, le MESRI rappelle, en s'appuyant sur les données de l'OCDE, que la part des financements privés dans le total des financements des OPR apparaît aujourd'hui faible en comparaison avec nos voisins européens : 5,2% en 2015 contre 12,7% en Allemagne et 7,0% en moyenne de l'Union Européenne (MESRI, 2020, p. 78)²⁷. En s'appuyant sur les derniers chiffres de l'enquête communautaire CIS dans l'Union Européenne, le MESRI indique que 17% seulement des entreprises innovantes en France font appel à des collaborations avec des OPR (avec des disparités notables en fonction de leur taille puisque 40% des grands groupes s'appuyaient en 2016 sur des OPR pour leurs activités d'innovation). Ainsi, bien que les efforts soient importants, une faible part des financements des OPR provient des industriels et la grande majorité des entreprises n'interagit pas avec les OPR. Le MESRI conclut d'ailleurs : « *la recherche partenariale apparaît relativement peu développée en France* » (MESRI, 2020, p. 78). **La recherche partenariale relève de couplages particulièrement hétérogènes, qui tendent à nous ramener à des régimes soit plutôt hérités du modèle linéaire, soit plutôt orientés vers la science résolutoire. Malgré les efforts des décideurs publics, la recherche partenariale représente en volume, une faible part des activités de recherche scientifique et de développement.**

Ainsi, nous avons pu faire le lien entre recherche partenariale et performances des entreprises, et nous sommes également revenu sur l'ampleur limitée de ces collaborations. Mais plus précisément, quels sont les attendus de ces collaborations et comment les piloter ? David et Dasgupta (1994) par exemple, indiquent que l'objectif principal des OPR est de produire des connaissances scientifiques nouvelles, tandis que celui des entreprises est de capturer la valeur des connaissances scientifiques afin de favoriser leur avantage compétitif, rendant par nature les collaborations difficiles. L'étude FutuRIS de 2015 qui a interrogé 27 responsables d'entreprises et de laboratoires de recherche publics en France permet d'aller un cran plus loin dans l'élucidation de ces objectifs et permet de démontrer les découplages existants. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4 ci-dessous.

²⁷ Notons que le chiffre est plus faible aux États-Unis avec 3,8% seulement (notamment, car l'État fédéral ne peut pas faire financer d'activités de recherche par des entreprises).

OPR	Entreprises
Accéder à de nouveaux moyens financiers, techniques et des compétences humaines	Accéder à de nouveaux moyens financiers, techniques et des compétences humaines
Insérer professionnellement des doctorants et développer des débouchés pour les chercheurs	Développer des projets de recherche à moindre coût et partager les risques
Pousser plus loin le développement des projets et activités de recherche	Ne pas se laisser surprendre ou tirer profit d'une technologie de rupture
Lancer une start-up	Conforter son avance technologique
Renouveler les thèmes de recherche	Saisir les opportunités de croissance et rivaliser avec les concurrents mondiaux
Favoriser la reconnaissance et la notoriété de l'établissement	Garantir au chercheur du milieu privé une recherche du meilleur niveau
	Former et faire des recrutements de bonne qualité
	Démontrer la capacité des entreprises à s'intégrer et à développer l'écosystème de recherche français

Tableau 4 - Objectifs de la recherche partenariale (source FutuRIS)

On peut constater ici la grande variété des objectifs de recherche avec parfois des enjeux qui paraissent contradictoires. Alors que l'OPR chercherait à accéder à de nouveaux moyens financiers, techniques et des compétences humaines, que penser d'un industriel qui souhaiterait par exemple utiliser le partenariat comme un vecteur de recrutement uniquement ? La pluralité des objectifs implique des difficultés notables dans le management de la recherche partenariale, parfois qualifiées de « barrières » (Bruneel, D'Este et Salter, 2010). Dans le cas des IRT par exemple, le rapport de la Cour des Comptes de 2018 souligne que les objectifs en termes de production scientifique, de formation, de valorisation sont tellement variés qu'il est particulièrement difficile d'évaluer les performances de ces instituts. Ainsi, malgré le grand nombre de vecteurs de collaborations qui pourrait laisser penser qu'il existe une forme de collaboration adaptée à chaque besoin entre les industriels et les OPR (conventions CIFRE, chaires, mobilité des chercheurs, consortiums, IRT, laboratoires mixtes, etc.), des difficultés persistent et se cristallisent notamment sur la partie contractuelle. Les conflits de propriété intellectuelle sont souvent cités comme l'une des difficultés majeures de ces relations (Bruneel, D'Este et Salter, 2010), et constituent un révélateur à la fois d'attentes potentiellement différentes entre les acteurs, mais aussi de la complexité du système de collaboration et des rapports de force entre les institutions. Comme indiqué dans le rapport FutuRIS :

« Il n'est pas simple de trouver un terrain d'entente entre les deux structures partenaires sur les questions de propriété intellectuelle et d'exploitation industrielle. Nombre d'entreprises considèrent en effet que les règles d'attribution de la propriété intellectuelle sont génératrices de lourdeurs administratives et d'allongement des délais de négociation. » (FutuRIS, 2016, p. 67)

Enfin, il est également intéressant de noter que les objectifs des OPR sont partagés entre des objectifs scientifiques (ie. renouveler les thèmes de recherche, accéder à des moyens techniques et des compétences humaines, pousser plus loin le développement de projets) et des objectifs de valorisation (ie. insérer des doctorants, développer des start-up). Or, les moyens managériaux pour favoriser des retombées scientifiques positives sont particulièrement peu discutés. À l'inverse, et en écho avec les dérives potentielles des activités de recherche industrielle dans le paradoxe N°2, on retrouve des réminiscences de la prise de distance avec les industriels comme l'indique cet extrait d'une citation d'un dirigeant de la R&D chez Essilor International :

« Nous rencontrons encore trop régulièrement des chercheurs qui pensent que collaborer avec le privé revient à faire un pacte avec le diable. J'ai encore en tête l'exemple d'un excellent professeur, freiné dans son évolution pour avoir trop encadré de thèses industrielles dans son laboratoire. Par chance, cela arrive moins souvent et les mentalités peu à peu. » (FutuRIS, 2016, p. 67)

Ces éléments nous rappellent la crainte qu'un trop grand rapprochement conduise à des dérives et un enfermement du chercheur dans des voies de recherche peu fécondes. En particulier, certains auteurs supposent que la recherche industrielle est menée uniquement dans une logique de maximisation du profit, dans un paradigme néolibéral (voir par exemple l'ouvrage de Mirowski, *Science-Mart: Privatizing American Science* 2011). De ce fait, elle conduirait à des comportements conscients ou inconscients qui contribuent à la baisse de la qualité des recherches ainsi menées (Slaughter, 1993 ; Slaughter et Campbell, 2002). D'une part, la conduite de la recherche fondamentale en se focalisant sur de potentielles applications peut réduire la capacité du chercheur à réaliser une percée scientifique, ce qui est d'ailleurs le principal argument repris pour favoriser une science libre de toute contingence industrielle. Nous sommes abondamment revenus sur cette hypothèse dans le débat précédent et comme le rappellent les rédacteurs du Rapport des Etats Généraux de la Recherche de 2004 en France :

« La science ne peut fonctionner qu'en élaborant elle-même ses propres questions, à l'abri de l'urgence et de la déformation inhérente aux contingences économiques et sociales » (Rapport des états généraux de la recherche, 2004, p. 14).

D'autre part, des phénomènes plus pernicious peuvent être à l'œuvre. Tout d'abord, et cas le plus étonnant, le biais de la recherche industrielle peut être inconscient pour le scientifique dans le cas de stratégies dites de « détournement ». Citons par exemple le cas de la recherche autour de l'industrie du tabac en suivant l'analyse de Le Masson et Weil (2021) à partir des travaux de Proctor et Girel (2014) – voir Encadré 3. Les auteurs démontrent comment l'industrie du tabac a pu financer dès les années 1950 des travaux de recherche tout à fait rigoureux et publiés dans les meilleures revues académiques, afin de saturer l'espace scientifique et en orientant les financements sur des questions de recherche particulières, mais sans jamais traiter celle du lien de cause à effet entre consommation de tabac et santé humaine, et sans recourir à des études épidémiologiques. On retrouve des logiques similaires sur les travaux de recherche sur le Bisphenol A et certains insecticides par exemple²⁸. Bien sûr, d'autre part, nous ne pouvons ignorer qu'il existe également des exemples où les travaux menés par la recherche industrielle sont complètement fallacieux, avec par exemple l'usage de données intentionnellement fausses. Citons par exemple le cas de l'étude sur hydroxychloroquine parue dans la prestigieuse revue de médecine *The Lancet* en juin 2020, en pleine pandémie de Covid-19, et retirée à la suite de l'annonce de données faussées. En effet, l'un des co-auteurs, fondateur de la société Surgisphère avait créé de toute pièce le jeu de données afin de pouvoir promouvoir hydroxychloroquine. Plusieurs cas célèbres ont été documentés et analysés notamment par Oreskes et Conway (2010) dans leurs ouvrages *Merchants of Doubt*. Ils démontrent comment plusieurs scientifiques de renom ont fallacieusement alimenté des controverses scientifiques, aux confins d'enjeux industriels et socio-économiques, sur des sujets clés de société : lien de causalité entre tabac et cancer, utilisation de certains produits chimiques et pluies acides, effets des énergies fossiles sur le réchauffement climatique. Nous pourrions évoquer d'autres cas récents où les industriels ont contribué à maintenir le doute quant à la dangerosité de leurs produits : utilisation du bisphénol A dans les plastiques, ou le rôle des insecticides dans la disparition des abeilles, voire à dénigrer certains scientifiques pour dénigrer leurs résultats comme dans le cas du glyphosate (voir notamment le documentaire « *La fabrique de l'ignorance* » réalisé par Franck Cuveillier et Pascal Vasselin²⁹). **Ces dérives de la recherche industrielle conduisent à davantage de suspicions et une prise de distance nécessaire des chercheurs des OPR avec leurs pairs de la recherche industrielle et conduisent à des**

²⁸ « Science et Industrie : tous vendus ? », La méthode scientifique, podcast France Culture 18/02/2021

²⁹ <https://www.arte.tv/fr/videos/091148-000-A/la-fabrique-de-l-ignorance>

impacts néfastes sur des couplages science – industrie qui auraient pourtant pu être féconds.

Encadré 3 - Le cas de la science dans l'industrie du tabac

Proctor et Girel (2014) analysent des documents d'archives rendus publics par l'industrie du tabac principalement dans les années 1980 et 1990. Suite à une étude de Wynder et Croninger 1953, la preuve est apportée et relayée dans des médias de premier plan comme le Time que le goudron de la fumée de tabac a un lien de cause à effet avec le cancer (par des expériences sur les souris). Cette même année, l'American Tobacco, association réunissant les principaux industriels du secteur, établit la Tobacco Industry Research Committee (TIRC), un centre de recherche piloté par les majors de l'industrie du tabac et visant à conduire des recherches sur toutes les phases d'utilisation du tabac en lien avec la santé humaine. Alors que dans les années 1950, les dépenses de recherche de l'industrie du tabac aux États-Unis s'élevaient à 100 000 USD par an, elles passeront successivement à plusieurs dizaines de millions dollars dans les années 1960-1970 pour atteindre jusqu'à 300 millions de dollars en 1998. Comme l'indique Le Masson et Weil (2021) :

« La recherche produite par le TIRC (appelé Council for Tobacco Research -CTR- quelques années plus tard) va être largement publiée [...]. Il ne s'agit donc pas (ou plus) de cacher ou de supprimer des résultats scientifiques. Et la recherche publiée est d'une rigueur scientifique indiscutable – du moins au sens de la rigueur du dispositif de production de connaissance. Il ne s'agit donc pas de fraude ou de tricherie. Dans les travaux publiés (dans les revues prestigieuses, avec les contrôles requis) la responsabilité épistémique des chercheurs n'est donc pas en jeu. » (Le Masson et Weil, 2021, p. 26).

Ainsi, si les travaux sont menés avec rigueur scientifique, impliquant 6 Prix Nobel et générant 6 400 articles scientifiques, le problème de la qualité scientifique réside dans les questions de recherche adressées (Le Masson et Weil, 2021). Le programme de recherche consiste à étudier les phénomènes autour du tabac sans financer par exemple, d'études épidémiologiques sur le tabac ou d'études de toxicologie. Comme concluent Le Masson et Weil (2021) :

« Il apparaît que le programme de recherche au mieux n'adressait pas la question de recherche principale (invalidier la théorie anti-cigarette) au pire consistait à « fixer » la recherche sur quelques questions locales (facteurs de confusion, causes alternatives) sans explorer plus largement. » (Le Masson et Weil, 2021, p. 28).

Ainsi, on peut conclure sur un risque de découplage entre activités de recherche scientifique et activités de développement dans le cas de la recherche partenariale, et qui rend son pilotage particulièrement difficile. On peut ainsi proposer le paradoxe suivant :

Paradoxe N°3 : La recherche partenariale entre les OPR et les entreprises est de plus en plus encouragée et les études convergent pour montrer qu'elle favorise l'innovation au sein des entreprises. Pourtant, malgré les efforts des pouvoirs publics, son ampleur reste limitée avec des difficultés importantes de pilotage pour favoriser des retombées scientifiques. Elle favorise généralement un couplage relevant davantage de la science résolutoire, mais elle peut aussi conduire à un risque d'asservissement de la recherche scientifique à l'industrie, voire de profonde dérive.

Dans cette section, nous avons pu caractériser quelques couplages science – industrie clé et discuter leur dynamique à l’aune des doctrines et des orientations des pouvoirs publics pour l’organisation de ces relations. Cette analyse nous a conduits à identifier trois paradoxes qui nous permettent de faire l’hypothèse d’un type de couplage alternatif et dit à double impact simultané.

3. L’hypothèse d’un couplage à double impact simultané

Dans cette section, nous revenons sur la possibilité d’un couplage à double impact simultané, c’est-à-dire un modèle qui permettrait des synergies entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits, procédés, services innovants au sein d’un même projet, en réponse notamment aux paradoxes évoqués dans la section précédente.

3.1. Le couplage à double impact simultané comme réponse aux paradoxes des relations science - industrie

Les trois paradoxes évoqués ci-dessus nous amènent à nous questionner sur les couplages science – industrie. Deux principaux modèles distincts semblent apparaître :

- **Un modèle de couplage hérité du modèle linéaire dans lequel le découpage des activités et leur séquentialité semblent favoriser les découvertes scientifiques**, en s’appuyant sur une logique de « curiosité » et de sérendipité. Pourtant, malgré des efforts conséquents (multiplications des moyens de favoriser le transfert OPR-entreprises, investissements massifs jusqu’aux années 1990 des entreprises dans la recherche fondamentale), le passage à l’innovation et plus largement l’obtention d’un impact socio-économique de ces travaux de recherche semblent limités : les performances en termes de développement de produits, procédés et services sont insatisfaisantes (Paradoxe 1).
- **Un modèle de couplage qui relève de la science résolutoire**, qui se diffuse dans l’entreprise (Paradoxe 2) ou dans le cadre de la recherche partenariale (Paradoxe 3), et qui va chercher à minimiser la production de savoirs scientifiques nouveaux pour résoudre des problèmes industriels locaux (logique offre – demande). Si les performances en termes de développement de produits, procédés et services sont notables, la production scientifique semble insatisfaisante (Paradoxes 2 et 3).

Pourtant on peut postuler que les couplages entre d'une part des activités de recherche scientifique et d'autre part des activités de développement de produits, procédés ou services cherchent *in fine*, à répondre à un double objectif de percées scientifiques et d'avancées socio-économiques. Toutefois, force est de constater que dans les régimes présentés ci-dessus, ce double impact semble plutôt s'apparenter à une double contrainte, voire un double fardeau. Soit l'une des activités est jugée insuffisante en termes de potentiel de découvertes scientifiques, soit l'autre est jugée insuffisante en matière de potentiel d'innovation et de retombées socio-économiques, sauf quelques rares exceptions (dont il faudrait creuser les ressorts) pour lesquelles nous avons pu donner quelques illustrations. Dès lors, comment faire face aux grands défis contemporains qui nécessitent nécessairement des percées scientifiques nouvelles et des innovations comme le réchauffement climatique, la transition digitale, la transition énergétique ? Peut-on s'organiser pour favoriser des formes de couplage entre activités de recherche (que ce soit dans les OPR, dans les entreprises) et activités de développement de nouveaux produits, procédés ou services (que ce soit là encore dans les OPR, dans les entreprises) qui favorisent un double impact sans que ce soit une forme « d'asservissement » ? Peut-on imaginer des cas où les activités de développement de nouveaux produits viennent justement favoriser les percées scientifiques dans les activités scientifiques ou inversement ?

Tout d'abord, remarquons que cette logique de double impact « simultané », c'est-à-dire au cours d'un même projet de recherche, est de plus en plus promue par certaines institutions de recherche. Par exemple, le modèle de recherche promu par l'Université de Stanford est présenté ainsi : « *The Research Enterprise: Stanford's culture of collaboration drives innovative discoveries in areas vital to our world, our health and our intellectual life* »³⁰. Il faut comprendre ici que la recherche partenariale conduite à l'Université Stanford permettrait à la fois des percées scientifiques, mais également des innovations. Autre cas, celui du Département Américain de l'Énergie (DoE) qui a fondé en 2009 une nouvelle agence, au-delà des agences classiques de recherche fondamentale (*Office of Science*) et de recherche appliquée (*Energy Efficiency and Renewable Energy, EERE*). Il s'agit de l'agence *Advanced Research Projects Agency – Energy* (ARPA-E), chargée de financer des projets qui adressent des questions de recherche fondamentale dans le cadre de projets appliqués. Goldstein et Narayanamurti (2018) décrivent par exemple un projet financé par ARPA-E qui démontre bien la co-existence d'une

³⁰ <https://www.stanford.edu/research/> - consulté le 18/01/2021

question de recherche fondamentale, mais qui est investiguée dans un contexte de développement de produit :

« In 2012, ARPA-E awarded \$4.3 million to a team led by Michael Aziz, Professor in the School of Engineering and Applied Sciences at Harvard University. The goal of the project was to develop an organic aqueous flow battery, which would be highly desirable as a low-cost energy storage method to help accommodate intermittent renewable sources of electricity on the grid. By gaining a deeper understanding of the chemical reactions involved, Aziz's group was able to create a proof of concept device. The researchers published a number of journal articles, including in Nature and Science; they also filed two patent applications and began partnering with a company to commercialize the technology. » (Goldstein et Narayanamurti, 2018, p. 1505)

Les résultats de ARPA-E semblent soutenir cette logique de double impact simultané : au cours d'un même projet, on observe à la fois une percée scientifique (par exemple, une meilleure compréhension de la réaction chimique dans une batterie à flux aqueux organique) et une avancée industrielle qui prend la forme du développement d'un produit innovant (prototype et brevets de batterie à flux aqueux organique). En septembre 2020, les performances globales d'ARPA-E étaient particulièrement intéressantes, tant en termes de percées scientifiques qu'en matière de développement de produits nouveaux (voir Figure 4), et notamment comparativement aux autres branches du Département de l'Energie (Goldstein et Narayanamurti, 2018). C'est justement le modèle d'ARPA-E qui est plébiscité au Royaume-Uni pour imaginer une nouvelle agence de recherche en février 2021³¹.

³¹ « A new UK research funding agency », UK Parliament, fev. 2021

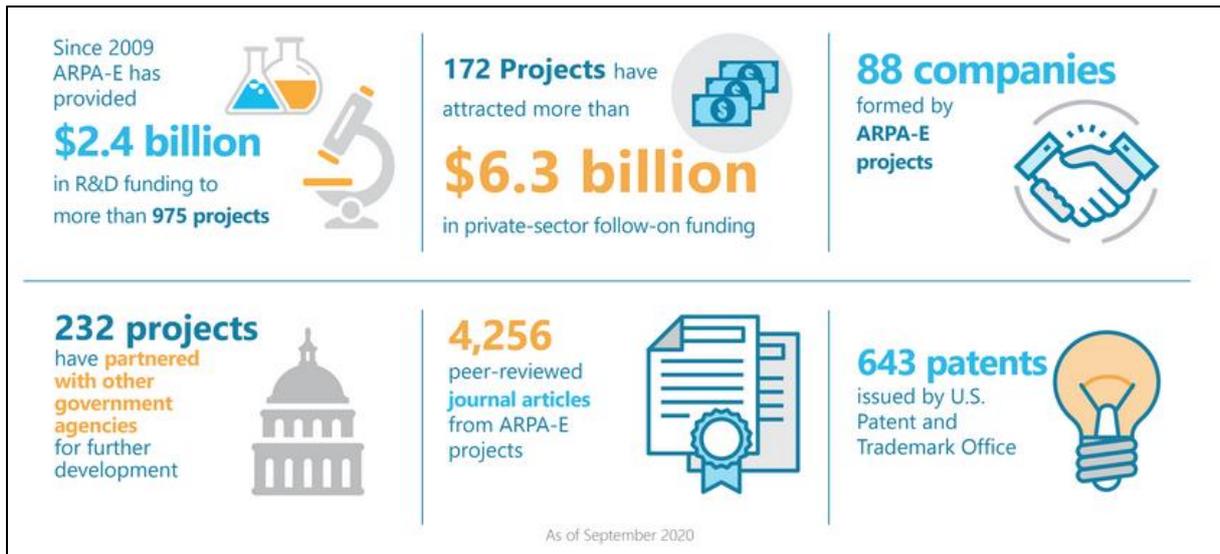


Figure 4 - Performances ARPA-E (sept. 2020)

Comme nous l'avons souligné dans les paradoxes évoqués ci-dessus, si le fait que les activités scientifiques contribuent à la croissance économique par l'innovation est désormais clairement établi dans la littérature scientifique³², la boucle de rétroaction de la recherche partenariale ou du transfert sur les activités de recherche scientifique pose question. Ce point était jusqu'alors peu discuté y compris dans les débats sur l'organisation et la facilitation de la recherche partenariale : l'enjeu était d'abord de promouvoir coûte que coûte cette forme de recherche. Les débats de la conférence « L'innovation par la recherche partenariale » organisée par le Club de Paris des Directeurs de l'Innovation le 08 mars 2020 (et auquel le chercheur a assisté) illustrent ces questionnements. Citons cet extrait d'intervention de P. Véron (Président de l'Association des Instituts Carnot) qui permet de revenir sur les enjeux de réaliser des couplages qui soient féconds, mais aussi sur les limites de la capacité des institutions à piloter ces interactions :

« Il faut aussi établir des échanges entre le monde socio-économique et les entreprises d'un côté, vers la recherche, pour venir alimenter par des besoins qualifiés, par des problématiques définies, les réflexions et des expérimentations des chercheurs. Ainsi il faut faire en sorte aussi que le monde socio-économique et les entreprises viennent alimenter et nourrir la recherche publique. En résumé, il faut construire ensemble des passerelles bidirectionnelles entre la recherche publique et les entreprises. [...] J'ai parlé de passerelle, ces passerelles elles existent déjà, mais il faut de grands et larges ponts qu'il nous faut construire ensemble, et là je crois que nous avons des marges de progrès importants dans ce domaine. » (Philippe Véron, Institut Carnot, conférence sur l'innovation par la

³² On retrouve d'ailleurs ici une idée chère aux théoriciens de la croissance endogène

recherche partenariale organisée par le Club des Directeurs de l’Innovation de Paris le 08/03/2020)³³

Dans cet extrait, c’est bien cette question du double impact simultané dont il est question par cette logique de « passerelles bidirectionnelles », mais l’usage de la métaphore du « pont » est ici équivoque. Comme nous l’avons montré, les ponts semblent aujourd’hui exister au travers du très grand nombre de dispositifs à la recherche partenariale (CIFRE, laboratoire unité mixte, chaire, Office de Transferts de Technologie, IRT, SATT, etc.). La question devient donc plutôt comment assurer la circulation des connaissances dans les deux sens sur ledit « pont »³⁴. Dans cette même conférence, l’exemple d’un industriel, ici le chimiste Solvay explique d’ailleurs l’intérêt d’un des dispositifs, ici les unités mixtes CNRS avec des industriels :

« D’avoir sur un seul site, une équipe avec des membres venant du monde industriel, de Solvay, avec des chercheurs du CNRS, à plein temps, avec des étudiants, des thésards, des post-docs, sur un projet commun [...] c’est quelque chose qui a une valeur inestimable. [...] Cette vision de partenariat étroit, cette vision d’échanges où les chercheurs du monde académique sont exposés tous les jours aux problèmes industriels, et où tous les jours ils peuvent parler avec un industriel de leurs dernières découvertes scientifiques, dans les domaines du projet, c’est quelque chose d’extrêmement passionnant et à la fois utile, pour les deux camps. ». (Patrick Maestro, Solvay, conférence sur l’innovation par la recherche partenariale organisée par le Club des Directeurs de l’Innovation de Paris le 08/03/2020)³⁵

Dans cet extrait, on retrouve en creux cette volonté de promouvoir cette logique de double impact simultané. Pour autant, si les enjeux de développement de produits et de recherche sont clairement établis, il est difficile ici de comprendre le mécanisme de pilotage et ce qui permet de favoriser découvertes scientifiques et innovation. On est ici dans une logique qui tend à favoriser ce qu’on pourrait qualifier de « surface de contact » entre les deux institutions. D’autant que cet objectif d’obtenir un impact scientifique est perturbé par les autres objectifs classiques de l’entreprise dans la recherche partenariale : partage des risques, des frais et embauches. Certains chercheurs viennent parfois même à parler de prédation de l’industrie qui encouragerait ainsi « fuite des cerveaux » des OPR vers l’industrie (Toole et Czarnitzki, 2010).

³³ Retranscription de l’auteur pendant la conférence

³⁴ En filant la métaphore, on pourrait faire l’hypothèse que la voie de circulation des connaissances des OPR vers le monde socio-économique est un « très large pont autoroutier », tandis que la voie de circulation en sens inverse ressemblerait davantage à une très tortueuse sente.

³⁵ Transcription de l’auteur pendant la conférence

Soulignons que cette logique de renforcement de la surface de contact rappelle les conclusions du rapport Berger de 2016 et de son graphique évocateur à l'appui (Figure 5) :

« *To anticipate my findings after three weeks of research and 111 interviews, I conclude that reform ought to be focused instead on creating a broader, **thicker interface** between research and enterprises.* » (Berger, Dorman et Starbuck, 2016, p. 3)

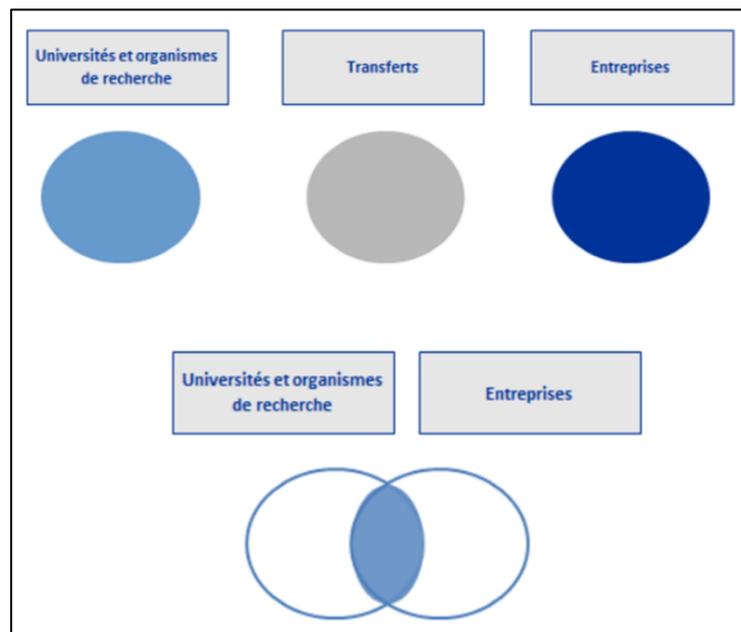


Figure 5 - Synthèse des résultats Rapport S. Berger et al. (2016, p. 2-3)

Ainsi cette question de la caractérisation et du pilotage des couplages entre des activités de recherche d'une part, et des activités de développement de nouveaux produits, procédés ou service d'autre part, est au cœur des questionnements contemporains des OPR, des pouvoirs publics et des entreprises. À titre d'illustration, soulignons l'organisation du séminaire « Modèles et Pratiques de couplage entre Science et Industrie pour favoriser l'impact de la recherche » le 22 mars 2019 par un collectif d'institutions (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie, le CEA, MinesParistech, la Maison des Sciences de l'Homme de Paris-Saclay, l'Université Paris-Saclay) qui témoigne là encore de l'intérêt pour cette question. L'idée de ce séminaire était d'ailleurs de comprendre comment le management de ces relations pourrait favoriser le double impact par le partage d'expériences et de bonnes pratiques. Mais au-delà de l'intention, peut-on trouver des traces historiques de couplages vertueux à double impact simultané ?

3.2. Traces historiques du couplage à double impact simultané

Si comme nous l'avons montré, certaines institutions semblent promouvoir une approche à double impact simultané du couplage entre activités de recherche scientifique et activités de développement de nouveaux produits, procédés ou services, c'est aussi parce qu'il semble y avoir existé des couplages féconds dans l'histoire des relations science – industrie. Nous avons souligné le caractère parfois étonnant de ces relations dans certaines aventures de la recherche dite industrielle (voir Paradoxe 2), mais de nombreux exemples semblent exister. Si Max Planck obtient le Prix Nobel de Physique en 1918 pour ses travaux sur la mécanique quantique (théorie des quantas), c'est peut-être parce que l'industriel Siemens lui a demandé de chercher une mesure originale de l'intensité lumineuse, et que cette activité l'a poussée à explorer des voies nouvelles (Le Masson et Weil, 2021). Si Charles-Edouard Guillaume obtient le Prix Nobel de Physique en 1920 pour ses avancées sur la métrologie, c'est peut-être lié à ses relations fécondes avec Fayol et Chevenard qui permet de spectaculaires percées sur les aciers (Cahn, 2005 ; Le Masson et Weil, 2016). Si le projet Manhattan permet des avancées scientifiques conséquentes en physique, c'est peut-être parce que la structuration du projet permettait d'explorer des voies de recherche nouvelles orientées vers les applications pour la création de la bombe atomique (Gillier et Lenfle, 2019 ; Lenfle, 2011). Si les Bell Laboratories ont inventé le transistor qui permettra de structurer la Silicon Valley et qui conduira John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley au Prix Nobel de Physique, c'est peut-être lié à une structure de management autour des applications particulières (Gertner, 2012 ; Lenfle et Petitgirard, 2020 ; Lipartito, 2009). William Shockley parlera d'ailleurs de « *creative failure methodology* » (Shockley, 1976, p. 1523) pour décrire son approche scientifique basée sur une logique d'essais – erreurs, ou il revendique « *a respect for scientific aspects or practical problems* » (Shockley, 1976, p. 1545)³⁶.

Dans cet ensemble de cas historiques, qui sont certes des réussites en matière de développement de nouveaux produits et de percées scientifiques, le couplage vertueux pose question. Dans le cas de Max Planck par exemple, il semble que ce soit l'injonction de Siemens qui au lieu d'asservir le scientifique, l'a poussé à explorer des champs radicalement nouveaux pour aller jusqu'à la réalisation d'une découverte scientifique de premier plan. Dans le cas du

³⁶ Nelson (1962) dans une étude sur la découverte du transistor aux Bell Laboratories écrit notamment : « *Further, problems relating to practical devices are often very interesting ones. Bardeen and Brattain found the problem of why Shockley's field effect amplifier did not work extremely exciting as a scientific one. And results worthwhile from the purest scientific point of view came from their efforts to explain the failure of the amplifier* » (p. 576-577)

projet Manhattan, l'injonction semble relativement similaire, mais la conduite du projet impose d'explorer en parallèle toutes les voies scientifiques prometteuses, ce qui semble avoir renforcé le potentiel d'exploration à la fois en termes scientifiques et en termes d'innovation³⁷ (Lenfle, 2011). Dans le cas du transistor par exemple, le couplage semble différent : mue par la volonté de remplacer des amplificateurs à lampes par des composants solides, l'équipe de recherche invente le premier transistor par un mécanisme qui semble s'approcher davantage d'une logique d'essai-erreur, avant de proposer une analyse plus scientifique du phénomène (Lenfle et Petitgirard, 2020).

Ces quelques exemples montrent que les couplages à double impact simultané semblent possibles. Toutefois, leurs pilotage, leurs conditions de réalisation, le type de connaissances à échanger entre les parties, semblent autant de points cruciaux à creuser pour sortir d'une logique de « surface de contact » ou de « bonne distance » entre activités de développement de produits, services ou procédés et activités de recherche scientifique. Ces questionnements fondent l'axe de recherche principal de ce travail de thèse.

³⁷ À ce titre, les deux bombes atomiques lancées par les américains sur le Japon seront deux procédés scientifiques et techniques complètement différents.

Synthèse du Chapitre 1

Dans ce Chapitre 1, nous adoptons une position gestionnaire pour caractériser les notions *d'activités de recherche scientifique* (qui s'appuient sur la méthode scientifique pour la production contrôlée de connaissances sur les lois de la nature) et *d'activités de développement de produits, procédés et services* (qui s'appuient sur la spécification d'un système et qui résultent en la production de connaissances formalisées). Au cœur de notre sujet se situe la notion de *couplage science - industrie* : une forme de liaisons entre des activités de recherche scientifique et des activités de développement de produits, procédés et services, et qui peut induire (1) des effets réciproques de potentiel d'exploration et de créativité, et (2) des effets de dépendances entre ces deux activités.

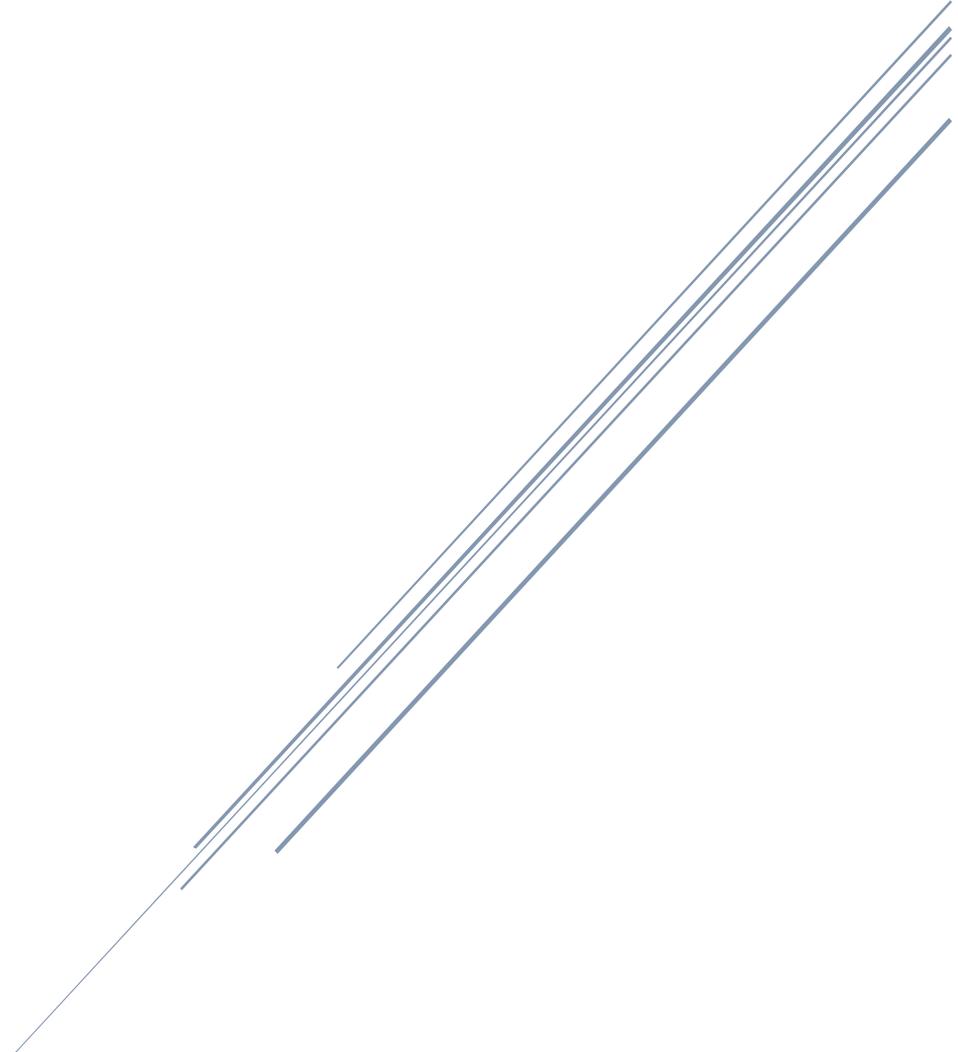
Fort de ces notions, nous avons étudié trois grands débats inhérents aux relations science – industrie afin d'en apprendre davantage sur les couplages possibles. Premièrement, le modèle de couplage prédominant semble hérité du modèle dit linéaire, qui fonctionne sur la séquentialité des activités. S'il semble favoriser la productivité des activités de recherche scientifique, il ne semble pas tenir ses promesses en matière de retombées socio-économiques. Deuxièmement, l'entreprise peut être un lieu clé de production de connaissances scientifiques nouvelles, mais l'industrie s'est désengagée de ces activités et des dérives ont pu être observées. Ces éléments ont conduit à l'émergence d'un modèle de couplage reposant sur une science résolutoire, où la science est au service de la résolution de problèmes locaux, au détriment d'avancées scientifiques majeures. Troisièmement, si la recherche partenariale conduit à des retombées positives en termes d'innovations pour l'industrie, les projets semblent complexes à piloter, et encouragent une science résolutoire avec des retombées scientifiques qui interrogent. C'est un mécanisme auquel les industriels et les OPR recourent peu malgré des moyens pléthoriques mis en place.

Au regard de ces paradoxes, les modèles de couplage science – industrie semblent pouvoir, soit d'un côté, encourager l'impact scientifique, soit de l'autre, l'impact industriel (ie. retombées socio-économiques), mais toujours dans une logique où l'impact de l'un se ferait au détriment de l'autre. Cela constitue une difficulté majeure face aux transitions auxquelles nous devons faire face (énergétiques, écologiques, sanitaires, etc.) qui requiert tant la production de connaissances scientifiques nouvelles que d'innovations.

Pour dépasser ces paradoxes, nous adoptons une approche nouvelle plébiscitée par certaines institutions (Stanford, US Department of Energy, MinesParistech, etc.) et visant à promouvoir des couplages favorisant les deux impacts, scientifiques et socio-économiques, au sein d'un même projet de recherche. En particulier, la question la plus exigeante dans ce couplage consiste à s'interroger sur les retombées scientifiques. Des exemples historiques existent (projet Manhattan, Max Planck, Bell Laboratories), mais leurs conditions d'existence et de pilotage interrogent pour aller au-delà de l'hypothèse de « hasard heureux ». Et si un tel modèle existait, quelles seraient son ampleur et ses conditions de mise en œuvre ?

Ainsi nous avons dessiné les contours de cette thèse, qui vise à mieux comprendre et définir la notion de couplage à double impact simultané, à qualifier son existence, et la mettre en exergue par rapport à d'autres modèles de couplages plus traditionnels.

CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE



Ce chapitre vise à discuter la notion de couplage à double impact simultané au regard de la littérature en sciences de gestion. Nous proposons d'étudier d'abord les effets causaux des activités de recherche scientifique sur le développement de produits, procédés ou services à partir de la littérature sur l'invention combinatoire. Ensuite, nous étudions les effets causaux des activités de développement sur les activités de recherche scientifique, à partir notamment de la littérature sur l'engagement académique. Nous concluons ce chapitre en définissant les limites de la littérature et nous formulons les trois questions de recherche qui composent cette thèse.

CHAPITRE 2 :

REVUE DE LITTERATURE

1. <i>Stratégie d'analyse de la littérature</i>	87
2. <i>Effets causaux des activités de recherche scientifique sur les activités de développement de nouveaux produits</i>	90
2.1. Les connaissances scientifiques dans la conceptualisation de l'invention par la logique combinatoire....	92
2.2. Effets de la science sur la qualité de l'innovation dans la perspective combinatoire	94
2.3. Les enjeux managériaux de l'innovation par la science.....	100
3. <i>Effets causaux des activités de développement de nouveaux produits sur les activités de recherche scientifique</i>	104
3.1. La difficile conceptualisation des effets des activités de développement de nouveaux produits sur la science	105
3.1.1. Le rapprochement OPR – entreprise comme injonction perturbatrice sur le système vertueux de l'académie	106
3.1.2. L'hybridation société - science comme catalyseur de la recherche scientifique	109
3.2. Effets causaux des activités de développement de nouveaux produits sur la qualité de la science	112
3.2.1. Conséquences d'une orientation vers l'usage sur la productivité scientifique	112
3.2.2. Conséquences de l'engagement académique sur la production scientifique.....	114
3.2.3. Orientation vers l'usage et engagement académique : l'ampleur du phénomène	118
3.3. Management de l'engagement pour favoriser les retombées scientifiques positives	121
3.3.1. Gains nets pour la recherche scientifique de l'engagement académique	121
3.3.2. Management des couplages science – industrie pour favoriser l'impact scientifique.....	123
4. <i>Synthèse de la littérature au regard du double impact simultané et questions de recherche</i>	127
4.1. Apports et limites de la littérature.....	127
4.2. Questions de recherche	132
<i>Synthèse du Chapitre 2</i>	136

Ce Chapitre vise à explorer la littérature en sciences de gestion sur notre thématique pour en synthétiser les apports, les tensions et les limites. Sur cette base, nous pourrons construire nos questions de recherche. Ainsi, dans un premier temps, nous présentons notre stratégie d'analyse de la littérature (section 1). Dans un second temps, nous synthétisons les construits et les apports au regard de notre question de recherche (sections 2 et 3). Dans un troisième temps, enfin, nous mettons en exergue les limites de la littérature pour aborder la thématique de recherche et faire face aux paradoxes évoqués au Chapitre 1. Ces éléments nous permettent de proposer les trois principales questions de recherche de cette thèse (section 4).

1. Stratégie d'analyse de la littérature

Cette thèse vise à explorer les modèles de couplage entre activités de recherche scientifique et activités de développement de nouveaux produits, procédés et services. En particulier, nous nous intéressons à un modèle émergent, que nous qualifions de couplage à double impact simultané (voir Chapitre 1). Ce dernier devrait permettre de favoriser des synergies positives entre ces deux activités souvent présentées de façons distinctes.

Soulignons que ce type de couplage est, à ce stade, plutôt un construit dérivé de la pratique et de la littérature grise : à notre connaissance, il n'existe pas de littérature scientifique à proprement parler sur le sujet du double impact simultané, ce qui constitue d'ailleurs l'objectif clé de ce travail de thèse. Ainsi, pour caractériser le fonctionnement d'un tel mécanisme de couplage, nous souhaitons analyser la littérature existante en sciences de gestion. Pour cela, nous procéderons de façon séquentielle : (1) nous analysons d'abord les effets causaux des activités de recherche scientifique sur les activités de développement de nouveaux produits, procédés et services ; (2) puis dans un second temps, nous étudions les effets causaux réciproques. Ces éléments nous permettent de nous questionner sur l'effet conjoint de ces deux activités distinctes sur leur production : soit les découvertes scientifiques (ie. approchées par les publications académiques), soit les nouveaux produits innovants (ie. approchés par les brevets d'invention). Notre approche est résumée dans la Figure 6 ci-dessous.

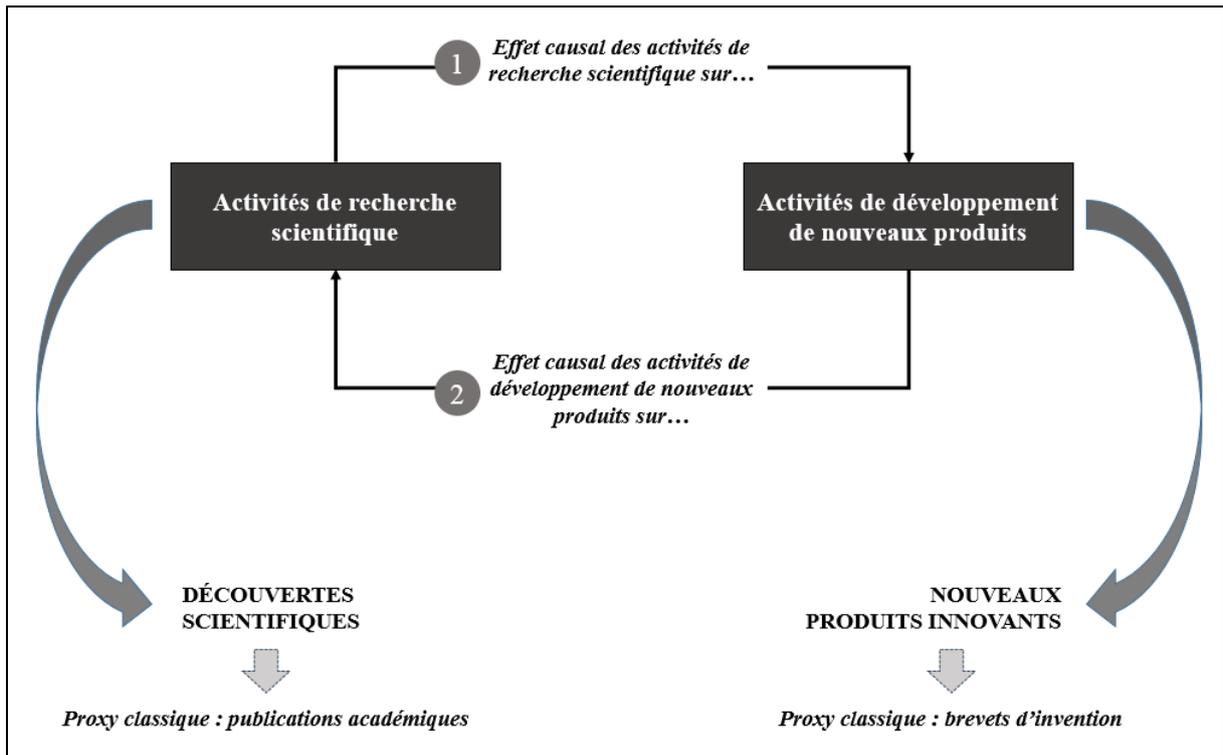


Figure 6 - Approche de la littérature

Nous terminerons ce Chapitre 2 en indiquant les limites de la littérature pour traiter de la question du double impact simultané, ce qui nous permettra enfin de présenter les principales questions de recherche de notre travail. Nous souhaitons ici attirer l'attention du lecteur sur la stratégie adoptée pour parcourir la littérature.

Premièrement, précisons que nous n'avons pas adopté ici de stratégie de revue de littérature systématique du fait du volume particulièrement conséquent d'articles académiques qui traitent de la question de l'organisation de la recherche scientifique. Ce choix s'explique aussi par le format de cette thèse : une revue de littérature détaillée est présentée dans le cadre des essais. Rappelons également que notre travail est ici particulièrement exploratoire : le modèle à double impact simultané est un construit qui ne repose pas sur une littérature académique explicite préexistante. Nous qualifions donc ici notre approche de « tactique » puisqu'elle permet de dériver des éléments qui servent à mieux comprendre la logique du modèle, à partir de la littérature sur des thèmes connexes. En revanche, notre approche se veut systématique dans les éléments à faire ressortir de la littérature. D'abord, nous caractérisons les effets théoriques d'une activité sur les résultats de l'autre (ie. par exemple des activités scientifiques sur le développement de produits innovants), puis nous définissons l'ampleur du phénomène et ses performances (ie. par exemple, les effets sur la qualité des produits

nouveaux), avant d'aborder dans une dernière partie les éléments managériaux à mettre en place pour maximiser ces effets. Notre approche est synthétisée dans la Figure 7 ci-dessous :

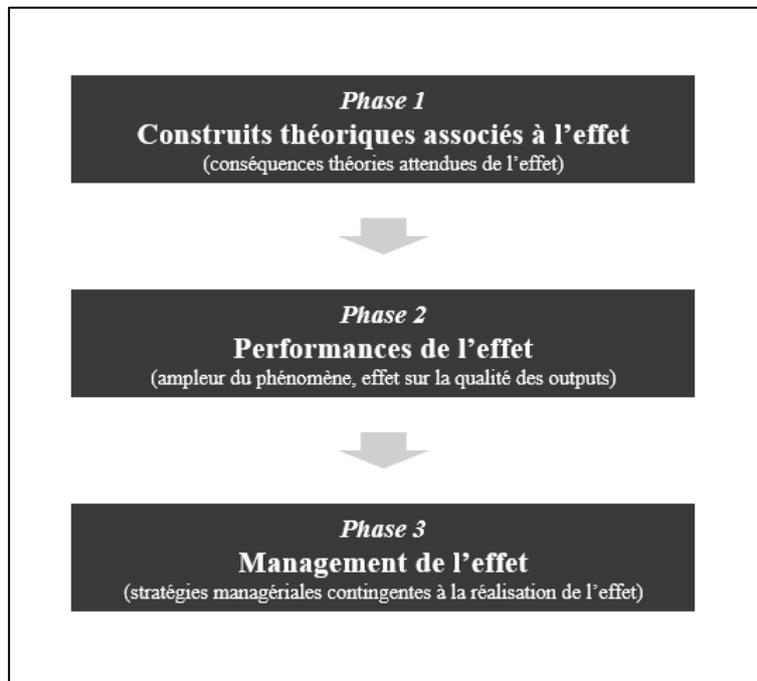


Figure 7 - Stratégie d'analyse de la littérature

Deuxièmement, et en conséquence du point précédent, nous indiquons que les deux parties de cette revue de littérature ne sont pas équivalentes en termes de volume d'articles académiques analysés. En effet, l'étude des effets des activités scientifiques sur les activités de développement de nouveaux produits est ancienne : bon nombre d'entre eux sont stabilisés dans la littérature, font consensus. Notre stratégie sera plutôt d'abord de présenter le modèle dominant, consensuel, et de construire, à partir de ces éléments, un argumentaire permettant de mettre en exergue les tensions et les limites de cette littérature. À l'inverse, l'effet causal des activités de développement de nouveaux produits sur les activités de recherche scientifique est un point moins couvert par la littérature, qui a même longtemps manqué de considération (Perkmann *et al.*, 2013) : l'enjeu économique des décideurs publics fut d'abord de favoriser le transfert sans se préoccuper d'éventuels effets rétroactifs pour la recherche scientifique (voir Chapitre 1). Explorer ces effets constitue également le plus grand challenge de cette thèse. Dès lors, notre parti pris est ici d'explorer plus en profondeur cette littérature, aussi plus limitée.

Troisièmement, nous attirons également l'attention du lecteur sur le fait que nous naviguons dans les construits théoriques le plus généralement avec une approche temporelle. La littérature que nous abordons dans cette thèse se construit aussi au regard des grandes

évolutions de l'organisation de la science et des choix des décideurs publics sur ces sujets (présentées notamment au Chapitre 1). Dès lors, une approche temporelle des différents construits théoriques permet également de discuter d'abord d'analyses plus sommaires avant de gagner en sophistication.

Quatrièmement, nous soulignons que notre formulation du couplage à double impact simultané n'induit pas nécessairement une vision institutionnelle : nous supposons que les activités de recherche scientifique ou de développement de nouveaux produits peuvent être conduites par n'importe quel acteur : Organisme Public de Recherche (OPR) ou entreprise. En particulier, les définitions d'activités de recherche scientifique et de développement de produits, procédés et services introduites au Chapitre 1 n'induisent pas un découpage institutionnel spécifique. En effet, la *méthode scientifique* peut tout à fait s'appliquer dans l'entreprise ou dans un OPR par exemple. Pourtant ce n'est pas le schéma dominant dans la littérature sur les relations OPR – entreprises qui suppose a contrario un découpage institutionnel à ces activités. Nous tenterons de dériver de la littérature des construits théoriques et des savoirs empiriques qui servent notre propre conceptualisation de ces activités (ie. et donc exempte de ce découpage).

2. Effets causaux des activités de recherche scientifique sur les activités de développement de nouveaux produits

Comme nous l'avons indiqué dans le Chapitre 1, le lien économétrique entre investissement en R&D (que ce soit les entreprises ou les OPR) et croissance économique, maintes fois démontré (Aghion, Dewatripont et Stein, 2008), laisse penser à un lien mécanique entre développement de connaissances scientifiques nouvelles et développement de nouveaux produits, procédés ou services. D'une part, plusieurs enquêtes réalisées auprès d'industriels indiquent que ces derniers sont des consommateurs privilégiés des connaissances scientifiques nouvelles développées par la recherche académique pour alimenter leur processus d'innovation (Cohen, Nelson et Walsh, 2002 ; Mansfield, 1991). D'autre part, si les entreprises investissent dans des activités de recherche en interne, c'est d'abord parce que cette stratégie soutient le développement de nouveaux produits (Nelson, 1959). D'ailleurs, dans les logiques issues du modèle linéaire, que ce soit plutôt des logiques dites « *research-push* » ou « *market-pull* » qui apparaissent dans les années 1970, le développement de connaissances scientifiques est un

prérequis aux activités de développement de produits nouveaux (Trott, 2011, voir Figure 8). Il est même plus surprenant encore de noter que dans les modèles dits plus interactifs, si les sources d'inspiration de la recherche varient, la connaissance scientifique reste généralement un prérequis à l'innovation technologique (Rothwell et Zegdev, 1985). C'est également le cas de la littérature sur les Nouveaux Développements de Produits (Cooper, Edgett et Kleinschmidt, 2001 ; Cooper et Kleinschmidt, 1995).

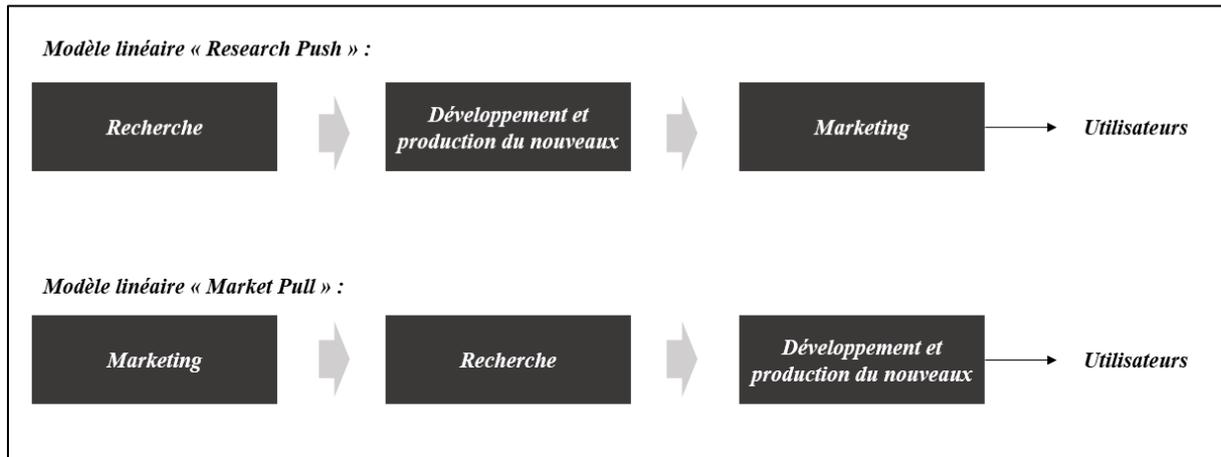


Figure 8 - "Research Push" et "Market Pull" (adapté de Trott, 2011)

Pourtant, les difficultés abordées au sujet des pratiques de transfert entre OPR et entreprises (voir Chapitre 1 – Paradoxe 1), ou les difficultés rencontrées par les industriels pour capitaliser sur les apports de leur propre R&D (voir Chapitre 1 – Paradoxe 2) invitent à se questionner plus profondément sur ce lien mécanique entre nouvelles connaissances scientifiques et innovation.

Pour cela, nous montrons dans un premier temps comment les connaissances scientifiques nouvelles interviennent dans le processus créatif qui mène à l'invention en prenant la perspective aujourd'hui dominante dite de l'invention combinatoire (2.1.). D'autres approches théoriques existent (par exemple les théories de la conception), mais comme nous l'avons indiqué, la littérature que nous explorons ici est plutôt stabilisée : nous traitons donc ici uniquement de l'invention combinatoire. Dans un second temps, nous analysons la place des inventions basées sur les nouvelles connaissances scientifiques dans le panorama de l'innovation, et ce que l'on peut en attendre en termes de performances (2.2.). Enfin, nous nous questionnons sur les pratiques managériales qui permettent la conception d'inventions basées sur des connaissances scientifiques et les difficultés associées à cette activité (2.3.).

2.1. Les connaissances scientifiques dans la conceptualisation de l'invention par la logique combinatoire

Dans un monde où la disruption est de plus en plus fréquente et où la pression à l'innovation devient la norme, l'enjeu du recours aux connaissances nouvelles pour assurer la survie à long terme des entreprises et le maintien ou le développement de leur position concurrentielle, constitue un enjeu clé dans la plupart des perspectives théoriques récentes en sciences de gestion : *organizational learning* (par exemple, Nonaka, 1994), *resource-based view* (par exemple, Barney, 1991), *strategic renewal* (par exemple, Agarwal et Helfat, 2009). Pourtant, ces théories ne fournissent pas une conceptualisation détaillée de ce qui fait invention. La vision aujourd'hui dominante dans les sciences de gestion consiste à conceptualiser l'invention (au-delà des contraintes d'intégration sur un marché) par une logique combinatoire (Arts et Fleming, 2018). Bien sûr, combiner des connaissances pour générer des inventions est une conceptualisation ancienne que l'on retrouve notamment chez Schumpeter (1934), Dosi (1982), March (1991), Henderson et Clark (1990), Hargadon et Sutton (1997), ou encore Teece (1996). Nous revenons ici d'abord sur cette conceptualisation à partir des avancées récentes en sciences de gestion sur ce paradigme. Dans un second temps, nous étudions comment la littérature a pris en compte les activités de recherche scientifique (et donc les connaissances scientifiques) dans l'approche combinatoire.

Pour les théoriciens de ce courant (voir par exemple, Ahuja et Lampert, 2001 ; Fleming, 2001 ; Fleming et Sorenson, 2004), ce sont les activités de recherche de connaissances nouvelles (ie. *knowledge search*) d'une part, et de combinaison de ces connaissances d'autre part qui permettent à une organisation de créer des produits radicalement nouveaux malgré un environnement technologiquement incertain (Fleming, 2001). Pour Fleming (2001), un inventeur est capable de concevoir un produit nouveau, soit en raffinant des combinaisons de connaissances qu'il maîtrise et qui sont liées à ses expériences de conception préalables, soit en accédant à de nouvelles connaissances qu'il combine avec les précédentes. On retrouve ici la logique de March (1991) qui se positionnait pour sa part au niveau de l'entreprise. Ce dernier considérait que les entreprises peuvent adopter soit une approche dite d'*exploitation* (ou de recherche locale) qui consiste à réutiliser les connaissances de l'organisation pour concevoir de nouveaux produits ; soit, les entreprises peuvent adopter une approche dite d'*exploration* (ou de recherche distante) par l'acquisition de connaissances radicalement nouvelles pour l'organisation. On appelle alors base de connaissances (ie. *knowledge base*) les connaissances

maîtrisées par l'organisation (Grant, 1996). Fleming (2001) donne plusieurs exemples d'inventions issues du processus combinatoire :

« One might think of the automobile as a combination of the bicycle, the horse carriage, and the internal combustion engine. The steam ship can be characterized as combining the boat with steam power. Similarly, one might consider the microprocessor to be a conjunction of a computer's central processing unit with integrated circuit fabrication processes » (Fleming et Sorenson, 2001, p. 1020)

Ici, les capacités de développement de nouveaux produits résident dans la capacité de la firme ou de l'inventeur à combiner ces connaissances (Kogut et Zander, 1992) qui ont alors une structure particulière (Yayavaram et Ahuja, 2008 ; Yayavaram et Chen, 2015). Mais dans ces conceptualisations de l'invention, qu'en est-il des connaissances scientifiques ?

Dans une première approche, les connaissances scientifiques, de par leur nouveauté, sont assimilées à des connaissances distantes d'un inventeur ou d'une organisation : l'enjeu devient donc celui de leur internalisation. Ahuja et Lampert (2001) suggèrent par exemple que les grandes organisations font face à trois pathologies qui viennent freiner l'innovation : le piège de la familiarité (ie. les entreprises tendent à se focaliser sur le raffinement de leurs connaissances existantes plutôt que de développer de nouvelles les compétences), le piège des technologies matures (ie. les entreprises tendent à utiliser des technologies matures plutôt que nouvelles, comme celles récemment issues du monde académique), et le piège de la promiscuité (ie. les entreprises ont tendance à chercher à résoudre des problèmes à partir des connaissances existantes uniquement). Or, les auteurs démontrent que pour faire face à ces pièges, les industriels peuvent recourir à des technologies émergentes issues des travaux scientifiques les plus récents dans leur processus de développement de produits. En d'autres termes, combiner en ayant recours à des connaissances plus « lointaines » que constituent les connaissances scientifiques.

Dans une seconde approche, Fleming et Sorenson (2004) démontrent que les activités scientifiques permettent d'altérer la façon dont les inventeurs accèdent à des connaissances, combinées pour concevoir un artefact. Pour les auteurs, qui démontrent ces éléments à partir d'une analyse menée sur les brevets, trois mécanismes sont à l'œuvre : (1) par le recours aux activités scientifiques, l'inventeur est à même d'identifier des combinaisons des connaissances les plus intéressantes, (2) il évite de s'engager dans des voies de conception qui s'avèreraient laborieuses et peu prometteuses, (3) il est encouragé à persévérer dans des voies prometteuses même lorsqu'il reçoit des premiers feedbacks négatifs sur la pertinence d'une combinaison.

Ainsi, les activités scientifiques permettent une « cartographie » (Fleming et Sorenson, 2004, p. 909) des connaissances en mettant en exergue les combinaisons potentiellement les plus prometteuses. Roach et Cohen (2013) ont montré par exemple en quoi les connaissances scientifiques facilitent les prédictions pour des prototypes à succès, et diminuent les besoins d'itération empirique par le recours à la modélisation.

Ainsi, nous pouvons conclure sur les apports de cette littérature :

Apport littérature 1.1. : Dans la perspective combinatoire (dominante dans la modélisation de l'invention), les activités scientifiques s'envisagent au travers de leur « produit de sortie » : les connaissances scientifiques, qui sont combinées avec d'autres types de connaissances pour concevoir des produits, des procédés ou des services nouveaux. Or, les connaissances scientifiques ont des propriétés particulières : elles permettent soit des combinaisons nouvelles, soit de faciliter le processus de combinaison lui-même.

Si ces particularités liées aux activités scientifiques semblent prometteuses, peut-on en mesurer l'ampleur et l'effet sur les inventions ?

2.2. Effets de la science sur la qualité de l'innovation dans la perspective combinatoire

La perspective de l'innovation combinatoire a conduit à de nombreuses études empiriques qui permettent d'évaluer à grande échelle les régimes d'invention en fonction du degré et des types de combinaisons, mais aussi d'évaluer les effets de ces combinaisons sur la « qualité » des inventions. Ainsi ces apports empiriques nous semblent d'intérêt pour discuter plus spécifiquement le rôle des connaissances scientifiques dans ces différents régimes d'invention, en lien avec la performance desdites inventions. Mais revenons d'abord sur les méthodologies employées par les auteurs qui contribuent à ce champ de recherche.

Ici, deux types de qualité des inventions sont principalement analysés. Premièrement, la *valeur* (économique) de l'invention, souvent mesurée à partir de la puissance de diffusion de l'invention dans un écosystème donné. Deuxièmement, sa *nouveauté* (ou radicalité), soit la capacité de rupture apportée par l'invention par rapport à l'existant. Soulignons ici que pour expliciter ces effets de façon empirique, un proxy particulier a été abondamment plébiscité : le brevet d'invention. En effet, le brevet présente trois caractéristiques particulières qui permettent ce type d'analyse. Premièrement, il décrit par nature une invention puisque si accepté par un Office de brevet (comme l'Office Européen des Brevets ou l'INPI en France depuis 2020) après un processus d'examen approfondi, cela signifie d'après les critères de brevetabilité qu'il est

(1) le résultat d'un processus inventif et (2) qu'il est strictement nouveau. Deuxièmement, les brevets sont classifiés lors du processus d'examen dans les Offices selon des classes technologiques, c'est-à-dire une méthode d'analyse particulièrement normée et structurée comme la *Classification Internationale des Brevets (IPC)*³⁸. Or, les codes IPC³⁹ ont été largement utilisés comme des proxys des connaissances des entreprises, facilitant alors la mise en œuvre d'analyses combinatoires. Enfin, troisièmement, la granularité fine des données de brevets et leur accès aisé (elles sont mises à disposition par les Offices) facilitent l'analyse (voir par exemple Jefferson *et al.*, 2018).

En utilisant ces indicateurs, Strumsky et Lobo (2015) ont par exemple conduit une vaste analyse longitudinale entre 1830 et 2014 à partir des données de demandes de brevets déposés à l'Office américain (USPTO). Pour opérationnaliser les logiques d'inventions combinatoires, les auteurs recourent aux codes IPC et distinguent quatre catégories d'invention : (1) *Création* (ie. *origination*), si aucun des codes IPC d'un brevet n'a été utilisé auparavant dans un autre brevet, (2) *Combinaisons nouvelles* (ie. *novel combination*), si au moins un code IPC n'a jamais été utilisé auparavant, (3) *Combinatoire* (ie. *combination*), si au moins une paire de codes IPC⁴⁰ n'a jamais été utilisée auparavant et enfin (4) *raffinement* (ie. *refinement*) si toutes les combinaisons et codes IPC ont déjà été utilisés auparavant. Les données empiriques de leur étude sont résumées dans la Figure 9 ci-dessous qui représente les évolutions des différentes catégories à travers le temps.

³⁸ Voir Encadré 16

³⁹ Nous parlerons généralement par la suite simplement d'IPC plutôt que de codes IPC.

⁴⁰ Par exemple, si le code A01A – A01B est utilisé pour la première fois

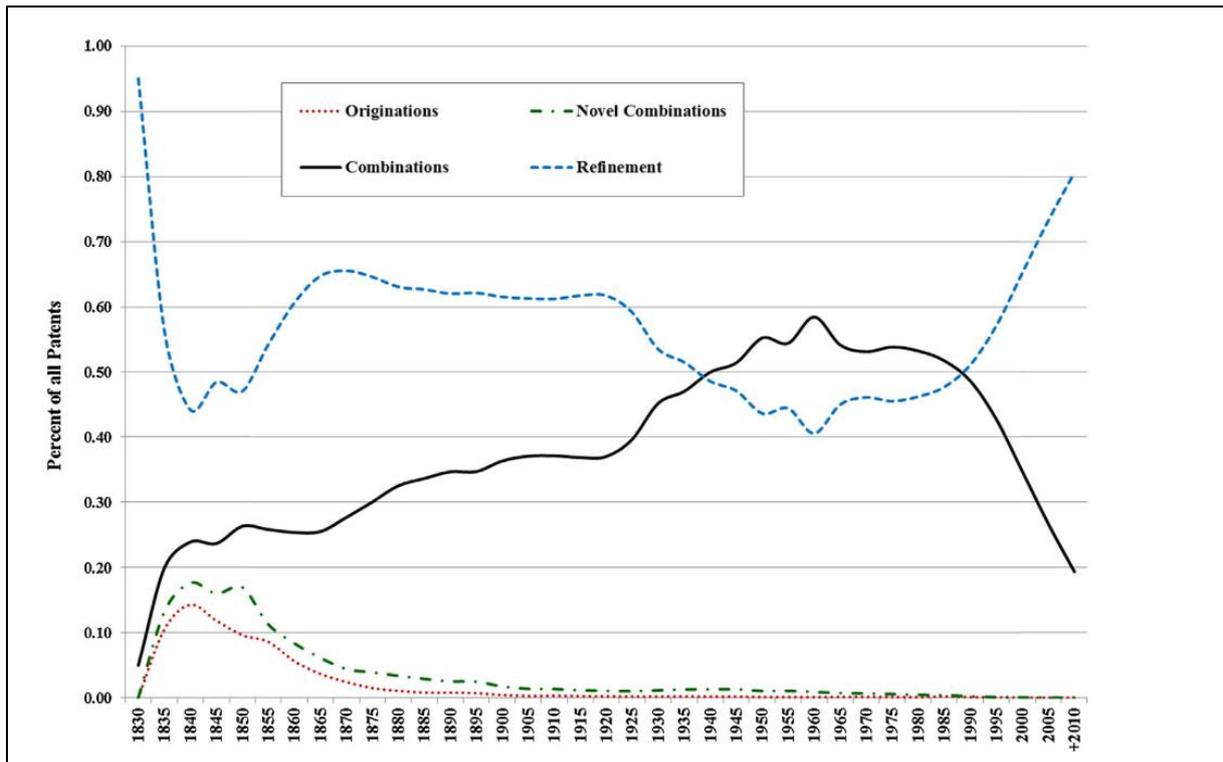


Figure 9 - Évolution de l'invention combinatoire (source : Strumsky et Lobo, 2015)

Cette figure permet de discuter la variété des régimes d'invention à travers le temps, et plus précisément le rôle des connaissances scientifiques dans ceux-ci. En particulier, les auteurs montrent qu'à partir des années 1990, la plupart des inventions sont dites de raffinement (80% en 2010) et incluent même rarement des combinaisons nouvelles (19%) alors que les inventions fondées sur des connaissances nouvelles sont extrêmement rares. Cela signifie que les inventions qui se fondent sur des savoirs radicalement nouveaux - comme peuvent l'être des percées scientifiques - et qui permettraient la création de codes IPC nouveaux (prenons ici l'exemple du graphène) sont devenues relativement marginales⁴¹. Ce premier niveau d'analyse tendrait à postuler une diminution du rôle des connaissances scientifiques dans les inventions. Mais n'est-il pas possible d'utiliser des méthodes plus sophistiquées pour évaluer le rôle des connaissances scientifiques ?

Il est en effet possible de décrire plus précisément le rôle joué par les connaissances scientifiques dans ces régimes. En particulier, soulignons que lors des demandes de dépôt de brevet, l'inventeur (ou l'examinateur) doit démontrer (ou juger) la nouveauté de l'invention par

⁴¹ Soulignons toutefois l'explosion du nombre de dépôts de brevet sur la période qui nous amène à relativiser ces effets

rapport à d'autres brevets, mais peut aussi justifier sa démarche à partir de sources académiques en relation avec invention, on parle alors de *Scientific Non Patent Literature* (SNPL). En utilisant cette métrique, Verhoeven, Bakker et Veugelers (2016) définissent une typologie d'invention différente de celle de Strumsky et Lobo (2015). Ils distinguent les brevets fondés sur (1) la nouveauté combinatoire (ie. *novelty in recombination*) lorsqu'un brevet contient au moins une combinaison de codes IPC nouvelle, (2) la nouveauté technologique (ie. *novelty in technological origins*) lorsqu'un brevet contient au moins une combinaison de codes IPC nouvelle dans les IPC du brevet focal, avec les IPC de tous les brevets qui le cite (ie. *patent backward citation*)⁴², et (3) la nouveauté scientifique (ie. *novelty in scientific knowledge*) lorsqu'un brevet contient une paire de codes IPC avec un code Web of Science (une méthode de classification des articles scientifiques) d'un article scientifique cité dans le brevet (ie. SNPL). Le recours au SNPL constitue un proxy particulièrement intéressant des liens entre science et industrie, mais du fait de complexité dans la structuration de ces données, elles n'ont été que très tardivement exploitées (voir à ce sujet notamment Marx et Fuegi, 2020). Sur la période 1980 – 2011, Verhoeven, Bakker et Veugelers (2016) montrent que 7% des familles de brevets déposés dans les Offices américains (USPTO), européens (EPO) et à l'Organisation Mondiale de la Propriété Industrielle (OMPI) sont des inventions à nouveauté combinatoire, 22% sont des inventions à nouveauté technologique et 11% relèvent de la nouveauté scientifique. Ainsi la méthodologie utilisée par Verhoeven, Bakker et Veugelers (2016) permet de mettre en exergue qu'une part limitée des inventions se fondent sur un ressourcement scientifique nouveau. Comme dans les théories de l'innovation ouverte (Chesbrough, 2003), les connaissances scientifiques constituent une voie parmi d'autres (consommateurs, fournisseurs, concours externes, etc.) pour nourrir le processus créatif qui va permettre de concevoir des produits nouveaux.

Néanmoins, Fleming *et al.* (2019) montrent que les entreprises sont de plus en plus dépendantes de la recherche scientifique, en particulier financée par les fonds publics. Pour cela, ils adoptent une perspective moins restrictive que les SNPL uniquement en analysant les brevets des entreprises qui comportent (1) des citations SNPL d'articles scientifiques dont les financements sont associés à des fonds publics de recherche américains (type *National Science Foundation*, Département de la Défense), (2) et/ou le brevet indique avoir bénéficié d'un

⁴² Par exemple, si le brevet focal contient la classe IPC A01A et qu'un brevet ultérieur qui le cite contient la classe A01B et que la combinaison A01A – A01B n'a jamais été utilisée auparavant entre brevets focaux – brevets citants, alors l'invention sera dite de « nouveauté technologique »

financement ou d'une collaboration de recherche liée à des fonds publics de recherche américains, (3) et/ou le brevet cite un brevet issu de ce type de recherche, (4) et/ou le brevet est possédé par le gouvernement américain. Ils montrent qu'aujourd'hui, 35% des demandes de brevets déposés par les entreprises dépendent des fonds publics américains dédiés à la recherche et que cette part a nettement augmentée de puis l'après Seconde Guerre Mondiale⁴³ (voir Figure 10). En particulier, ce phénomène touche aussi bien les grands groupes que les start-up (34% de l'échantillon).

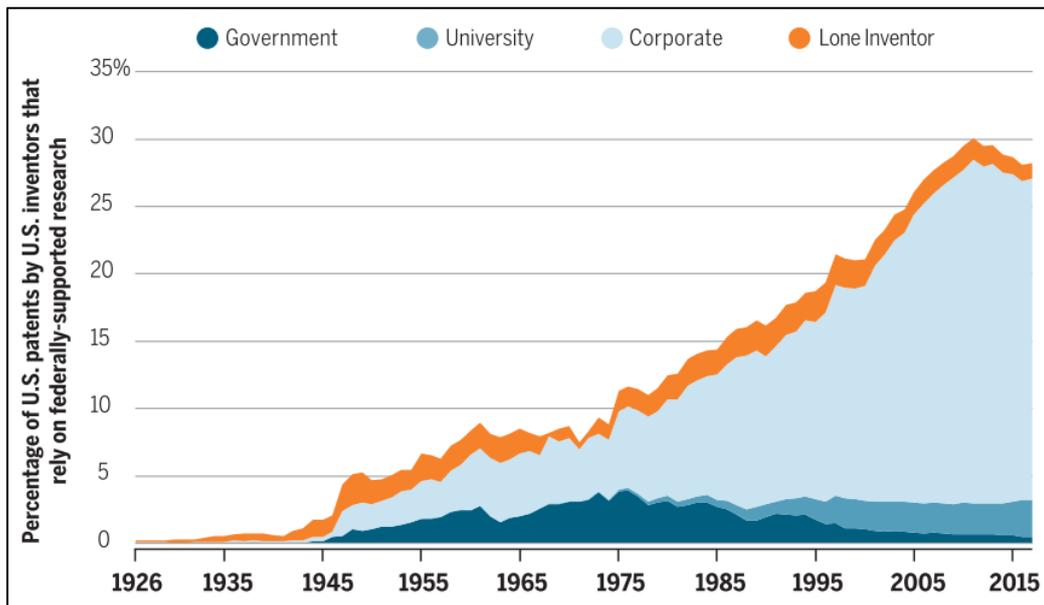


Figure 10 - Évolution de la part des brevets américains basés sur des recherches sponsorisées par le gouvernement US (source Fleming et al., 2019)

Ainsi, si les inventions qui se basent sur des connaissances scientifiques issues de travaux académiques ne sont pas dominantes dans le paysage de l'invention, malgré une augmentation sur la dernière période en prenant des indicateurs plus larges, est-ce que pour un inventeur, se baser sur les dernières découvertes scientifiques favorise la « qualité » des inventions ?

Fleming et Sorenson (2004) montrent que les brevets qui utilisent des connaissances scientifiques antérieures (ie. SNPL) enregistrent en moyenne davantage de citations postérieures par d'autres brevets. Soulignons ici que l'utilisation des citations postérieures par d'autres brevets est un indicateur usuel de la valeur de l'invention, représentatif de sa diffusion

⁴³ Notons que les dépenses en recherche fondamentale aux Etats-unis (de l'État principalement, mais aussi des entreprises) ont été multipliées par 5 entre 1970 et 2010. Pourtant, le fait que les entreprises soient plus dépendantes des travaux de recherche scientifique financés par l'État aurait pu être un phénomène décorrélé.

(pourtant soumis à de nombreux biais, sur ce sujet voir Jaffe et de Rassenfosse, 2010). Mais au-delà de la simple valeur, se pose aussi la question du degré de nouveauté des inventions. Bien sûr, les logiques d'exploration et d'exploitation constituent deux dimensions qui semblent s'opposer sur la qualité des inventions : l'exploration favoriserait la nouveauté en impactant négativement la valeur, et inversement l'exploitation favoriserait la valeur au détriment de la nouveauté (Fleming, 2001). Arts et Fleming (2018) démontrent à partir de données brevets que lorsqu'un inventeur investit un champ de connaissance nouveau par rapport à ses connaissances préexistantes (mesuré par les codes IPC), le recours à la science (ie. brevets avec SNPL) permet (1) de limiter la diminution de la valeur de l'invention inhérente à l'exploration d'un champ nouveau et (2) d'accroître la performance de nouveauté. Par ailleurs, Poege *et al.* (2019) en utilisant un algorithme de « *matching* » de 43 millions de publications scientifiques avec 4,8 millions de familles de brevets sur la période 1980 – 2019 démontrent une corrélation positive entre la qualité de la publication scientifique (mesurée en termes de citations scientifiques) et la qualité de l'invention dans laquelle la publication scientifique est citée (SNPL). En classifiant les brevets en fonction de la qualité des articles scientifiques cités, les auteurs montrent que les 10% des brevets citant les articles scientifiques les plus qualitatifs ont une valeur deux fois plus élevée que les brevets ne citant pas d'article scientifique. Fleming *et al.* (2019) montrent enfin que les brevets des entreprises qui s'appuient sur des travaux de recherche financés par les fonds de recherche publics américains (voir paragraphe ci-dessus) ont également une valeur plus élevée. Par exemple en 2010, ces brevets ont reçu en moyenne 6,33 citations de brevets sur une fenêtre de 5 ans contre 4,42 pour les autres brevets. Enfin, Cassiman et Veugelers (2006) démontrent également que les firmes qui investissent le plus en recherche (mesuré cette fois selon la part d'investissement en R&D dans le chiffre d'affaires) déposent des demandes brevets qui en moyenne reçoivent plus de citations en comparaison avec les autres firmes. Plus largement, et au-delà de la mesure de la valeur de l'invention uniquement, Basse Mama (2018) montre que les entreprises qui recourent davantage à la science dans leur processus d'inventions (mesuré en SNPL) sont plus profitables à long terme (soit un autre proxy des nouveaux produits, plus éloigné) et cet effet augmente avec le temps (mesuré par la valeur boursière de l'entreprise).

Ainsi, qu'avons-nous montré en adoptant la perspective combinatoire ? Les résultats sont mis en exergue ci-après :

Apport littérature 1.2. : Dans la perspective combinatoire, les connaissances scientifiques constituent une source possible pour alimenter le raisonnement créatif de l'inventeur. Pourtant, cette source n'est pas majoritaire dans le panorama global de l'invention, mais le recours aux connaissances scientifiques semble de plus en plus fréquent, et ces inventions enregistrent des performances en termes de valeur et de qualité plus élevées (comparativement aux autres inventions non basées sur la science). Le produit des activités scientifiques a donc un impact positif direct sur les activités de développement de produits, procédés et services.

Il faut souligner ici les limites de ces résultats : les brevets, les IPC et les SNPL ne sont bien sûr que des indicateurs imparfaits, et ces résultats en ce qui concerne les performances sont des moyennes qui peuvent cacher une forte hétérogénéité. Il devient nécessaire dès lors de discuter des enjeux managériaux associés au rapport causal entre activités scientifiques et activités de développement de nouveaux produits.

2.3. Les enjeux managériaux de l'innovation par la science

Ainsi, nous avons montré dans la section précédente, comment nous pouvions conceptualiser à partir de la littérature sur l'innovation combinatoire, l'effet des connaissances scientifiques nouvelles sur l'innovation. Nous avons évoqué dans le Chapitre 1 que cette capacité à acquérir et développer des savoirs scientifiques est essentiel pour l'innovation (voir par exemple, Baba, Shichijo et Sedita, 2009 ; Cockburn et Henderson, 1998 ; Comin *et al.*, 2018 ; Lacetera, 2009 ; Owen-Smith et Powell, 2004 ; Zucker, Darby et Armstrong, 2002). Pourtant, nous avons aussi pointé du doigt les difficultés des firmes à acquérir ces connaissances scientifiques (transfert OPR-entreprise) et à pouvoir les exploiter pour la conception de produits innovants nouveaux. Nous discutons ces enjeux notamment en nous appuyant sur des avancées théoriques qui permettent de décrire la gestion de l'identification, l'assimilation et l'usage de connaissances scientifiques dans le cadre du développement de nouveaux produits, procédés ou services, soit les théories de la capacité d'absorption (ie. *absorptive capacity*).

La capacité d'absorption issue des travaux de Cohen et Levinthal (1989) peut être définie comme telle :

« *Absorptive capacity refers to one of a firms' fundamental learning processes: its ability to identify, assimilate and exploit knowledge from the environment. These three dimensions encompass not only the ability to imitate other firms' products or processes but also the ability to exploit less commercially focused knowledge, such as scientific research.* » (Lane *et al.*, 2006, p. 833).

Compte tenu des ressources limitées de l'entreprise, celle-ci est contrainte de développer sa capacité d'absorption seulement sur quelques sujets clés en fonction de sa stratégie, de la facilité avec laquelle la thématique peut-être apprise et protégée, et des effets escomptés en matière de retours commerciaux et d'application dans les produits, procédés ou services. Pourtant, si les travaux de recherche en sciences de gestion se sont focalisés sur la façon d'identifier des connaissances intéressantes pour l'entreprise, les réflexions sur le processus de développement et d'implémentation de ces connaissances scientifiques dans de nouveaux produits, procédé ou service sont restées relativement limitées :

« The focus on R&D and knowledge acquisition also has led to an overemphasis on being able to understand the technological and scientific knowledge the firms needs to acquire at the expense of the process knowledge needed to assimilate and apply it. Not only does this ignore two-thirds of Cohen and Levinthal's definition of the construct, but it overlooks the process/capability aspect of absorptive capacity. » (Lane et al., 2006, p. 852)

Pourtant, mieux comprendre la manière dont les firmes sont capables d'assimiler et de capitaliser sur les connaissances scientifiques constitue un enjeu important pour faciliter les couplages entre les activités de recherche scientifique et les activités de développement de nouveaux produits. Or, l'essor de l'innovation ouverte semble avoir conduit à mettre l'accent sur la manière dont les entreprises identifient des connaissances externes, impliquant de considérer les connaissances scientifiques comme une source de connaissances externes parmi d'autres (fournisseurs, consommateurs, etc.). On soulignera ici que la littérature sur la capacité d'absorption semble rejoindre ici des questionnements sur les difficultés d'exploitation des résultats des travaux de R&D menés en interne par les entreprises (Zahra, Kaul et Bolívar-Ramos, 2018) : la manière dont une connaissance scientifique acquise dans l'entreprise est utilisée in fine dans la production d'un produit nouveau interroge.

Revenons ici d'abord sur les difficultés d'intégration, d'assimilation et d'exploitation de connaissances scientifiques auxquelles font face les firmes. Pour illustrer ces difficultés, partons notamment des travaux de Arora, Belenzon et Pataconi (2018). En utilisant les brevets et les SNPL (voir ci-dessus), les auteurs montrent par exemple que si la part des brevets qui citent des articles scientifiques a fortement augmenté sur la période 1980 - 2006, la période entre la date de soumission du brevet à l'office et la date de la publication scientifique SNPL citée est restée stable : environ 10 ans (voir Figure 11). Or, cette période semble relativement longue en comparaison des besoins d'innovation des entreprises pour rester compétitives sur leurs segments de marché.

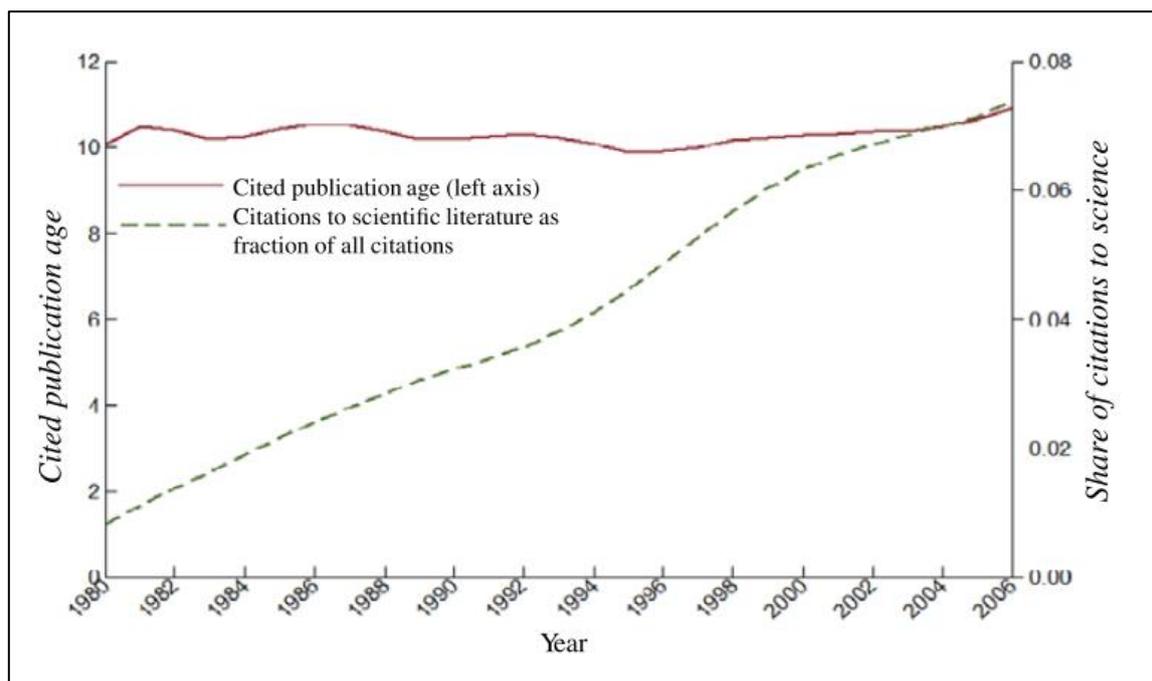


Figure 11 - Ecart entre date de publication SNPL et date de dépôt du brevet (source Arora et al., 2018)

Ainsi, l'assimilation de ces connaissances scientifiques et leur intégration dans les processus de développement de nouveau produit ne semble pas une tâche aisée. Premièrement, les connaissances scientifiques nouvelles sont complexes et non totalement codifiées ce qui limite leur assimilation par les entreprises (Zucker, Darby et Armstrong, 2002). Agrawal (2006) par exemple considère que les connaissances issues de la recherche fondamentale sont « latentes » (Agrawal, 2006, p. 63) : elles sont tacites, mais peuvent être codifiées. Deuxièmement, les travaux de recherche issus des OPR sont conduits en écho avec la recherche fondamentale, y compris lorsqu'il s'agit de sous-traitance par des industriels (Lacetera, 2009) rendant l'assimilation de ces travaux plus difficiles pour l'entreprise : elles doivent faire l'effort de passer outre les divisions institutionnelles et les normes de gestion différentes (Gittelman et Kogut, 2003). Ce manque de proximité institutionnelle conduit à des comportements, des codes, des métriques d'évaluation qui sont différentes et rendent les interactions ardues (Crescenzi, Filippetti et Iammarino, 2017). Troisièmement, la distance cognitive entre entreprises et OPR peut rendre complexe le transfert de connaissances (Nooteboom *et al.*, 2007), d'autant que les effets cognitifs de dépendance au sentier peuvent conduire à limiter l'identification de connaissances qui s'avèreraient pertinentes (Agogué, 2012 ; Sydow, Schreyögg et Koch, 2009 ; Thrane, Blaabjerg et Møller, 2010).

Mais comment faire face à ces difficultés d'absorption des connaissances scientifiques par les entreprises ? La littérature discute plusieurs mécanismes.

Premièrement, pour Jensen et Thursby (2001) et Agrawal (2006), un plus grand degré de complexité des connaissances scientifiques (y compris celles publiées dans des revues académiques) nécessite une plus grande implication des chercheurs pour permettre l'assimilation et l'exploitation de celles-ci dans un contexte industriel. Cet enjeu est d'autant plus grand pour des connaissances scientifiques radicalement nouvelles et complexes (Zucker, Darby et Armstrong, 2002) et nécessite de créer des liens forts entre les institutions qui produisent les savoirs scientifiques et celles qui cherchent à les développer (David et Dasgupta, 1994 ; Gittelman et Kogut, 2003), notamment par le biais de partenariats de recherche (Belderbos, Carree et Lokshin, 2004 ; Veugelers et Cassiman, 2005). Deuxièmement, pour les théoriciens de la capacité d'absorption, le développement de capacités de recherche fondamentale alimente la capacité des firmes à sélectionner les connaissances scientifiques externes dont elles sont les mieux à même de tirer parti (Cohen et Levinthal, 1989 ; Veugelers et Cassiman, 2005). Pour ces auteurs, compte tenu de la complexité des connaissances scientifiques, mais aussi de leur production en masse, le développement de capacités de recherche permet de mieux repérer les connaissances scientifiques les plus pertinentes pour l'organisation, d'être davantage connecté aux réseaux de chercheurs les plus à même d'aiguiller les firmes vers les travaux pertinents. Par conséquent, cette capacité renforcée d'identification des connaissances scientifiques les plus intéressantes conduit à une accélération des processus de développements de produits (Fabrizio, 2009 ; Laursen et Salter, 2006) : la capacité à combiner efficacement les connaissances est renforcée. De plus, les connaissances scientifiques acquises par l'entreprise peuvent servir en parallèle différents projets plus appliqués (Henderson et Cockburn, 1996). Troisièmement, le management de l'expertise dans les organisations peut permettre d'organiser et de piloter le processus d'intégration des connaissances scientifiques nouvelles⁴⁴. Comme le souligne Cabanes (2017), les termes de « chercheurs », « scientifiques » et « experts » sont souvent interchangeables dans les entreprises industrielles. Ici, la frontière entre développement de connaissances scientifiques et développement de produits devient plus floue. Les organisations doivent également renouveler

⁴⁴ « Dans un contexte organisationnel, le concept d'expertise correspond aux savoirs, savoir-faire et savoir-être détenus par les individus membres de l'organisation. Cette notion est principalement utilisée dans la littérature en gestion des ressources humaines pour mettre en évidence la figure de l'expert, désignant un membre du personnel technique qui est reconnu par l'entreprise en tant que professionnel détenant un haut niveau de connaissance. » (Cabanes, 2017, p. 13).

leur expertise pour innover. En effet, Hall et Andriani (2003) indiquent que l'innovation conduit à la fois à une extension des domaines d'expertises préexistants à l'organisation, mais aussi à l'apparition de nouveaux domaines d'expertises pour soutenir l'exploration. Cabanes, Le Masson et Weil (2020) confirment ce résultat en analysant 386 thèses de Conventions Industrielles de Formations à la Recherche (CIFRE) en France sur une période de 12 ans chez un industriel des semi-conducteurs. Ils montrent que le ressourcement scientifique par le biais de ces thèses conduit à un renouvellement systématique et continu des expertises de l'organisation. De plus, Cabanes (2017) et Cabanes, Le Masson et Weil (2020) proposent en s'appuyant sur le concept de communauté épistémique (voir par exemple Cohendet, Créplet et Dupouët, 2003), de recourir à des « sociétés proto-épistémiques d'experts », communautés d'experts responsables du pilotage de l'émergence d'expertises scientifiques nouvelles en lien avec la conduite d'explorations sur des sujets à long terme pour l'organisation. Compte tenu du rapprochement des entreprises (à minima, dites « sciences based ») avec la frontière scientifique (Arora, Belenzon et Pataconi, 2018), la dimension scientifique de l'expertise et son management deviennent des enjeux clés de l'organisation de l'innovation.

Ainsi, que nous apprennent ces éléments sur le management de la science pour favoriser l'innovation ?

Apport littérature 1.3. : L'intégration, l'assimilation et l'exploitation de connaissances scientifiques issues des activités de recherche est difficile dans les entreprises. Cela s'explique notamment par des ressources limitées et la nature même de ces connaissances. Ainsi, le lien entre nouvelles connaissances scientifiques et nouveau produit, procédé ou service n'est pas mécanique. Pour faire face à ces difficultés, la construction de liens forts entre OPR et entreprise, et le management de l'expertise constituent deux leviers privilégiés.

Ainsi, nous terminons ici cette partie d'analyse de la littérature que nous synthétiserons et dont nous présenterons les limites en fin de Chapitre. Nous explorons dès lors la littérature sur les effets des activités de développement de nouveaux produits sur les activités scientifiques.

3. Effets causaux des activités de développement de nouveaux produits sur les activités de recherche scientifique

Dans la section précédente, nous nous sommes interrogés sur la relation de causalité entre activités de recherche scientifique et activités de développement de nouveaux produits. Les effets causaux des activités de développement de produits, procédés et services sur les activités

de recherche scientifique semblent moins évidents : cet un aspect de la littérature qui reste peu exploré. Ici, nous montrons que ces effets peuvent être conceptualisés comme une interférence du développement sur la science, ou une hybridation. Sur cette base, nous discuterons des effets empiriques sur la qualité et la productivité scientifique du couplage avec le développement, et de l'ampleur de ces effets. Enfin, nous évoquerons la nature des éléments qui peuvent influencer ce phénomène et la façon de les piloter.

3.1. La difficile conceptualisation des effets des activités de développement de nouveaux produits sur la science

Sauf rares exceptions (voir Encadré 4), la question de l'effet des activités de développement de nouveaux produits sur les activités scientifique est restée relativement ignorée par les sciences de gestion (et les décideurs politiques) jusque dans les années 1980. Si un tournant s'amorce à cette période, c'est que le rapprochement entre OPR et industriels (développement de la recherche partenariale, Bayh Dole Act, etc.) appelle à un renouveau théorique de cette relation causale. Pour discuter de ces éléments, nous évoquons d'abord les thèses qui présentent ce rapprochement comme une interférence néfaste pour la production scientifique, avant de discuter plus en profondeur la conceptualisation de ceux qui prônent l'hybridation de la science et de la société (incluant les industriels) et donc des activités de développement de produits nouveaux.

Encadré 4 - Henri Le Chatelier et l'organisation de la science

Henry Le Chatelier (1850 – 1936) est un chimiste français reconnu notamment pour son travail sur l'aluminium et son engagement pour l'organisation de la science dans les années 1920-1930.

Henry Le Chatelier s'intéresse d'abord à des questions de recherche fondamentale sur les matériaux et dispose pour cela par exemple de deux laboratoires à la fois à l'Ecole des Mines et au Collège de France (Le Masson and Weil, 2016). Pourtant, ces travaux sont menés en étroite relation avec des industriels : sa thèse de doctorat est menée de concours avec Lafarge, il dirigera plus tard les travaux de thèse de Léon Guillet fondateur du laboratoire de l'industriel de l'automobile Dion-Bouton (Le Masson and Weil, 2016). Or, c'est avec cette conception de la recherche que Le Chatelier prend part aux débats sur la définition de la recherche française. Il défend notamment une logique de science dirigée vers les besoins industriels et s'inscrira dans une forte lutte d'influence avec Jean Perrin, pour définir la logique de fonctionnement d'un nouvel institut national dédié à la recherche qui deviendra en 1939, le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). Toutefois, Jean Perrin défend un autre courant qui s'est établi au début du 20^{ème} siècle de pair avec la professionnalisation des activités scientifiques : il œuvre pour une science désintéressée et autonome des besoins industriels. Soulignons ici que si Henri Le Chatelier voit indéniablement dans l'intérêt d'une science dirigée vers l'industrie un impératif économique et politique, il décrit aussi cette dernière comme porteuse de progrès scientifiques. Il écrit par exemple :

« Méconnaître ainsi l'influence bienfaisante des préoccupations pratiques sur le développement des sciences, c'est nier toute l'histoire de la Science, compromettre gravement ses progrès ultérieurs et porter un préjudice sérieux au développement même de l'industrie, par suite à la richesse, à la puissance de notre pays. Si la méthode de travail consistant à prendre comme sujet d'étude des problèmes d'utilité pratique a été profitable à des savants comme Lavoisier, Sadi Carnot, Sainte-Claire Deville, Pasteur, combien plus profitable encore doit-elle être aux esprits de moins grande envergure et surtout aux débutants. » (Le Chatelier, 1947 Chapitre X, cité dans Lamy, 2006, p. 18)

Henri Le Chatelier et Jean Perrin étaient engagés dans une dispute profonde, avec deux visions profondément opposées de ce que devrait être la recherche. Pour l'un nécessairement dirigée vers l'industrie et au service de l'Homme, pour l'autre favorisant l'accumulation désintéressée de la connaissance. Leur combat rhétorique s'achève tragiquement à la mort d'Henri Le Chatelier. Lors d'un discours solennel en sa mémoire le 24 avril 1937, Jean Perrin indiquera alors :

« [Henry Le Chatelier] protestait avec énergie contre la recherche qui n'est pas guidée par des problèmes posés d'un point de vue pratique. Ici encore, tout en reconnaissant l'importance immense de la science appliquée, je crois devoir faire des réserves quant à la généralité des directives proposées par Le Chatelier et je dois maintenir, malgré toute son autorité, que si la science appliquée doit en effet prendre toute l'ampleur qu'il désirait, c'est pourtant de la science pure, poursuivie sans préoccupation d'utilité, que jaillissent toujours les mêmes résultats pratiques les plus utiles » (Jean Perrin cité dans Eidelman, 1988, p. 120)

3.1.1. Le rapprochement OPR – entreprise comme injonction perturbatrice sur le système vertueux de l'académie

Pour certains auteurs, les activités de développement de nouveaux produits sont conceptualisées comme perturbatrices des activités de recherche scientifique : elles conduiraient à réduire la vitesse de circulation des connaissances scientifiques, puis au-delà, à changer l'agenda même de la recherche. Or, pour Merton (1973), la communauté scientifique fonctionne sur une logique de reconnaissance de la priorité d'une découverte. En d'autres termes, un chercheur est « rétribué » par un gain sur le plan de la réputation lui permettant d'obtenir une place prépondérante dans le système collégial lié à son champ (Aghion, Dewatripont et Stein, 2008). C'est donc cette compétition pour la primauté des découvertes scientifiques qui assure la dynamique scientifique à long terme en favorisant à la fois, la poursuite de découvertes, et la dissémination rapide des connaissances dans la communauté (David et Dasgupta, 1994). La diminution de la vitesse de circulation des connaissances scientifiques dans la recherche académique conduirait donc à des effets scientifiques désastreux à long terme.

Premièrement, la diminution potentielle de la circulation des connaissances scientifiques pourrait être liée au développement du secret, une conséquence du rapprochement entre OPR et industriels. Traditionnellement, la recherche académique fonctionne sur la base d'un régime de circulation rapide des connaissances par la publication dans des revues à comité

de lecture (Merton, 1973). Or, pour des raisons de brevetabilité et de concurrence, les entreprises pourraient limiter les droits des OPR à diffuser les résultats de leurs propres travaux de recherche scientifique au sein de l'académie pour faciliter les relations de transfert de connaissances ou de recherche partenariale. Blumenthal *et al.* (1996) dans une étude quantitative comparative démontrent une augmentation forte de l'usage de pratiques contractuelles visant à restreindre les publications des OPR depuis les années 1980 dans la recherche partenariale, y compris au-delà des délais nécessaires au dépôt d'un brevet pour l'entreprise. Comme l'indiquent les auteurs :

« The data presented here indicate that, at least on the basis of reports by industrial concerns, such higher levels of secrecy result in part from the policies and expectations of industrial partners in research. Furthermore, the information withheld in the course of research relationships may involve findings of general interest to academic colleagues, including those useful in repeating and confirming the work. » (Blumenthal et al., 1996, p. 372)

Par ailleurs, les auteurs fournissent une analyse quantitative de ce phénomène en indiquant que 82% des firmes interrogées demandent aux chercheurs de ne pas dévoiler tout ou partie des résultats scientifiques pour permettre le dépôt d'un brevet, et que 56% requièrent même une extension du secret au-delà du dépôt. D'autres études plus récentes comme celle de Thursby et Thursby (2002) ou Czarnitzki, Grimpe et Toole (2015) conduisent à des conclusions similaires. Ainsi, le développement de produits nouveaux conduit à interférer négativement avec les pratiques usuelles de la production de connaissances scientifiques.

Deuxièmement, la potentielle diminution de la vitesse de circulation des connaissances scientifiques peut être liée plus largement à la diffusion de pratiques et de normes issues des entreprises vers les OPR. Mowery *et al.* (2001) en cherchant à évaluer les effets du Bayh Dole Act sur les activités scientifiques suggèrent que ce sont les mécanismes de protection et de valorisation qui peuvent être responsables du ralentissement de la dissémination des travaux de la recherche académique (temps de rédaction des brevets y compris par les OPR, délais administratifs associés, etc.). Louis *et al.* (2001) indiquent que les chercheurs des universités plus proches de l'industrie (ie. plus orientés vers la commercialisation et le transfert) sont plus enclins à refuser à leurs pairs l'accès à certains résultats, outils ou méthodes de recherche. Shibayama, Walsh et Baba (2012) confirment ces résultats, en montrant que les chercheurs des OPR qui sont enclins à partager leurs résultats avec leurs pairs, le font désormais préférentiellement dans des logiques marchandes :

« More importantly, rather than simply arguing that academic entrepreneurship is associated with a divergence from Mertonian norms, this study shows a shift from unconditional sharing (generalized exchange) toward return-based sharing (direct exchange), which more closely resembles transactions in a market economy. » (Shibayama, Walsh et Baba, 2012, p. 77)

Ainsi, pour Owen-Smith (2003) ou Murray (2010), ces évolutions sont liées à une forme particulière d'hybridation entre les normes scientifiques et les normes de l'industrie.

Enfin, troisièmement, au-delà même de la diminution de la vitesse de circulation des connaissances scientifiques, des changements plus profonds de la conduite des activités scientifiques peuvent être observés du fait de l'accent mis sur la commercialisation de la recherche. D'une part, certains avancent que la commercialisation conduit à réorienter les travaux de recherche vers des objectifs plus appliqués (à défaut de travaux fondamentaux) qui comme nous l'avons montré au Chapitre 1, sont considérés moins vertueux pour des raisons de sérendipité (Slaughter, 1993 ; Slaughter et Campbell, 2002). Azoulay, Waverly et Toby (2009) par exemple, dans le cadre d'une étude sur 3 862 scientifiques dans les sciences de la vie montrent que le potentiel de commercialisation conduit les chercheurs à réorienter leurs travaux vers des questions de recherche plus intéressantes en termes de rétributions commerciales. Soulignons ici que les études divergent : par exemple Mowery *et al.* (2001) n'observent pas un tel changement dans leur étude sur le Bayh Dole Act. D'autre part, l'implication dans les activités de commercialisation peut conduire les scientifiques à diminuer leur productivité scientifique. Si ceux-ci devaient consacrer un temps important dédié à la recherche, ils doivent désormais s'impliquer dans la gestion contractuelle avec l'industriel, ou se consacrer à des activités de résolution de problèmes locaux pour les industriels (Goldfarb, 2008 ; Yusuf, 2008) : c'est un coût d'opportunité pour la recherche scientifique. Toole et Czarnitzki (2010) vont même jusqu'à parler de fuite des cerveaux au profit de l'industrie :

« These academic entrepreneurs devote significant time and cognitive effort to the firm, their contribution to academic knowledge accumulation is likely to be less—a potentially costly “brain drain” on the not-for-profit research sector » (Toole et Czarnitzki, 2010, p. 1599)

Ainsi, cette partie de la littérature se concentre sur les effets néfastes du rapprochement des OPR et des entreprises pour les activités de recherche scientifique. Ici, la conceptualisation de ces rapports se fait principalement par le prisme institutionnel (OPR vs. entreprises) et par le biais d'un modèle d'organisation de la science qui repose principalement sur les logiques Mertonniennes. Ce courant de recherche se construit en réaction aux changements qui s'opèrent

dans l'organisation de la recherche scientifique à partir des années 1980. Nous pouvons donc conclure sur les apports suivants :

Apport littérature 2.1. : Selon certains auteurs, l'exposition des chercheurs aux activités de développement de produits, procédés et services pourrait conduire à une diffusion des normes du secteur privé dans les activités de recherche scientifique (remplacement des normes « Mertonniennes », développement du secret, ralentissement de la vitesse de circulation des connaissances). Cela pourrait également conduire à changer le processus même de recherche scientifique, en réorientant les activités de recherche appliquée vers des questions d'intérêt commerciales uniquement. Ce pan de littérature suggère qu'à long terme, le couplage entre ces deux activités conduirait à une diminution de la productivité scientifique.

Pourtant, un autre pan de la littérature s'intéresse quant à lui aux apports potentiellement positifs sur les activités scientifiques du rapprochement des OPR avec l'industrie.

3.1.2. L'hybridation société - science comme catalyseur de la recherche scientifique

À partir des années 1990s, un renouveau théorique semble s'opérer dans lequel le rapprochement entre industriels et OPR pourrait avoir un impact positif sur les travaux scientifiques. On peut considérer que les travaux de Gibbons *et al.* (1994) et de Nowotny, Scott et Gibbons (2001) vont permettre un tournant avec le développement de la logique du « Mode 2 » de recherche. Soulignons que les thèses développées par ces auteurs vont se diffuser au-delà des cercles académiques et peuvent d'ailleurs plutôt s'apparenter à de la littérature grise, plutôt qu'à une publication académique à proprement parler. Ces deux modes peuvent être résumés ainsi (Gibbons *et al.*, 1994, synthèse du contenu présenté p. 1-19) :

- **Mode 1 de recherche :** la production des connaissances est caractérisée par un clivage entre science et société. La science est conduite principalement dans un cadre universitaire, dépend de logiques disciplinaires, avec des questions de recherche définies et pérennes, définies de manière autonome. C'est la logique de sociétés savantes, de la validation par les pairs promue par (Merton, 1973), avec très peu de contacts avec les entreprises.
- **Mode 2 de recherche :** la production de connaissances est caractérisée par un effondrement de la dichotomie entre science d'un côté, et société (et entreprises) de l'autre. Les pratiques scientifiques s'opèrent désormais dans « un contexte d'application » qui va conduire notamment à un éclatement disciplinaire, à favoriser

la transdisciplinarité et la création d'une diversité organisationnelle au-delà des OPR traditionnels.

Pour les auteurs, c'est bien sûr le mode 2 de recherche qui va petit à petit s'imposer sans pour autant considérer que le mode 1 va disparaître. Soulignons ici que cette conceptualisation de la recherche scientifique n'est pas dénuée de critiques (voir pour une revue détaillée : Lamy, 2006). En revanche ce qui nous intéresse ici c'est le cercle vertueux proposé pour la création de savoirs scientifiques dans le contexte d'application, que l'on pourrait rapprocher ici des activités de développement produit (bien qu'il ne s'y substitue pas totalement).

« The relevant contrast here is between problem solving which is carried out following the codes of practice relevant to a particular discipline and problem solving which is organised around a particular application. In the former, the context is defined in relation to the cognitive and social norms that govern basic research or academic science. Latterly, this has tended to imply knowledge production carried out in the absence of some practical goal. In Mode 2, by contrast, knowledge results from a broader range of considerations. Such knowledge is intended to be useful to someone whether in industry or government, or society more generally and this imperative is present from the beginning. »
(Gibbons *et al.*, 1994, p. 4)

La conceptualisation de Gibbons *et al.* (1994) permet de discuter l'intérêt d'une science tournée vers l'usage. On peut considérer que ces travaux vont être prolongés par Stokes (1997) dans son ouvrage *Pasteur's Quadrant*. Ici, Stokes repart plus simplement de la différenciation entre la recherche fondamentale - censée être pratiquée dans le cadre d'un paradigme de la curiosité (voir Chapitre 1) - et la recherche appliquée. Après avoir présenté un faisceau d'indices montrant que les deux catégories ne permettent pas de décrire la dynamique de la science, il propose de différencier d'une part la question de l'usage, de la question du degré de compréhension inhérente aux mécanismes de la nature nécessaire pour appréhender la question posée (ie. recherche fondamentale / appliquée). Il propose ainsi le tableau suivant (Figure 12) pour résumer sa pensée (Stokes, 1997, p. 73):

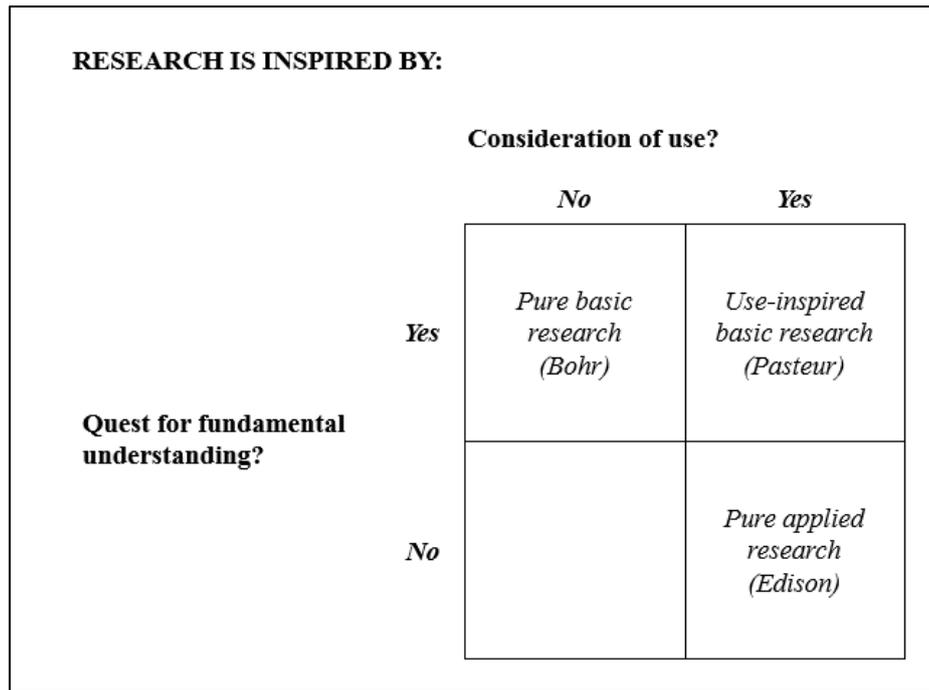


Figure 12 - Pasteur Quadrant (source : Stokes)

Le cadrant qui nous intéresse ici est celui de la catégorie « *use-inspired basic research* » soit la capacité du chercheur à explorer des questions de recherche fondamentale, mais en considérant l’usage de ces dernières. Stokes (1997) conceptualise ici cette catégorie à partir d’exemples : Louis Pasteur, mais aussi John-Meynard Keynes, le projet Manhattan, Irving Langmuir (Stokes, 1997, p. 74). Si Stokes n’évoque pas directement les travaux des industriels, il est tout à fait concevable que cet intérêt pour l’usage puisse être assimilé à celui d’un industriel souhaitant intégrer des connaissances scientifiques dans un produit, un procédé ou un service nouveau par exemple.

Cette logique d’hybridation s’est poursuivie y compris dans les années 2000 avec l’apparition de nouveaux modèles théoriques. En particulier, soulignons les influents modèles de la triple hélice (Etzkowitz et Leydesdorff, 2000), quadruple hélice et voire même quintuple hélice (Carayannis et Campbell, 2017 ; Miller, McAdam et McAdam, 2016). On pourrait également évoquer l’émergence de la notion de « *entrepreneurial university* » (Etzkowitz, 2003) qui considère les équipes de recherche universitaires comme une constellation de start-up engagées dans une compétition pour l’acquisition de fonds de recherche, comme une start-up recherche des fonds pour se lancer. Ici l’effet sur la science semble positif sans que l’on apporte d’éléments théoriques pour supporter cette hypothèse. Par exemple Etzkowitz (2003) indique :

« *Such interface organizations [entrepreneurial university] also play a reverse linear role in connecting the university to external problems, sources of knowledge and firms seeking academic resources.* » (Etzkowitz, 2003, p. 113)

Cette littérature nous permet donc de nous questionner plus en profondeur sur les effets potentiellement positifs sur la qualité de la recherche scientifique de ce rapprochement entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits. On peut résumer ainsi les apports de cette littérature :

Apport littérature 2.2. : Les travaux précurseurs de Gibbons & al. (1994) au travers du Mode de recherche N°2 et de Stokes (1997) au travers du *Pasteur Quadrant* notamment suggèrent une hybridation féconde entre sciences et industries, que nous pouvons reformuler comme une hybridation entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits, procédés ou services. En favorisant l'intérêt pour l'usage (ie. donc les produits, procédés ou services), il serait possible de développer des travaux de recherche fondamentale de rupture, sans pour autant que le mécanisme soit explicité dans ces travaux.

Notons ici que compte tenu du désinvestissement massif dans la recherche fondamentale par les industriels, la littérature s'est structurée en conservant une logique institutionnelle : elle s'est cristallisée dans l'étude de la relation des académiques avec l'industrie sous le nom d'*academic engagement* (D'Este et Perkmann, 2011).

3.2. Effets causaux des activités de développement de nouveaux produits sur la qualité de la science

Dans cette sous-section, nous étudions les effets d'une stratégie de recherche tournée vers l'usage en étudiant plus particulièrement les performances des chercheurs qui sont capables de générer des produits tangibles associés à ce type d'engagement (co-publications, brevets, création d'entreprise). Dans un second temps, nous nous intéressons aux collaborations avec l'industrie plus largement en nous appuyant sur la littérature sur l'engagement académique (ie. *academic engagement*). Enfin, nous discutons dans un troisième temps de l'ampleur de ces phénomènes.

3.2.1. Conséquences d'une orientation vers l'usage sur la productivité scientifique

Pour étudier l'effet de l'orientation vers l'usage (pour reprendre ici le vocable de Stokes, 1997), intéressons-nous aux chercheurs qui produisent des éléments tangibles associés à ce type de pratique : des brevets, des créations de start-up ou des co-publications (brevets ou publications scientifiques avec l'industrie). En effet, nous pouvons classifier les chercheurs selon qu'ils produisent ou non ces éléments, et comparer les performances entre les deux groupes ainsi spécifiés.

Premièrement, intéressons-nous aux chercheurs qui déposent des demandes de brevets. La littérature démontre que ces scientifiques obtiennent en moyenne des performances scientifiques accrues par rapport à leurs pairs qui n'en déposent pas. En effet, le dépôt de demandes de brevets est associé à des chercheurs qui sont davantage cités par leurs pairs dans la littérature (Agrawal et Henderson, 1997 ; Breschi, Lissoni et Montobbio, 2008 ; Van Looy, Callaert et Debackere, 2006). De plus, ces chercheurs ont une productivité scientifique accrue (Azoulay, Waverly et Toby, 2009 ; Van Looy, Callaert et Debackere, 2006) et publient des articles dans des journaux de rangs plus élevés d'après les classements en vigueur (Azoulay, Waverly et Toby, 2009 ; Breschi, Lissoni et Montobbio, 2007). Van Looy, Callaert et Debackere (2006) ajoutent également en contrôlant pour des trajectoires de carrières similaires, que le premium de citation et de productivité est notable avant même la publication du premier brevet, bien qu'une relation curvilinéaire inverse entre brevet et productivité ou qualité scientifique soit parfois proposée (Azoulay, Waverly et Toby, 2009 ; Banal-Estañol, Jofre-Bonet et Lawson, 2015 ; Fabrizio et Di Minin, 2008).

Deuxièmement, discutons les performances académiques des chercheurs qui fondent des start-up, un autre proxy de l'engagement pour l'usage des travaux de recherche. On peut reprendre ici les travaux de Zucker et Darby (1996) et Zucker, Darby et Armstrong (2002) qui introduisent la notion de « scientifiques stars » (Zucker, Darby et Armstrong, 2002, p. 138) en étudiant le secteur des biotechnologies. Pour qualifier cette catégorie de scientifiques, les auteurs considèrent les chercheurs qui ont enregistré plus de 40 découvertes génétiques avant l'année 1990 dans GenBank. Ils démontrent que ces scientifiques étaient particulièrement impliqués dans la création de start-up pour assurer la diffusion et la mise en pratique des nouvelles techniques à ADN recombinants. Ceux-ci représentaient 0,8% des scientifiques listés dans la base de données GenBank mais ont publié 17,3% des articles scientifiques associés aux biotechnologies. Dans une étude récente, Fini, Perkmann et Ross (2021) montrent à partir d'une étude quantitative sur les entreprises créées par les chercheurs d'Imperial College, que ceux-ci sont scientifiquement plus productifs. Pour les auteurs, les activités de développement de produits, procédés et services conduisent les chercheurs à explorer des champs scientifiques

nouveaux favorisant l'originalité des connaissances scientifiques ainsi produites, et la productivité.

Troisièmement, nous pouvons prendre le cas des chercheurs qui co-publient des articles scientifiques avec l'industrie. Tijssen (2018) en sélectionnant dans son échantillon les 10% des scientifiques qui ont le plus grand nombre de co-publications avec l'industrie, démontre que ces chercheurs ont en moyenne une plus grande productivité que leurs pairs, un nombre plus élevé de citations moyennes issues à la fois des journaux scientifiques, mais aussi dans les brevets. Pourtant les co-publications avec l'industrie sont de plus en plus rares (Arora, Belenzon et Pataconi, 2018 ; Tijssen, 2012).

Ainsi, nous pouvons conclure sur les éléments suivants :

Apport littérature 2.3. : En filtrant les chercheurs par rapport à la production d'éléments tangibles (brevets, co-publications, spin-off) attestant de leur orientation vers les activités de développement de produits, procédés ou services, nous observons que ces chercheurs enregistrent des performances académiques plus élevées que leurs pairs qui n'ont pas ce type d'orientation.

Pour compléter notre analyse, nous pouvons aussi prendre d'autres indicateurs moins tournés vers « le produit de sortie », mais plutôt en étudiant les performances des chercheurs qui collaborent avec l'industrie. Pour cela nous pouvons nous intéresser à une littérature plus structurée qu'est celle de l'engagement académique (ie. *academic engagement*).

3.2.2. Conséquences de l'engagement académique sur la production scientifique

Pour étudier l'effet causal des activités de développement de nouveaux produits sur la production scientifique, nous mobilisons ici la littérature sur *l'academic engagement* qui adopte une posture institutionnelle : celle du rapprochement entre entreprises d'une part, et scientifiques issus des OPR de l'autre. Soulignons ici que la littérature sur l'engagement académique s'apparente plutôt à un effort de rationalisation ex-post des efforts de recherche menés sur cette question : la littérature est particulièrement fragmentée et les auteurs ne se réfèrent pas nécessairement en ces termes à ce construit théorique. Notons ici les efforts particuliers de Perkmann *et al.* (2013) et Perkmann *et al.* (2021) pour structurer le champ à partir de revues de littératures systématiques. Nous pouvons caractériser la notion à partir de la définition de Perkmann *et al.* (2021) :

« *Academic engagement which we define as knowledge-related collaboration by academic researchers with non-academic organisations. These interactions include formal activities such as collaborative research, contract research, and consulting, as well as informal activities like providing ad hoc advice and networking with practitioners. [...] First, academic engagement represents inter-organisational collaboration instances, usually involving 'person-to-person interactions' (Cohen et al., 2002), that link universities and other organisations, notably firms. [...] Second, generally the partners pursue goals that are broader than the narrow confines of conducting research for the sake of academic publishing, and seek to generate some kind of utility for the non-academic partners.* » (Perkmann et al., 2013, p. 424)

Bien sûr, il faut comprendre ici que les “*non-academic organisations*” sont dans la plupart des cas, des industriels, d'où notre rapprochement avec notre conceptualisation des activités de développement de produits, procédés et services nouveaux. Premièrement, la littérature sur l'engagement académique vise à dresser le panorama des déterminants de l'engagement (élément que nous n'aborderons que marginalement ici). Deuxièmement, la littérature s'intéresse aux conséquences, en particulier sur la production scientifique des chercheurs engagés. Les éléments traités par cette littérature sont synthétisés dans la Figure 13 ci-dessous extraite des travaux de (Perkmann et al., 2021).

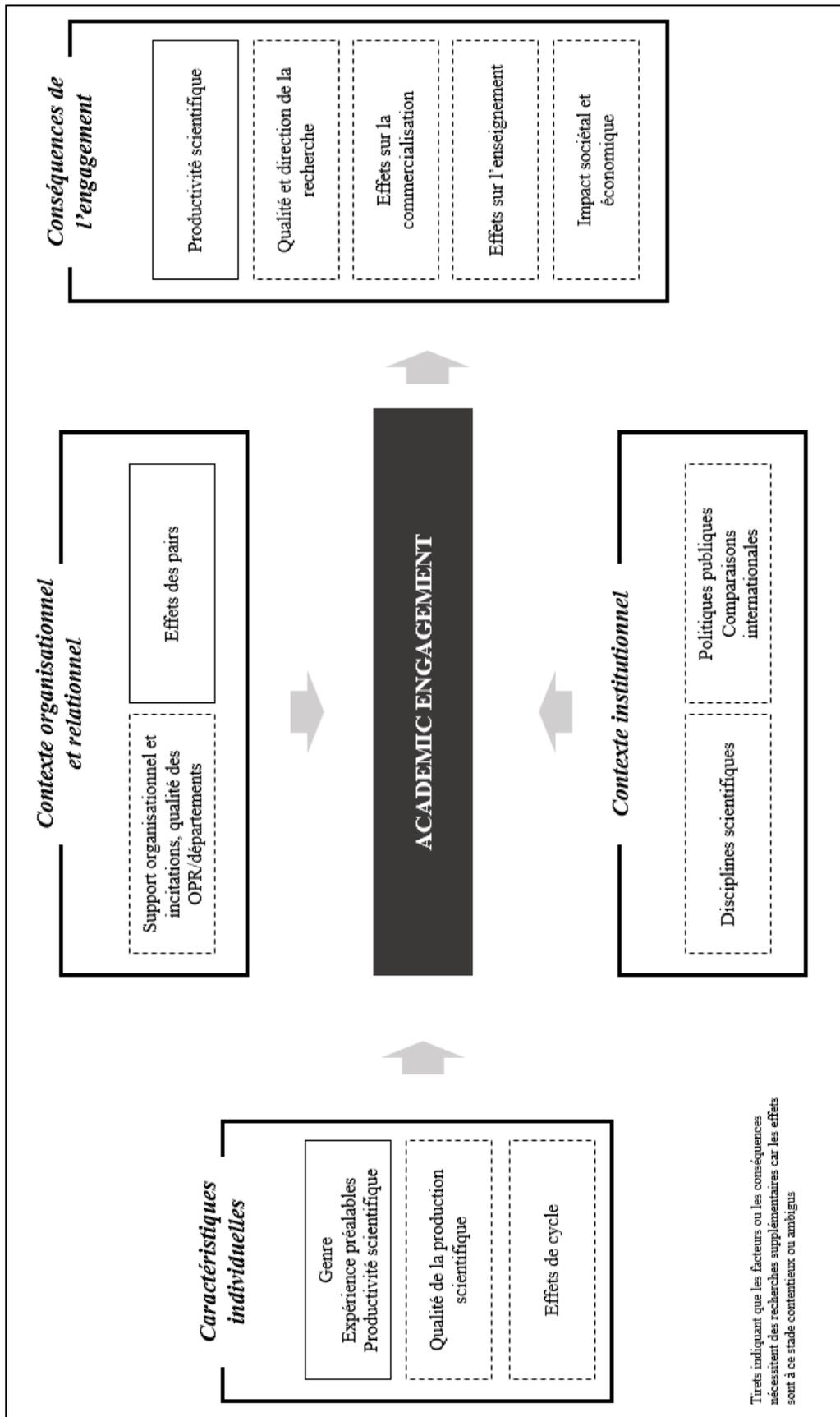


Figure 13 - Panorama de la littérature sur l'engagement académique (source : Perkman & al., 2021)

Nous présentons ici dans un premier temps les effets sur la performance académique de cet engagement. Il faut noter que malgré les risques évoqués d'une baisse de la productivité scientifique qui serait liée au rapprochement avec l'industrie (voir ci-dessus), les études montrent plutôt que l'engagement a un effet positif sur la productivité du chercheur. Dans un premier temps, les études ont d'abord utilisé des proxys de l'engagement relativement indirects comme une expérience préalable dans l'industrie avant de devenir chercheur dans un OPR (Lin et Bozeman, 2006), ou les financements d'industriels (Banal-Estañol, Jofre-Bonet et Lawson, 2015 ; Gulbrandsen et Smeby, 2005 ; Hottenrott et Lawson, 2017). Dans un second temps, des méthodes plus avancées ont permis de mieux isoler l'effet notamment à partir de collaborations à proprement parler avec l'industrie (Bikard, Vakili et Teodoridis, 2019).

Premièrement, Lin et Bozeman (2006) en menant une étude sur 443 chercheurs aux États-Unis montrent que bien que les chercheurs qui ont eu une expérience préalable avec l'industrie avant de devenir chercheurs en OPR produisent moins d'articles scientifiques au total sur leur carrière, la différence n'est plus significative sur la période d'étude la plus récente (1996 – 2000) et même positive pour les jeunes chercheurs qui ont eu une telle expérience.

Deuxièmement, plusieurs études s'intéressent au financement par l'industrie. Gulbrandsen et Smeby (2005) en se fondant sur une étude de 1 967 professeurs titulaires (avec *tenure*) en Norvège, montrent que ceux qui bénéficient de financements industriels publient significativement plus d'articles scientifiques (7,2 en moyenne) que ceux qui ne reçoivent aucun financement externe (2,3 en moyenne). Notons toutefois que la différence entre les groupes n'est pas significative pour les articles les plus cités. Banal-Estañol, Jofre-Bonet et Lawson (2015) en étudiant pendant 20 ans la productivité de chercheurs dans 40 départements d'ingénierie au Royaume-Uni concluent quant à eux à une relation curvilinéaire : l'effet de l'engagement est positif sur la productivité scientifique, mais seulement jusqu'à un certain point. Hottenrott et Lawson (2017) concluent également à un effet positif en analysant 15 départements d'ingénierie au Royaume-Uni sur la période 1986 – 2007, mais vont même un cran plus loin en montrant que l'obtention de financements industriels est également corrélée à des publications scientifiques plus qualitatives (mesurée en termes de citations reçues).

Troisièmement, Bikard, Vakili et Teodoridis (2019) ont développé une méthode plus robuste pour qualifier les effets en s'appuyant sur les « découvertes simultanées » (Bikard, 2020) : des découvertes scientifiques sur un même sujet et publiées dans une période de temps relativement similaire par des équipes différentes. Or, les auteurs comparent ici une découverte donnée A qui a été découverte par une équipe A1 composée de chercheurs issus des OPR uniquement, et sa jumelle A' découverte par une équipe A2 composée de chercheurs à la fois

issus d'OPR mais aussi d'industriels (tel que reporté dans leurs affiliations). Ainsi, Bikard, Vakili et Teodoridis (2019) montrent que les chercheurs des OPR engagés (ie. chercheurs des OPR de l'équipe A2) publient en moyenne davantage de papiers scientifiques (+37%) reliés à cette découverte (*follow-on paper*, analysé par citation) que leur contre-factuel de l'autre équipe (ie. chercheurs des OPR de l'équipe A1). La différence est robuste en tenant compte de la qualité des publications suivantes.

Ainsi, nous pouvons conclure sur les éléments suivants :

Apport littérature 2.4. : L'engagement académique auprès d'industriels, c'est-à-dire l'exposition à des activités de développement de produits, procédés ou services des chercheurs des OPR, est corrélé en moyenne à une augmentation de la productivité scientifique des chercheurs.

Ces éléments nous enjoignent à nous pencher sur l'ampleur du phénomène d'engagement.

3.2.3. Orientation vers l'usage et engagement académique : l'ampleur du phénomène

Comme nous l'avons vu au Chapitre 1, il est évident que les efforts des décideurs publics pour rapprocher OPR et industriels ont conduit à un rapprochement des deux institutions. Nous analysons dans un premier temps l'ampleur du phénomène au regard de la littérature sur l'engagement académique, puis nous discuterons plus particulièrement la question de l'ampleur de l'orientation vers l'usage.

Tout d'abord, soulignons que la littérature sur l'engagement académique a démontré qu'il s'agissait d'une activité largement pratiquée par les chercheurs des OPR. En particulier, nous pouvons citer les travaux fondateurs sur ce sujet de Mansfield (1995) et de Cohen, Nelson et Walsh (2002) qui en prenant plutôt le point de vue des industriels, montraient qu'une grande partie des projets de R&D sont liés à un engagement des chercheurs des OPR auprès des industriels. En particulier, les travaux de Cohen, Nelson et Walsh (2002) distinguent l'utilisation de connaissances scientifiques issues des OPR qui permettent aux industriels soit (1) d'avoir de nouvelles idées de projets de R&D, soit (2) de contribuer à la réalisation d'un projet de R&D déjà lancé. Or, la collaboration, les rencontres informelles, les contrats de recherche, le consulting académique, les embauches de chercheurs et les rencontres en conférence apparaissent comme des éléments prépondérants pour le lancement de nouveaux projets, alors que la publication ou les brevets contribuent davantage à la réalisation d'un projet

de R&D en cours. Si ces études suggèrent que pour atteindre ces résultats, un grand nombre de chercheurs des OPR soient effectivement engagés auprès de l'industrie, des études plus récentes nous permettent d'étudier plus en profondeur ce phénomène.

Klofsten et Jones-Evans (2000) montrent par exemple que sur leur carrière, 44% des chercheurs des OPR suédois participent à des travaux de recherche financés par l'industrie, ce chiffre atteignant 69% en Irlande. D'Este et Perkmann (2011), dans une étude aux États-Unis par questionnaire sur les académiques en sciences de l'ingénieur et en physique, montrent que 44% des sondés avaient au moins été impliqués dans des collaborations de recherche avec l'industrie, et 38% dans des travaux de consulting dans les deux années précédant l'étude. Enfin, plus récemment Tijssen (2018) en distinguant les chercheurs selon qu'ils soient « chercheurs », « inventeurs », « entrepreneurs » ou « crossover researchers » (ie. collaboration avec l'industrie) montre en étudiant plusieurs universités européennes, que seulement 30% des répondants se considèrent seulement comme « chercheurs » (Tijssen, 2018, p. 1633). Enfin, la large étude de Hughes *et al.* (2016) menée au Royaume-Uni montre que 37% des chercheurs considèrent leur recherche comme ayant un intérêt commercial pour des industriels (Hughes *et al.*, 2016, p. 6).

Ainsi, nous pouvons conclure sur le fait que les efforts de rapprochement entre OPR et industriels ont effectivement conduit une part importante des chercheurs des OPR à s'engager auprès des industriels. Pourtant, à l'inverse, en sortie, on peut s'étonner du nombre de chercheurs qui enregistrent des productions associées à un engagement vers l'usage (brevets, co-publications avec les industriels, création d'entreprise). Premièrement, concernant les brevets et les créations d'entreprises, le nombre de chercheurs des OPR qui en dépose ou en crée est particulièrement faible. Agrawal et Henderson (1997) en étudiant pourtant deux départements particulièrement appliqués au MIT sur une période de 15 ans montrent que seulement 10 à 20% des chercheurs sont susceptibles de déposer une demande de brevet. Les travaux de Klofsten et Jones-Evans (2000), Gulbrandsen et Smeby (2005) et D'Este et Perkmann (2011) conduisent à des résultats similaires. Deuxièmement, peu de chercheurs des OPR co-déposent des brevets avec des industriels (Crescenzi, Filippetti et Iammarino, 2017) ou co-écrivent des articles scientifiques avec des industriels (Grimpe et Fier, 2010 ; Tijssen, 2012). Sur une étude dans le cas allemand, Grimpe et Fier (2010) montrent pour leur part que 20% des chercheurs des OPR ont publié une co-publication avec un industriel sur la période de 12 mois précédant l'étude.

Ainsi, pour conclure cette sous-section, nous pouvons indiquer qu'en entrée du processus scientifique, lorsque l'on interroge les chercheurs des OPR, une grande part d'entre eux se déclare engagés avec l'industrie. Pourtant, si l'on s'interroge sur les résultats de cet engagement, il ne se traduit que rarement par des outputs tangibles de l'engagement vers l'usage (co-publications scientifiques, brevets, création d'entreprise). Ce résultat est paradoxal, car nous avons montré au préalable que les chercheurs qui obtenaient ce type d'outputs étaient également particulièrement productifs du point de vue scientifique. Pourtant, l'engagement académique, conduit en moyenne à un premium en termes de productivité scientifique, résultat considéré comme particulièrement robuste dans la littérature (Perkmann *et al.*, 2021). Ainsi, cette relation entre exposition aux activités de développement de produits, et performance scientifique accrue, ne semble pas pouvoir être associée à une logique systématique et mécanique.

Premièrement, une productivité scientifique élevée est facteur d'engagement (logique d'effet Matthew) ce qui pourrait laisser supposer que seuls les chercheurs les plus productifs soient capables de mener de front les deux activités (Bekkers et Bodas Freitas, 2008)⁴⁵. Deuxièmement, l'engagement académique a des effets positifs en termes de réputation (Hughes *et al.*, 2016 ; Moutinho, Fontes et Godinho, 2007 ; Owen-Smith et Powell, 2001) ce qui conduirait les chercheurs engagés à pouvoir capter davantage de financement pour leurs travaux de recherche (Fini, Jourdan et Perkmann, 2017). On pourrait imaginer ici une forme de découplage : l'engagement académique permettrait de financer des travaux plus fondamentaux sans que la relation avec l'industriel ne conduise à accroître la pertinence des travaux de recherche de manière directe. Troisièmement, l'effet de l'engagement sur la qualité des publications scientifiques et en particulier les découvertes les plus majeures n'est pas démontré à ce stade (Perkmann *et al.*, 2021). Quatrièmement, Van Looy, Callaert et Debackere (2006) démontrent qu'il existe une forte hétérogénéité individuelle dans la façon dont l'engagement académique affecte la productivité scientifique. Ces limites nous enjoignent à supposer que des cadres institutionnels spécifiques soient mis en place pour que l'exposition du scientifique aux activités de développement conduisent à favoriser le potentiel de découverte scientifique. Mais cela suppose aussi de caractériser plus précisément quels types de bénéfices l'engagement pourrait permettre de générer sur les activités scientifiques.

Nous pouvons ici résumer nos apprentissages :

⁴⁵ Des techniques économétriques avancées comme celles utilisées par Bikard, Vakili et Teodoridis (2019) permettent de dépasser cette limite.

Apport littérature 2.5. : Le nombre de chercheurs des OPR exposés aux activités de développement de produits, procédés et services est particulièrement élevé (en particulier lorsqu'on les interroge par voie de questionnaire). Pourtant, ces chercheurs engagés sont très peu nombreux à produire des « résultats tangibles » associés à l'orientation vers l'usage (articles scientifiques co-écrits avec des industriels, brevets, etc.). Bien qu'en moyenne le lien entre engagement académique et productivité scientifique soit démontré, il existe une forte hétérogénéité au niveau individuel.

3.3. Management de l'engagement pour favoriser les retombées scientifiques positives

Dans cette sous-section, nous nous intéressons d'abord à caractériser plus précisément à partir de la littérature les bénéfices concrets de l'engagement académique sur les activités de recherche scientifique. Dans un deuxième temps, nous discuterons plus en détail ce que la littérature nous apprend sur le management de ces activités.

3.3.1. Gains nets pour la recherche scientifique de l'engagement académique

Ici nous cherchons à caractériser la nature des apports potentiels des activités de développement de nouveaux produits sur les activités scientifiques.

Premièrement, dans le cadre de leur proximité avec l'industrie, les scientifiques peuvent être alimentés en nouvelles idées ou nouvelles questions de recherche originales qui alimentent leur agenda scientifique (Ankrah *et al.*, 2013 ; Blind, Pohlisch et Zi, 2018 ; D'Este et Perkmann, 2011 ; Gulbrandsen et Smeby, 2005 ; Hughes *et al.*, 2016 ; Lam, 2011 ; Mansfield, 1995). Par exemple, Mansfield (1995) dans une étude auprès de 200 chercheurs des OPR, montre qu'environ la moitié des répondants indiquent que leur choix d'étudier une question de recherche particulière et les choix de directions dans leurs travaux étaient considérablement influencés par les utilisateurs et les financeurs de ces travaux, et ce avec des effets plus marqués lorsque le partenaire est un industriel. Gulbrandsen et Smeby (2005) dans une étude par questionnaire auprès de 1 967 chercheurs en Norvège considèrent que « *contract research introduces new and interesting research topics* » (Gulbrandsen et Smeby, 2005, p. 947). Ces résultats corroborent les travaux menés par Hughes *et al.* (2016) auprès de 18 177 chercheurs des OPR au Royaume-Uni qui montrent que 77% des répondants considèrent que le gain de connaissances supplémentaires (ie. « insights ») dans les domaines de compétences de ces

chercheurs est considéré comme la première raison de l'engagement académique. Dans des travaux plus qualitatifs, Ankrah *et al.* (2013), en conduisant une étude dans le contexte du Faraday Partnership Initiative, montrent également que les nouvelles connaissances à propos d'un nouveau domaine de recherche et l'accès à de nouvelles idées constituent les motivations principales de collaboration avec l'industrie.

Deuxièmement, l'industrie est capable d'offrir un environnement permettant de tester empiriquement des idées ou des hypothèses en lien avec le processus de recherche (D'Este et Perkmann, 2011 ; Lee, 2000 ; Siegel, Waldman et Link, 2003a). Lee (2000) dans une étude auprès de 422 chercheurs montre que le test et l'application de théories et d'idées nouvelles apparaissent comme un objectif prioritaire pour les chercheurs engagés, et devant même les enjeux de commercialisation. Siegel, Waldman et Link (2003) dans une étude qualitative auprès de 98 chercheurs concluent à des résultats similaires en indiquant que pour 65% d'entre eux, cette relation avec l'industrie a eu un effet positif sur leur travail de recherche. Comme l'indique cet extrait issu de leurs données :

« There is no doubt that working with industry scientists has made me a better researcher. They help me refine my experiments and sometimes have a different perspective on a problem that sparks my own ideas » (Siegel, Waldman et Link, 2003a, p. 23)

Dans cette perspective, soulignons que l'industrie dispose de capacités de tests et d'outils d'observations qui peuvent être inhérents à leurs activités industrielles et qui ne sont pas nécessairement possédés par le laboratoire de rattachement du chercheur de l'OPR (D'Este et Perkmann, 2011).

Troisièmement, les industriels peuvent s'engager dans un processus qui mène à une invention (par un processus d'essais-erreurs) pour laquelle les savoirs scientifiques associés ne sont pas encore découverts (voir par exemple Shockley, 1976). Le terrain industriel peut favoriser pour le chercheur l'accès à ces inventions (Narayanamurti et Odumosu, 2016 ; Narayanamurti, Odumosu et Vinsel, 2013). L'exemple de la découverte du transistor chez les Bell Laboratories semble corroborer cette logique (Gertner, 2012 ; Lenfle et Petitgirard, 2020).

Quatrièmement, les différences dans les manières de conduire les travaux de recherche peuvent conduire à générer de nouvelles idées en augmentant le potentiel créatif des équipes (Evans, 2010a, 2010b ; Rosenberg, 1998). D'une part, la collaboration permet d'augmenter le nombre et la variété d'idées disponibles (Rosenberg, 1998), d'autant que les équipes avec des expertises mixtes sont plus à même de résoudre des problèmes par des moyens innovants (Hargadon et Sutton, 1997 ; Teodoridis, 2017 ; Uzzi et Spiro, 2005). D'autre part, les

spécificités industrielles peuvent conduire à favoriser le processus créatif pour l'académie. Comme l'indique Evans (2010a) :

« In this way, industry science is no less intelligent, but it rests on less prior knowledge than academic research. Industry science pushes experiments down paths that an academic project of incremental confirmation and generalization would have no reason to travel. Industry science is, in a word, more speculative. And yet, by speculating, science-based industry injects innovations into the academy—anomalous, unexpected, and not entirely reconcilable findings that will more likely shape the next generation of academic science than the present one, if at all. » (Evans, 2010a, p. 442)

Ainsi, nous avons mieux caractérisé les éléments qui permettent de favoriser l'impact scientifique dans la relation avec l'industrie dans la logique du « *backward link* » des activités de développement de nouveaux produits, procédés ou services (D'Este et Perkmann, 2011, p. 330) :

Apport littérature 2.6. : L'exposition du chercheur aux activités de développement de produits, procédés et services par l'industrie peut favoriser les activités de recherche scientifique par les procédés suivants : accès à de nouvelles idées scientifiques, capacité de tests empiriques, travaux de recherche sur des inventions industrielles nouvelles, diversité des équipes favorisant la créativité.

Mais au-delà de ces éléments tangibles, se jouent aussi des enjeux managériaux : comment manager les relations entre activités de développement de nouveaux produits et activités de développement de connaissances scientifiques nouvelles pour favoriser la logique du « *backward link* » ?

3.3.2. Management des couplages science – industrie pour favoriser l'impact scientifique

Ici, nous cherchons à détailler les réponses apportées par la littérature sur le management des interactions entre activités de développement de produits et activités de recherche scientifique qui permettraient de favoriser l'impact scientifique. Soulignons d'abord que se pencher sur cet enjeu semble clé : l'impact scientifique de l'engagement académique semble contingent aux caractéristiques du projet de recherche (Callaert *et al.*, 2015 ; Rentocchini *et al.*, 2014) et ses effets positifs sont hétérogènes au niveau individuel (Van Looy, Callaert et Debackere, 2006). Or, il existe une très grande variété de canaux d'interactions entre les deux

activités avec des objectifs associés particulièrement variés (Carayol, 2003 ; Meyer-Krahmer et Schmoch, 1998) ce qui rend la question managériale essentielle.

Premièrement, nous avons montré que pour les chercheurs engagés, la commercialisation n'apparaît pas comme un déterminant principal de leur engagement. Ainsi, la recherche partenariale semble plus pertinente que les travaux de consultance pour favoriser l'impact scientifique (D'Este et Perkmann, 2011). Mais comment dans ce cas permettre de favoriser ce type de projets ? Les travaux de Callaert *et al.* (2015) permettent ici de montrer plusieurs stratégies possibles. Les auteurs étudient, en s'appuyant sur le témoignage de 187 chercheurs de deux OPR européens, le lien entre productivité scientifique et le degré de proactivité (ie. proactiveness), de sélectivité (ie. selectiveness) et de nouveauté de leurs sujets de recherche (ie. novelty), dans leurs portefeuilles de projets avec l'industrie. Les auteurs démontrent qu'une plus grande proactivité et une plus grande sélectivité conduisent à une plus forte productivité scientifique.

Deuxièmement, les travaux de Bikard, Vakili et Teodoridis (2019) suggèrent quant à eux une division du travail dans la relation institutionnelle entre OPR et industriels. Les auteurs montrent que du fait de la pression à la commercialisation dans les OPR, sans collaboration, les chercheurs sont contraints de dédier un temps conséquent à ces activités avec un coût d'opportunité sur la conduite de leurs travaux de recherche. Or, dans les collaborations OPR – industrie, les chercheurs peuvent se concentrer sur les travaux de recherche c'est-à-dire sur leur expertise, tandis que les industriels peuvent se concentrer sur l'exploitation commerciale des résultats notamment par le canal du brevet. La relation OPR – industrie permet donc ici d'optimiser une division du travail pertinente en fonction des expertises propres à chaque institution.

Troisièmement, Narayanamurti et Odumosu (2016) montrent qu'une stratégie de sélection et d'isolement des projets de recherche à vocation appliquée, mais qui présentent des questions de recherche fondamentale, peut permettre de favoriser l'impact académique. Ils proposent en particulier la notion de « Cycles d'Invention et de Découverte », et proposent que les institutions de recherche doivent pouvoir mettre en place un environnement où activités de découvertes et inventions ne s'organisent pas en silos (recherche appliquée vs. fondamentale), mais bien en interrelations (voir Encadré 5 ci-dessous). Goldstein et Narayanamurti (2018) illustrent avec succès cette stratégie dans le cadre du développement d'ARPA-E (voir Chapitre 1).

Force est de constater que la littérature nous donne ici peu d'indices sur le management de ces activités et les stratégies de recherche qui permettent véritablement d'accroître la

productivité et la qualité des nouvelles connaissances scientifiques développées dans le cadre de l'engagement académique. Soulignons ici que Callaert *et al.* (2015) et Tijssen (2018) ont récemment appelé à renforcer les travaux de recherche sur cette question. Ce manque dans la littérature est d'autant plus flagrant qu'à l'inverse, il existe une multitude d'études qui montrent comment faciliter la commercialisation des connaissances scientifiques auprès des industriels en dépassant les barrières, notamment culturelles, entre ces deux institutions. D'Este et Perkmann (2011) rappelaient d'ailleurs que le « *backward links is often under-appreciated* » (D'Este et Perkmann, 2011, p. 311). Cette limite est liée pour de Wit-de Vries *et al.* (2018) à une mécompréhension ou une sursimplification des apports potentiels de l'industrie à la recherche académique, le plus souvent réduits à la simple formulation de questions de recherche et de la fourniture de données liées au contexte industriel.

Pour synthétiser les résultats de cette sous-partie, nous pouvons indiquer les éléments suivants :

Apport littérature 2.7. : La littérature fournit peu de pistes managériales pour favoriser les performances scientifiques des chercheurs exposés aux activités de développement de produits, procédés et services de l'industrie (ie. engagement académique). Il semble qu'une plus grande sélectivité et proactivité des chercheurs vis-à-vis de l'industrie soient des facteurs d'intérêt. Une meilleure division des tâches ou un isolement des projets qui visent à la fois des activités de développement de produits, procédés et services tout en adressant des questions de recherche fondamentale semblent également des solutions pertinentes pour favoriser l'impact scientifique, bien que celles-ci méritent d'être creusées.

Ainsi, nous achevons ici cette revue de la littérature sur notre thématique des relations entre activités de développement de produits, procédés et services, et activités de recherche scientifique. Nous en proposons une synthèse afin de proposer les questions de recherche de cette thèse.

Encadré 5 – Les cycles inventions – découvertes de Narayanamurti et Odumosu (2016)

Narayanamurti et Odumosu proposent en 2016 un ouvrage, *Cycles of Invention and Discovery* afin de proposer une alternative au modèle linéaire (ou à ses dérivés comme celui de Stokes du *Pasteur's Quadrant*). Dans leur constat de départ, les auteurs montrent que le modèle dominant du financement et de l'organisation de la recherche est hérité du modèle linéaire. Or, les auteurs cherchent à démontrer que la dichotomie entre recherche appliquée et fondamentale n'est pas représentative de la réalité des activités de recherche et de développement, et nuit au fonctionnement même du système.

Les auteurs proposent, à partir d'une analyse de six cas emblématiques dans le domaine des technologies de l'information et de la communication, que les interactions entre découvertes et inventions soient bien plus riches que postulées dans le modèle linéaire. Ils introduisent ainsi la notion de « cycles d'inventions - découvertes »

afin de démontrer que certaines découvertes et inventions sont plus ou moins dépendantes d'inventions ou de découvertes précédentes, et que leur nature peut varier entre ces deux catégories. Les auteurs proposent de représenter leur modèle dans une figure, reproduite ci-dessous (Figure 14).

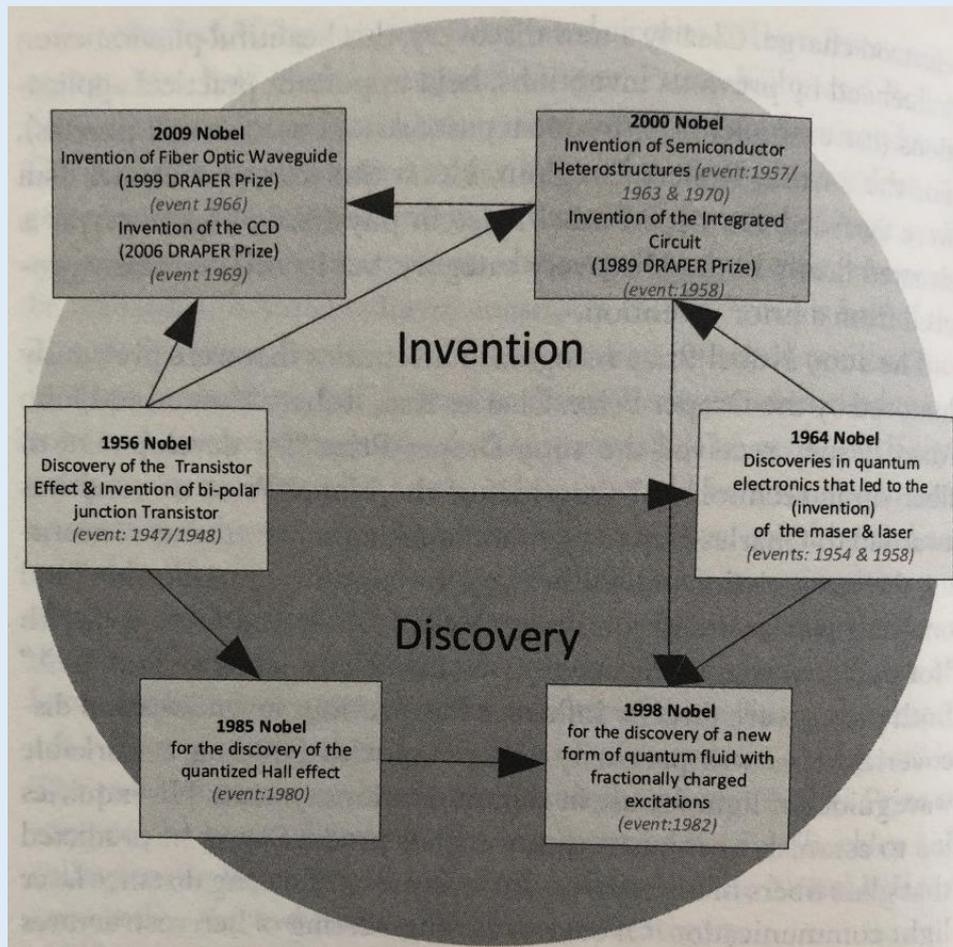


Figure 14 - Cycle de découverte - invention (source Narayanamurti et Odumosu, 2016, p. 54)

Pour reprendre les mots des auteurs, le modèle peut être ainsi synthétisé :

« In our model, the discovery-invention cycle can be traversed in both directions, and research knowledge is seen as an integrated whole that evolves over time as it traverses the cycle. The bidirectionnality of the cycle captures the fact that inventions are not always the product of discovery, but can also be the product of other inventions. Simultaneously, important discoveries can arise from new inventions. The time dimension is captured in the idea of traveling the cycle in various directions » (p. 56)

En s'appuyant sur ce modèle qui promet des interactions fortes entre ces deux activités, les auteurs cherchent à déterminer, à partir de l'analyse de trois cas d'études (Bell Laboratories, Université de Californie à Santa Barbara, Kavli Institute of Theoretical Physics), des facteurs institutionnels pouvant l'encourager. Les auteurs identifient ainsi les éléments suivants :

« a well-defined vision and mission ; a transparent, meritocratic, and entrepreneurial culture ; stable and flexible funding at all appropriate scales ; insulation but not isolation ; and a leadership cadre that is technically distinguished and capable of exercising exquisite judgment in maintaining the fine balance between focus and freedom that this necessary to incentivize and inspire researchers » (p. 145).

Enfin, les auteurs proposent que des changements institutionnels importants dans l'organisation et le financement de la recherche aux États-Unis soient entrepris pour favoriser un tel mécanisme d'interaction entre invention et découvertes scientifiques.

« In summary, there is an urgent pressing imperative to re-architect US national science and technology policy. We must move beyond the dichotomy of basic/applied and toward a synthesis of discovery and invention ». (p. 143)

4. Synthèse de la littérature au regard du double impact simultané et questions de recherche

Dans cette section, nous nous intéressons aux apprentissages et aux limites de la littérature dans le contexte du couplage à double impact simultané. Nous synthétisons nos apprentissages, nous en exposons les limites et montrons en quoi ces éléments nous permettent de définir nos questions de recherche.

4.1. Apports et limites de la littérature

Dans une première étape de caractérisation de notre objet de recherche, nous avons considéré que le double impact simultané devrait conduire à des interactions vertueuses entre (1) des activités de recherche scientifique (souvent approchées par les publications scientifiques) d'une part, et (2) des activités de développement de nouveaux produits, procédés, ou services (souvent approchées par les inventions) d'autre part, et ce au sein d'un même projet. En reformulant, cela suppose que les activités de recherche scientifique aient un impact positif sur la capacité à générer des inventions, et inversement que les activités de développement de produits, procédés ou services aient un impact positif sur la capacité à générer des publications scientifiques. Comme notre recherche est exploratoire et que ce modèle est un construit nouveau, nous avons analysé différentes littératures issues des sciences de gestion pour mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre. Nous en synthétisons ici les principaux apports.

➤ ***Que nous apprend la littérature en sciences de gestion sur la façon dont les activités de recherche scientifique pourraient concourir aux activités de développement de nouveaux produits, procédés et services (approchées par l'invention) ?***

Premièrement, en utilisant la conceptualisation dominante de l'invention combinatoire, nous avons montré que (1) soit les nouvelles connaissances scientifiques sont combinées avec

d'autres connaissances pour permettre de concevoir une invention, (2) soit ces nouvelles connaissances scientifiques sont utilisées pour favoriser d'autres combinaisons de connaissances. **Ces deux mécanismes devraient donc permettre d'assoir notre hypothèse d'un effet positif possible des activités de recherche scientifique sur le développement de nouveaux produits, procédés ou services dans le cadre d'un couplage à double impact simultané.**

Deuxièmement, des méthodologies basées sur l'exploitation des données brevets ont été développées pour analyser, par le prisme de l'innovation combinatoire, les effets à l'œuvre. Bien que les connaissances scientifiques ne soient qu'une source parmi d'autres qui permettent de générer des inventions, l'activité inventive semble de plus en plus dépendante de la science. De plus, la littérature nous permet également de montrer que la dynamique est vertueuse : recourir à des connaissances scientifiques favorise des inventions de qualité (originalité, nouveauté, valeur). **Là encore, ces éléments viennent contribuer à renforcer la pertinence d'une logique de couplage à double impact simultané : développer de tel couplage semble pertinent dans le régime actuel de l'invention, et pourrait avoir des performances en termes de développement de produits, procédés ou services intéressantes. De plus, des stratégies de tests empiriques d'un tel modèle pourront être envisagées en s'appuyant sur les techniques proposées dans la littérature (analyse par les classes de brevets par exemple, lien avec les articles scientifiques cités dans les brevets).**

Troisièmement, la littérature nous indique que le lien entre connaissances scientifiques nouvelles et inventions n'est pas mécanique et les connaissances scientifiques mettent un temps conséquent avant d'être intégrées dans des inventions. Au contraire, les organisations font face à des difficultés d'intégration, d'assimilation et d'utilisation de connaissances scientifiques nouvelles dans leurs processus inventifs. Cette problématique semble renforcée si les connaissances scientifiques ont été produites dans un OPR et que c'est une entreprise qui souhaite développer le produit, procédé ou service nouveau (notamment du fait de barrières institutionnelles). Dans les entreprises, c'est le management de l'expertise qui doit assurer un renouvellement des compétences et des connaissances de l'organisation pour soutenir la conceptualisation d'inventions. **Ces éléments nous enjoignent à creuser comment cette partie du modèle de couplage à double impact simultané pourrait être opérante dans différents contextes (entreprises, OPR) s'il s'avérait fonctionnel. De plus, la simultanéité semble un enjeu prometteur qui pourrait permettre de dépasser la lenteur d'intégration des connaissances scientifiques nouvelles dans les futurs produits, procédés ou services.**

Ainsi, nous pouvons conclure sur le fait que la littérature permet de mettre en lumière les enjeux clés associés à l'exploration d'un modèle de couplage à double impact simultané, notamment pour la partie liée aux effets causaux des activités de recherche scientifique sur les activités de développement de produits, procédés et services. Mais qu'en est-il de l'autre partie du modèle de couplage potentiel ?

➤ *Que nous apprend la littérature sur la façon dont les activités de développement de nouveaux produits pourraient concourir aux activités de recherche scientifique (approchées par les découvertes scientifiques) ?*

Premièrement, nous avons montré que la théorie prédit des conséquences très différentes : soit les activités de développement de produits, procédés ou services apparaissent comme une interférence au regard du bon déroulement des activités scientifiques (pratiques du secret, limitation de la circulation des connaissances, orientation vers l'application et limite de la sérendipité), soit elles apparaissent comme conduisant à une hybridation positive entre société et sciences où les chercheurs sont amenés à conduire des travaux fondamentaux tout en conservant (ou développant) une orientation vers l'usage (logique *Pasteur's Quadrant*). **Au regard du modèle à double impact simultané, ces éléments nous incitent à une approche plus prudente : des conditions particulières semblent pouvoir faire basculer cette relation d'un système vertueux à un système potentiellement néfaste. Des efforts de modélisation semblent ici nécessaires pour comprendre ce phénomène.**

Deuxièmement, en discutant notamment de la littérature sur l'engagement académique, nous montrons que les chercheurs qui collaborent avec l'industrie et donc qui sont exposés aux activités de développement de produits, procédés ou services nouveaux, ou qui sont eux-mêmes producteurs d'éléments tangibles associés à ces activités, enregistrent une productivité de recherche supérieure à celle de leurs pairs. Pourtant l'origine de cette productivité supérieure n'est pas évidente, car de multiples facteurs interfèrent ici (effet Matthew, influence des pairs, performances antérieures plus élevées, effets de réputation), alors que le phénomène d'engagement académique semble important, mais que peu de scientifiques génèrent des produits associés à l'orientation vers l'usage. **Concernant le modèle à double impact simultané, ces éléments nous permettent de définir des pistes empiriques pour tester la validité empirique du modèle, en nous alertant sur les nombreux biais potentiels. Ici aussi, l'hétérogénéité des résultats nous alerte sur la nécessité de mener un effort de**

conceptualisation des éléments de contingence qui peuvent conduire à des résultats a priori opposés.

Troisièmement, nous avons parcouru la brève littérature détaillant les origines possibles d'un effet de rétroaction des activités de développement de produits, procédés et services sur les activités scientifiques (accès à des matériaux et des compétences originales) et de méthodes de management (proactivité, division du travail) qui permettraient de favoriser ces effets. **Ici, la littérature nous enjoint à creuser, si le modèle à double impact simultané est possible, les conditions et cadres institutionnels qui soutiendraient son fonctionnement, et les contextes possibles pour son application.**

Nous proposons une synthèse des apports de la littérature dans le Tableau 5 ci-dessous.

	Effets causaux des activités de recherche scientifique sur la qualité des nouveaux produits		Effets causaux des activités de développement de nouveaux produits sur la qualité de la science	
	Apports	Auteurs clés	Apports	Auteurs clés
Littérature dominante	Invention combinatoire	<i>Fleming (2001), Fleming & Sorenson (2004)</i>	Engagement académique	<i>Perkmann & al. (2013, 2021)</i>
Modélisation de la relation	Effet positif consensuel : la connaissance scientifique ... - ... est combinée avec d'autres connaissances pour générer des inventions - ... facilite les combinaisons pour inventer	<i>Ahuja & Lampert (2001); Fleming (2001), Fleming & Sorenson (2004), Yayavaram & Ahuja (2008)</i>	Effets ambigus : - Une interférence potentiellement néfaste pour l'académique... - ... ou propice à une hybridation science – société féconde	<i>Blumenthal & al. (1996), Czarnitzki & al. (2015), Gibbons & al. (1995), Etkowitz & Leydesdorff (2000), Stokes (1997)</i>
Outils de mesures	Analyses bibliométrique avec les brevets (ex., SNPL, IPC, catégories WoS)		Analyses bibliométriques avec les publications scientifiques (ex., contrôle des produits orientés vers l'usage, découvertes simultanées, etc.)	
Performances, représentativité	- Compétition d'autres types de connaissances (des consommateurs, des fournisseurs, etc.) mais un régime qui tend à devenir central pour l'innovation - Corrélation entre qualité de la connaissance scientifique et qualité de l'invention	<i>Arts & Fleming (2018), Verhoeven & al. (2018), Fleming & al. (2019), Poege & al. (2019)</i>	- L'engagement académique est corrélé en moyenne à l'accroissement des performances scientifique - Le nombre de chercheurs engagés est en forte augmentation - Les résultats de l'engagement sont hétérogènes au niveau individuel, et les effets sur la qualité des découvertes sont non démontrés	<i>Guldbrandsen & Smeby (2005), Tijssen (2018), Bikard & al. (2019)</i>
Leviers de performances	- Un processus qui n'est pas automatique (enjeux d'absorption et d'exploitation des connaissances scientifiques spécifiques). - Leviers de performances : pilotage des collaborations OPR – entreprises, management de l'expertise	<i>Arora & al. (2018), Zahra & al. (2018), Noteboom & al. (2007), Cabanes & al. (2020)</i>	- La performance scientifique peut être renforcée par l'accès à de nouvelles idées, la capacité de tests, diversité des équipes favorisant la créativité, etc. - Peu de leviers managériaux concrets ; mais quelques pistes émergentes : sélectivité, invention-découverte simultanée, division du travail	<i>Van Looy & al., 2006, Callaert & al. 2015, Narayanamurti & Odumosu (2016), Goldstein & Naryanamurti (2018)</i>

Tableau 5 - Synthèse des apports de la littérature

Ainsi, nous pouvons conclure sur les limites de la littérature, que nous contribuerons à dépasser dans le cadre de ce travail de thèse sur le modèle de couplage à double impact simultané :

- **Limite N°1** : les travaux sur l'engagement académique ne semblent pas modéliser de manière adéquate le rôle joué par les industriels dans ce processus, qui sont décrits comme de simples apporteurs de données relatives au contexte, ou comme une entité posant des questions de recherche intéressantes (de Wit-de Vries *et al.*, 2018). Développer une approche plus complète semble nécessaire pour faire avancer ces travaux. Il s'agit aussi d'un prérequis à la démonstration d'un possible double impact simultané.

- **Limite N°2 :** la littérature sur l’engagement académique reste relativement silencieuse sur la capacité des chercheurs engagés à générer les avancées scientifiques les plus conséquentes de leurs champs de recherche (Perkmann *et al.*, 2021). Or, si le modèle à double impact simultané est valide, il sera intéressant de montrer en quoi l’engagement qui le caractérise permet de favoriser ces découvertes de premier plan.
- **Limite N°3 :** les travaux sur les stratégies de recherche et les modes de management qui peuvent permettre un double impact sont aujourd’hui limités et font l’objet d’appels pour des travaux additionnels (Callaert *et al.*, 2015 ; Tijssen, 2018). En particulier, l’approche dite de découverte – invention simultanée, si elle semble pertinente, a été démontrée par des cas d’études qui relèvent plutôt de l’anecdote (Narayanamurti et Odumosu, 2016), ou dans des cadres très spécifiques comme le Département de l’Énergie (Goldstein et Narayanamurti, 2018). De plus, ces approches ne reposent pas sur un modèle explicatif du phénomène (qui permettrait également d’envisager les conditions de succès et d’échec), mais plutôt sur une analyse empirique a posteriori. Il sera nécessaire de prolonger ces travaux, et d’en apporter les facteurs explicatifs, et ce dans des contextes variés.
- **Limite N°4 :** les travaux sur l’utilisation des connaissances scientifiques développées par des centres de R&D internes aux entreprises pour le développement de nouveaux produits sont aujourd’hui limités, y compris au regard des conditions managériales requises (Zahra, Kaul et Bolívar-Ramos, 2018). Nous tenterons de répondre également à cette limite dans le cadre de nos travaux sur la question du management du modèle à double impact simultané.

Ainsi, alors que nous avons pu lister les principales limites évoquées dans la littérature auxquelles nous devons faire face pour aborder la question du modèle de couplage à double impact simultané, ces éléments nous permettent de déterminer nos questions de recherche.

4.2. Questions de recherche

Ainsi, notre analyse de la littérature et de ses limites nous permet de déterminer trois principales questions de recherche dans ce travail exploratoire sur un objet d’étude nouveau : le couplage entre activité de recherche scientifique et activité de développement de produits, procédés ou services au sein d’un même projet, que nous qualifions de couplage à double impact simultané.

Comme nous l'avons montré au Chapitre 1, le modèle à double impact simultané semble être prôné par plusieurs institutions et organisations (Standford, US Département de l'Énergie, etc.). Notre analyse de la littérature suggère qu'il est possible de concevoir un tel couplage puisque les activités pourraient avoir l'une sur l'autre des effets positifs. Notre première ambition est donc de décrire les mécanismes sous-jacents à un tel modèle et d'en démontrer la pertinence. Ainsi notre première question de recherche peut être ainsi déterminée :

QUESTION DE RECHERCHE N°1

Comment modéliser un couplage à double impact simultané entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits, procédés ou services ?

Cette première question de recherche est de taille : il nous faut montrer que nous pouvons concevoir théoriquement un modèle qui dépasse l'apparente contradiction entre une recherche linéaire qui semble favoriser les découvertes scientifiques, mais dont le transfert vers l'industrie semble difficile, et une science résolutoire qui semble favoriser l'application et le développement de produits au détriment des découvertes scientifiques. Cela nécessite aussi un raffinement du modèle conceptuel utilisé : il nous faut ici dépasser les concepts de « bonne distance » entre sciences et industrie. Pour cela, nous allons recourir à un cadre théorique original qui nous permettra d'aborder ce questionnement sous l'angle du raisonnement cognitif : les théories de la conception (ie. *design theories*). Nos travaux viseront à envisager à travers ce cadre théorique plusieurs types de couplage pour discuter les approches plus traditionnelles, et également le couplage à double impact simultané. Nous discuterons les différents types de couplage, et illustrerons notamment le cas le plus en rupture, à travers un cas d'étude approfondi sur la découverte de CRISPR-Cas9 comme système immunitaire adaptatif des bactéries dans l'industrie agro-alimentaire.

Après avoir modélisé en particulier le couplage à double impact simultané et mis en exergue les différences avec les couplages plus classiques, nous serons à même de nous interroger sur les dynamiques historiques des couplages, et sur leurs performances. En effet, nous aurons pu mettre en exergue une nouvelle catégorie de couplage : le double impact simultané. Il sera alors nécessaire de s'interroger sur la pertinence de cette nouvelle catégorie. En particulier, il sera important de déterminer si elle permet de revisiter notre compréhension des dynamiques de la recherche, et en particulier les cas relevant traditionnellement de la

« recherche fondamentale » (plus proche de couplages hérités du modèle linéaire) et de la « recherche appliquée » (plus proche de couplages de science résolutoire).

QUESTION DE RECHERCHE N°2

Quelle dynamique historique et quelles performances pour le modèle de couplage à double impact simultané dans les couplages relevant traditionnellement de la « recherche fondamentale » et de la « recherche appliquée » ?

Ici, nous étudierons plus particulièrement deux terrains distincts. Dans un premier temps, nous analyserons le cas des lauréats du Prix Nobel, un contexte généralement associé à la recherche fondamentale où le modèle de recherche linéaire semble prédominant. Dans un second temps, nous explorerons le cas des collaborations OPR – industrie dans le cas des doctorats collaboratifs (thèses CIFRE), un contexte associé cette fois aux sciences appliquées où le modèle de science résolutoire semble prépondérant. Soulignons ici que notre effort de modélisation préalable va permettre de construire des hypothèses pertinentes quant à la dynamique et les performances des différents modèles de couplages dans ces deux contextes.

Après avoir montré que nous trouvons des traces conséquentes du modèle de couplage à double impact simultané dans les deux contextes envisagés et discuté de ses performances vis-à-vis des autres couplages, nous nous poserons plus précisément la question des conditions et cadres institutionnels nécessaires à son existence.

QUESTION DE RECHERCHE N°3

Quels cadres institutionnels et conditions pour favoriser les performances du modèle de couplage à double impact simultané ?

Cette question de recherche ouvre de très nombreuses possibilités d'études dans divers contextes. Il sera donc nécessaire de prioriser : deux contextes particuliers seront retenus. Dans un premier temps, nous mènerons une étude sur les régimes de pilotage de l'expertise qui pourraient favoriser le couplage à double impact simultané dans la R&D industrielle. En effet, cet enjeu est apparu comme clé au regard d'une meilleure compréhension et d'un meilleur pilotage des activités de recherche scientifique menées par des entreprises. Pour cela, nous mènerons notre analyse dans le secteur du pétrole et du gaz, choisi pour le renouvellement

profond de la dynamique d'innovation du secteur depuis une dizaine d'années (Perrons, 2014). Dans un second temps, rappelons que nous avons montré au Chapitre 1 que le couplage à double impact simultané pourrait s'avérer utile face aux crises qui nécessitent développement de nouvelles connaissances scientifiques et innovation. Or, au cours de cette thèse est survenue une crise particulièrement majeure liée au Covid-19, qui illustre là aussi cet enjeu de double impact (développement de nouvelles connaissances en épidémiologie pour faire face au virus, développement de vaccins). Ainsi, nous étudierons ici dans quelle mesure les crises répétées de coronavirus (SARS-Cov1, MERS-Cov, Cov-19) sont un catalyseur de couplages à double impact simultané, et quels cadres institutionnels permettent aux industriels de favoriser le couplage à double impact simultané.

Avant de présenter nos résultats, nous présentons la méthodologie de ce travail de recherche.

Synthèse du Chapitre 2

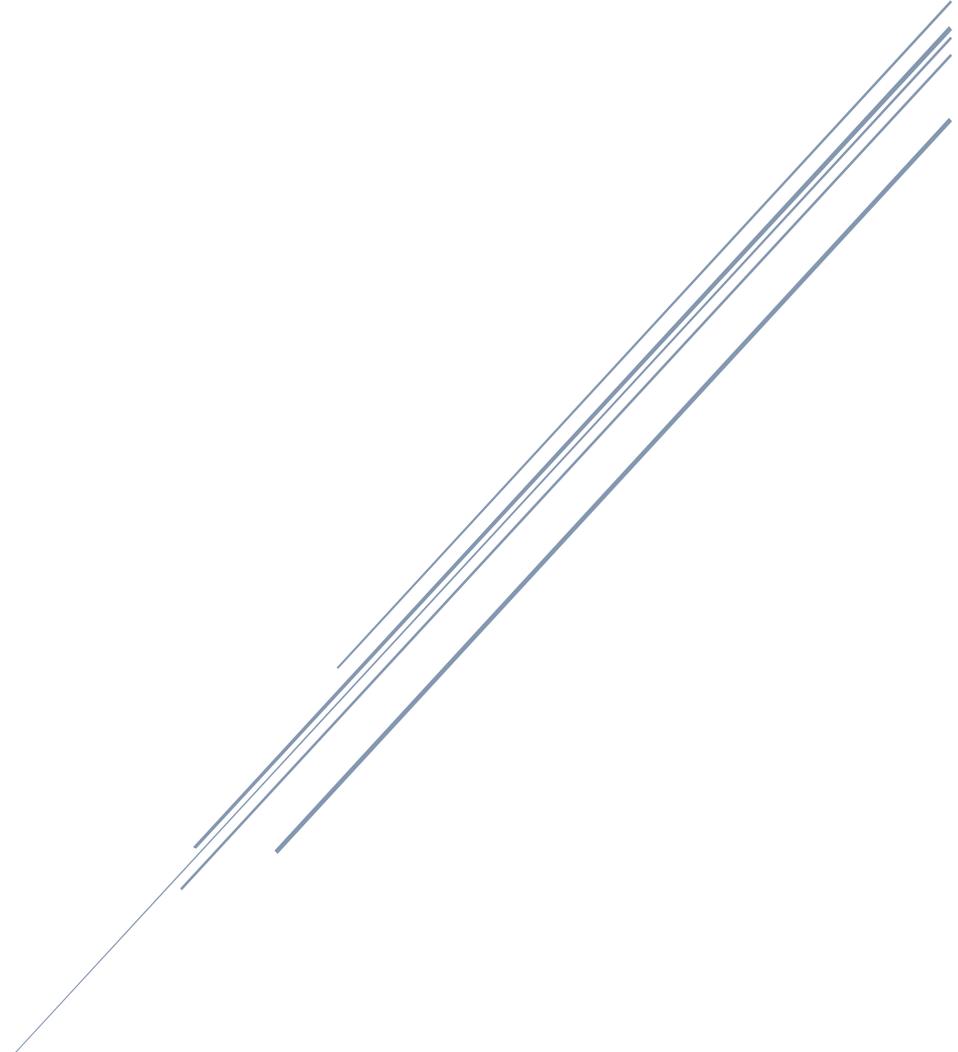
Ce second chapitre visait à capitaliser sur la littérature en sciences de gestion pour étudier la possibilité d'un couplage à double impact simultané.

Dans un premier temps, nous nous sommes demandé si les activités de recherche scientifique pouvaient avoir des effets positifs sur les activités de développement de produits, procédés et services. En nous appuyant sur la littérature de l'invention combinatoire, nous avons montré que les connaissances scientifiques pouvaient être intégrées dans des inventions, au côté d'autres types de connaissances. Par ailleurs, en s'appuyant sur des méthodes bibliométriques, certains auteurs démontrent une corrélation positive entre qualité des connaissances scientifiques combinées dans des inventions, et qualité desdites inventions, un régime d'innovation qui tend à devenir de plus en plus prégnant. Pourtant, le mécanisme n'est pas automatique : les entreprises font face à des difficultés d'absorption des connaissances scientifiques, y compris lorsqu'elles sont développées en interne de l'organisation. Un pilotage spécifique des collaborations OPR – entreprises, et de l'expertise semblent être des voies prometteuses pour faciliter les effets causaux positifs.

Dans un second temps, nous avons étudié l'effet des activités de développement sur les activités de recherche scientifique, principalement en nous appuyant sur la littérature de l'engagement académique (ie. chercheurs d'OPR en interaction avec l'industrie pour des travaux de recherche). Ici, les effets sont plus ambigus : certains auteurs suggèrent que l'industrie peut avoir un effet perturbateur sur la science, alors que d'autres proposent une forme d'hybridation positive entre science et société. En s'appuyant sur des méthodes bibliométriques, certains auteurs ont démontré que l'engagement académique est corrélé, en moyenne, à une plus grande productivité scientifique. Par ailleurs, le nombre de chercheurs des OPR en relation avec l'industrie a fortement augmenté depuis les années 1990. Toutefois, les résultats de l'engagement sont hétérogènes au niveau individuel, et les effets sur la qualité de la production scientifique, incertains. Si l'engagement académique semble pouvoir favoriser l'accès à des connaissances uniques de l'industrie, peu de leviers sont identifiés pour favoriser l'effet positif de ce mécanisme.

Ainsi, un couplage à double impact simultané peut être envisagé, mais ses conditions d'existences et de performances doivent être finement spécifiées. En effet, nous proposons quatre limites clés de la littérature qu'il nous faudra adresser (par exemple modélisation limitée du rôle de l'industrie dans la science, la spécification des stratégies de recherche comme facteur de contingence de la performance de l'engagement, etc.). Ces éléments nous amènent à spécifier nos questions de recherche (QR). Premièrement, nous nous demandons comment modéliser un couplage à double impact simultané entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits, procédés ou services (QR1). En nous basant sur les conditions d'existence et de performance du couplage à double impact simultané mis en exergue dans le modèle formel, nous nous interrogeons sur les dynamiques historiques et les performances d'un tel modèle, dans les couplages relevant plutôt classiquement de la « recherche fondamentale » et de la « recherche appliquée » (QR2). Enfin, après avoir démontré empiriquement l'intérêt de ce couplage, nous nous questionnons sur les cadres institutionnels et les conditions pour le favoriser (QR3).

CHAPITRE 3 : METHODOLOGIE



Ce chapitre vise d'abord à présenter la démarche de recherche de cette thèse, structurée en quatre phases (abduction, déduction, tests et induction), ainsi que le positionnement épistémologique du chercheur et l'itinéraire de recherche. Ensuite, nous revenons sur le matériau empirique et les méthodologies utilisées et développées dans cette thèse. Enfin, nous concluons par la proposition du synopsis de la thèse.

CHAPITRE 3 :

METHODOLOGIE

1.	<i>Démarche et itinéraire de recherche</i>	141
1.1.	Construction de la démarche de recherche.....	141
1.1.1.	Abduction : l’hypothèse du double impact simultané.....	142
1.1.2.	Dédution : un modèle formel des couplages science - industrie	143
1.1.3.	Tests empiriques : performances et dynamiques du couplage à double impact simultané.....	143
1.1.4.	Induction : cadres institutionnels pour le modèle à double impact simultané.....	144
1.2.	Itinéraire de recherche suivi pendant la thèse	145
2.	<i>Positionnement épistémologique</i>	150
2.1.	L’hybridation du « chercheur-acteur » et du « post-positivisme »	150
2.2.	Implications du positionnement théorique pour la conduite de la recherche :	153
3.	<i>Méthodologies de recherche et matériaux empiriques</i>	155
3.1.	QR1 – Modèle formel et cas d’étude :	156
3.1.1.	Modèle formel des couplages science – industrie.....	156
3.1.2.	Démonstration empirique du modèle formel : le cas CRISPR-Cas9	157
3.2.	QR2 – Tests empiriques quantitatifs des conditions d’existence et de performances du modèle formel	160
3.2.1.	Test du modèle formel dans la recherche dite fondamentale	160
3.2.2.	Test du modèle formel dans la recherche dite appliquée	164
3.3.	QR3 – Analyse des cadres institutionnels et des conditions	171
3.3.1.	R&D industrielle : régimes de dynamique de l’expertise pour le double impact simultané	171
3.3.2.	Crises : conditions et cadres institutions pour le double impact simultané	178
4.	<i>Focus méthodologique : l’approche bibliométrique</i>	181
4.1.	La bibliométrie comme méthode scientifique	181
4.2.	Bases de données bibliométriques exploitées dans la thèse	182
4.2.1.	Base de données de publications scientifiques	182
4.2.2.	Bases de données de brevets d’invention	184
4.2.3.	Publications scientifiques dans les brevets (SNPL).....	189
4.3.	Principaux indicateurs et proxys utilisés et leurs limites.....	189
4.3.1.	Qualité d’une invention ou d’une découverte scientifique.....	190
4.3.2.	Orientation des travaux de recherche.....	192
4.3.3.	Publications scientifiques industrielles et efforts scientifiques des entreprises	192
5.	<i>Synopsis de la thèse</i>	193
	<i>Synthèse du Chapitre 3</i>	198

Dans ce Chapitre 3, nous présentons d'abord la démarche et l'itinéraire de recherche. Nous expliciterons ensuite notre positionnement épistémologique, avant de décrire les méthodologies de recherche utilisées et développées pour répondre à chacune des questions de recherche, et le matériau empirique associé. Nous ferons un focus spécifique sur les méthodes bibliométriques, un point clé pour cette thèse. Enfin, nous concluons par la présentation du synopsis des résultats de la thèse.

1. Démarche et itinéraire de recherche

Dans cette section, nous présentons dans un premier temps la démarche de recherche de cette thèse, qui s'appuie sur quatre grandes phases distinctes : *abduction*, *déduction*, *tests* et *induction*. Dans un second temps, nous revenons sur l'itinéraire de recherche et le déroulé du travail de thèse.

1.1. Construction de la démarche de recherche

La démarche de recherche de cette thèse s'articule autour de quatre grandes phases successives synthétisées dans la Figure 15 ci-dessous. Nous détaillons ci-après le contenu et la logique de ces différentes phases.

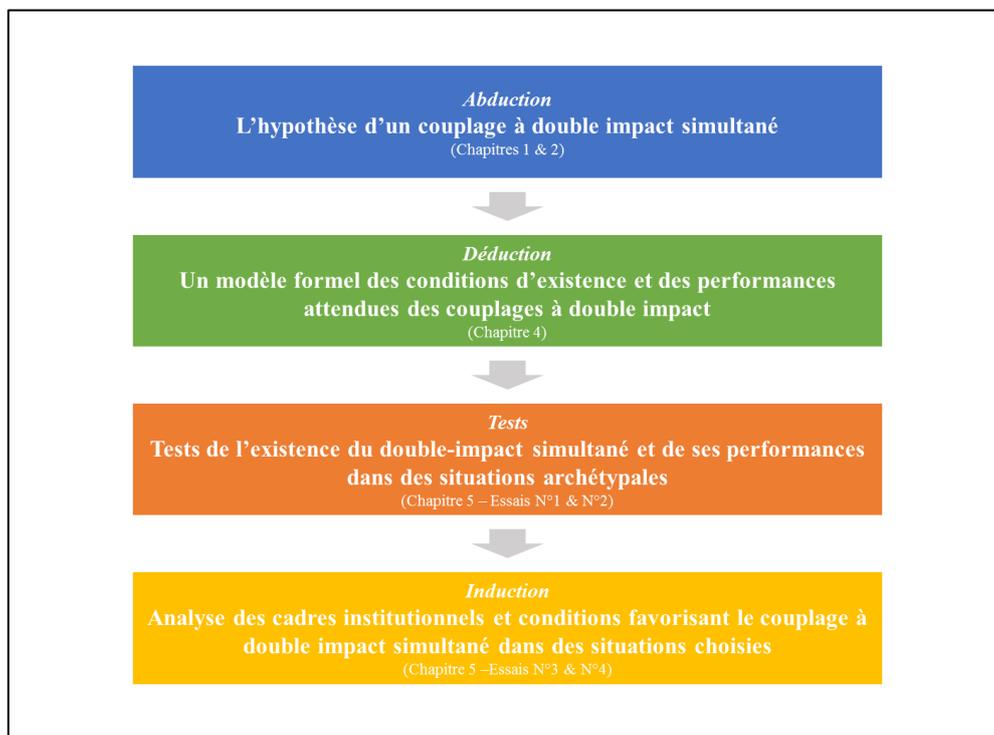


Figure 15 - Démarche de recherche

1.1.1. Abduction : l'hypothèse du double impact simultané

Comme nous l'avons montré dans les Chapitres 1 et 2, cette thèse part d'un objet de recherche plutôt ancré dans les discours institutionnels et qui n'a pas fait, à ce stade, l'objet d'études académiques systématique : le double impact simultané science - industrie. Seules exceptions notables : (1) les travaux de Narayanamurti et Odumosu (2016) qui s'inscrivent toutefois dans une démarche plus doctrinale sur le financement de la recherche et qui se basent davantage sur une collection de faits historiques plutôt que sur la proposition à proprement parler d'un modèle explicatif, et (2) l'étude de Goldstein et Narayanamurti (2018) sur ARPA-E qui introduit le vocable de « simultanéité », mais qui constate la performance du couplage uniquement dans une institution très spécifique. L'objet de cette thèse, l'hypothèse du couplage à double impact simultané, a donc dû être en quelque sorte « conçu » au démarrage des travaux à part de la littérature, et de l'analyse des doctrines et des faits sur l'organisation de la recherche depuis la Seconde Guerre mondiale, dans une logique abductive.

Soulignons que l'hypothèse pourrait à première vue paraître quelque peu naïve. Elle permet pourtant de se questionner sur les problématiques contemporaines que rencontrent les institutions ou les décideurs publics qui défendent ce modèle, d'apporter un angle d'analyse nouveau face aux grandes transitions qui nécessitent la double création de connaissances scientifiques et d'innovation. Les débats sur la création d'une nouvelle agence de recherche au Royaume-Uni sont ici emblématiques de ces questionnements⁴⁶. Ajoutons que le chercheur disposait d'un terreau favorable à l'étude d'un tel modèle par son rattachement au Centre de Gestion Scientifique (CGS) de l'Ecole des Mines de Paris. En effet, l'étude des couplages à double impact permet de capitaliser sur un certain nombre de travaux qui n'avaient pas été interprétés avec un prisme commun : par exemple les travaux de Aggeri, Fixari et Hatchuel (1998) sur les approches scientifiques à l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), les travaux de Le Masson (2001) sur Recherche-Innovation-Développement (RID) dans les entreprises, les travaux historiques sur l'innovation de Le Masson et Weil (2016) comme le cas de Fayol, Chevenard et Guillaume, les travaux de Hatchuel *et al.* (2013) sur l'analyse de la science par les théories de la conception, ou encore les travaux de Cabanes (2017) sur le rôle de la recherche scientifique dans la dynamique de l'expertise.

⁴⁶ “A new UK research funding agency” – UK Parliament (fev. 2021) - <https://committees.parliament.uk/work/265/a-new-uk-research-funding-agency/publications/>

Ainsi, dans cette phase d'abduction, les Chapitres 1 et 2 ont permis de proposer l'hypothèse originale d'un couplage à double impact simultané, et d'en étudier la pertinence au regard de la littérature. Nous pouvons dès lors passer dans une seconde phase, de *déduction*.

1.1.2. Déduction : un modèle formel des couplages science - industrie

Dans cette seconde phase de recherche, nous proposons sur la base des connaissances acquises dans les Chapitres 1 et 2 d'en *déduire* théoriquement le fonctionnement de différents couplages science – industrie à double impact. L'enjeu ici est de révéler en particulier les conditions d'existence et de performance du couplage à double impact simultané, de façon comparative à celles des couplages plus traditionnels (hérités du modèle linéaire ou de la science résolutoire). Le modèle formel doit à la fois pouvoir expliquer les succès et les échecs de ces couplages traditionnels, mais aussi certains exemples historiques que nous avons analysés comme relevant potentiellement du couplage à double impact simultané.

Pour cette modélisation, présentée au Chapitre 4, nous avons fait le choix des théories de la conception : un cadre théorique qui comme nous le montrerons, s'avère particulièrement intéressant pour discuter des couplages entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits, procédés et services, et ce dans un cadre unifié. Après avoir développé le modèle, et donné quelques illustrations des couplages classiques, nous proposerons une démonstration de l'existence du couplage à double impact simultané à partir d'un cas d'étude au caractère extrême : la découverte de CRISPR-Cas9 comme mécanisme de défense immunitaire adaptatif des bactéries dans l'industrie agroalimentaire. Ce cas particulier nous permettra de valider, sur un cas unique, les conditions de validité et de performance du couplage à double impact simultané développées dans le modèle formel.

Sur la base de ce modèle formel, nous proposons une phase de tests empiriques du couplage à double impact simultané, là encore vis-à-vis des couplages plus classiques.

1.1.3. Tests empiriques : performances et dynamiques du couplage à double impact simultané

Dans cette troisième phase, après avoir proposé un modèle formel des conditions d'existence et de performance du couplage science – industrie à double impact simultané, nous testons empiriquement celles-ci à partir d'une démarche hypothético-déductive. Pour cela, nous avons choisi de nous intéresser à deux situations archétypales : la recherche dite "fondamentale" et la recherche dite "appliquée".

Comme nous l'avons montré au Chapitre 1, la recherche fondamentale s'inscrit plutôt dans une conception des relations science - industrie héritée du modèle linéaire, en s'appuyant sur le transfert de connaissances entre OPR et industriels. Pourtant, nous cherchons ici à déceler, si elles existent, des « traces » empiriques du couplage à double impact simultané, pour en étudier la dynamique historique et les performances.

Pour cela, nous menons dans un premier temps une étude quantitative longitudinale sur la cohorte quasi complète des lauréats du Prix Nobel de Physique, Chimie et de Médecine : des scientifiques récompensées pour leurs découvertes particulièrement novatrices sur les lois de la nature. En effet, les activités de recherche scientifique des lauréats du Prix Nobel sont généralement présentées comme relevant d'une logique inhérente au modèle linéaire : ils sont majoritairement affiliés à des OPR (sauf exception) et leurs découvertes scientifiques se diffusent vers l'industrie dans une logique de transfert (cas du graphène par exemple). Il est donc intéressant d'étudier si la catégorie nouvellement introduite de couplage à double impact simultané est pertinente dans ce cadre. Et si oui, il sera important de déterminer sa dynamique historique, et ses performances, par rapport aux autres modèles de couplages plus traditionnels.

Dans un second temps, nous nous intéressons davantage aux travaux de recherche dits « appliqués », relevant plutôt de la recherche partenariale. Nous prenons là encore un cas qui semble archétypal de ce type de recherche : celui des thèses en collaboration OPR – industrie, dans notre cas par le dispositif de thèses dites de Convention Industrielle de Formation à la REcherche (CIFRE). Nous souhaitons ici distinguer différents projets de recherche partenariale selon leur modèle de couplage, et étudier en particulier, les performances du couplage à double impact simultané.

Ces deux analyses sont présentées au travers des essais N°1 et N°2 dans la première partie du Chapitre 5, et permettent ainsi de *tester* les conditions et prédictions, à grande échelle, du modèle formel. Enfin, nous pouvons sur la base de ces résultats, engager une réflexion sur les cadres institutionnels et les conditions propices au couplage à double impact simultané.

1.1.4. Induction : cadres institutionnels pour le modèle à double impact simultané

Dans une dernière partie, nous engageons une réflexion plus *inductive*. À l'aune des résultats de la partie précédente et qui permettent de démontrer les performances supérieures du modèle de couplage à double impact simultané, malgré ses conditions d'existence restrictives, nous nous interrogeons sur les cadres institutionnels et les conditions qui pourraient

soutenir ce couplage. Précisons ici que nous nous intéressons ainsi aux régimes d'actions collectives qui permettraient de soutenir le couplage à double impact simultané, dans divers contextes (Hatchuel, 2005, 2019).

Soulignons que les résultats des parties précédentes ouvrent un large champ des possibles pour débattre de ces questions, avec une diversité de niveaux d'analyse (des cadres institutionnels au micromanagement) ou de contextes (OPR, entreprises, programmes étatiques) possibles. Nous avons fait le choix de traiter cette question d'abord en s'interrogeant sur les cadres institutionnels et les conditions de ce couplage particulier avec une approche macro, une approche qui nous a semblé plus pertinente à ce stade compte tenu du caractère novateur de la notion de double impact simultané. Nous mettrons ainsi en exergue des grands principes, cadres institutionnels ou régimes d'actions collectives plutôt que des préconisations managériales détaillées. Deux cadres spécifiques ont été sélectionnés à cet effet.

Dans un premier temps, nous avons choisi celui de la R&D industrielle. En effet, notre analyse de la littérature au Chapitre 2 nous a permis de montrer que les spécificités des activités de recherche scientifique dans le milieu industriel constituaient un sujet d'intérêt finalement peu abordé par la littérature. Nous avons donc choisi d'explorer quels sont les régimes de dynamique de l'expertise qui pourraient permettre, dans le cadre de la R&D industrielle conduite dans les entreprises leaders du secteur du pétrole et du gaz, de favoriser les couplages à double impact simultané.

Dans un deuxième temps, nous avons souhaité étudier plus précisément le cas des crises. Comme nous l'avons indiqué au Chapitre 1, le couplage à double impact simultané pourrait constituer un modèle d'intérêt lorsqu'il y a un besoin urgent de création de nouvelles connaissances scientifiques et d'innovation. Influencés par la crise du Covid-19 survenue au cours de cette thèse, nous avons souhaité prendre ce cas empirique spécifique afin d'étudier les cadres institutionnels qui favorisent l'émergence de couplage à double impact simultané pour les industriels de la pharmacie.

Ces deux analyses qui correspondent à cette approche plus inductive, et qui capitalisent sur les apports des résultats précédents, sont présentées dans la seconde partie du Chapitre 5 et correspondent aux essais N°3 et N°4.

1.2. Itinéraire de recherche suivi pendant la thèse

Après avoir présenté dans la section précédente, le phasage de la démarche de recherche, nous précisons ici l'itinéraire de recherche.

Le chercheur est doctorant au Centre de Gestion Scientifique (CGS) de l’Ecole des Mines de Paris, et membre de la Chaire Théories et Méthodes de la Conception Innovante (TMCI) pendant toute la durée des travaux.

Remarquons d’abord que cette thèse s’est déroulée dans le cadre du dispositif des Conventions Industrielles de Formation à la REcherche (CIFRE). Lors d’une phase préliminaire (janvier – août 2018), les directeurs de thèse et le chercheur ont conçu le sujet en partenariat avec l’Institut National de la Propriété Industrielle (INPI). Nous proposons une brève présentation de cette organisation dans Encadré 6 ci-dessous. L’INPI a été un soutien particulier pendant toute la durée de la thèse, notamment en apportant des ressources matérielles, financières et intellectuelles pour alimenter le travail de recherche. Ces éléments sont détaillés dans l’Encadré 7 ci-dessous.

Au cours de la thèse, le chercheur participe et co-pilote également deux projets de recherche partenariale :

- Projet ANRT – dans le cadre d’un projet de recherche entre l’Ecole des Mines de Paris, la Chaire Théorie et Méthodes de la Conception Innovante, et la direction de l’Association Nationale de la Recherche et de la Technologie et découpé comme suit :
 - Phase 1 – initialisation : juin 2018 – décembre 2018 ;
 - Phase 2 – analyses : mars 2020 – décembre 2020 ;
 - Phase 3 – valorisation : janvier 2021 – juillet 2021.
- Projet Total – dans le cadre d’un projet de recherche entre l’Ecole des Mines de Paris, la Chaire Théorie et Méthodes de la Conception Innovante et la R&D Groupe de Total, de janvier à décembre 2019.

Les différentes étapes de l’itinéraire de recherche, découpées selon les quatre phases de la démarche, sont synthétisées dans la Figure 16 ci-dessous. Cette figure reprend le phasage des différents projets de recherche, la participation à des formations, des conférences scientifiques associées (voir Tableau 8 p. 155 pour le détail) et les dates d’envoi de papiers à des revues. Nous renvoyons par ailleurs le lecteur à l’Annexe 1 (voir p. 493) pour le détail des échanges, réunions et entretiens réalisés au cours de la thèse découpé par projet de recherche.

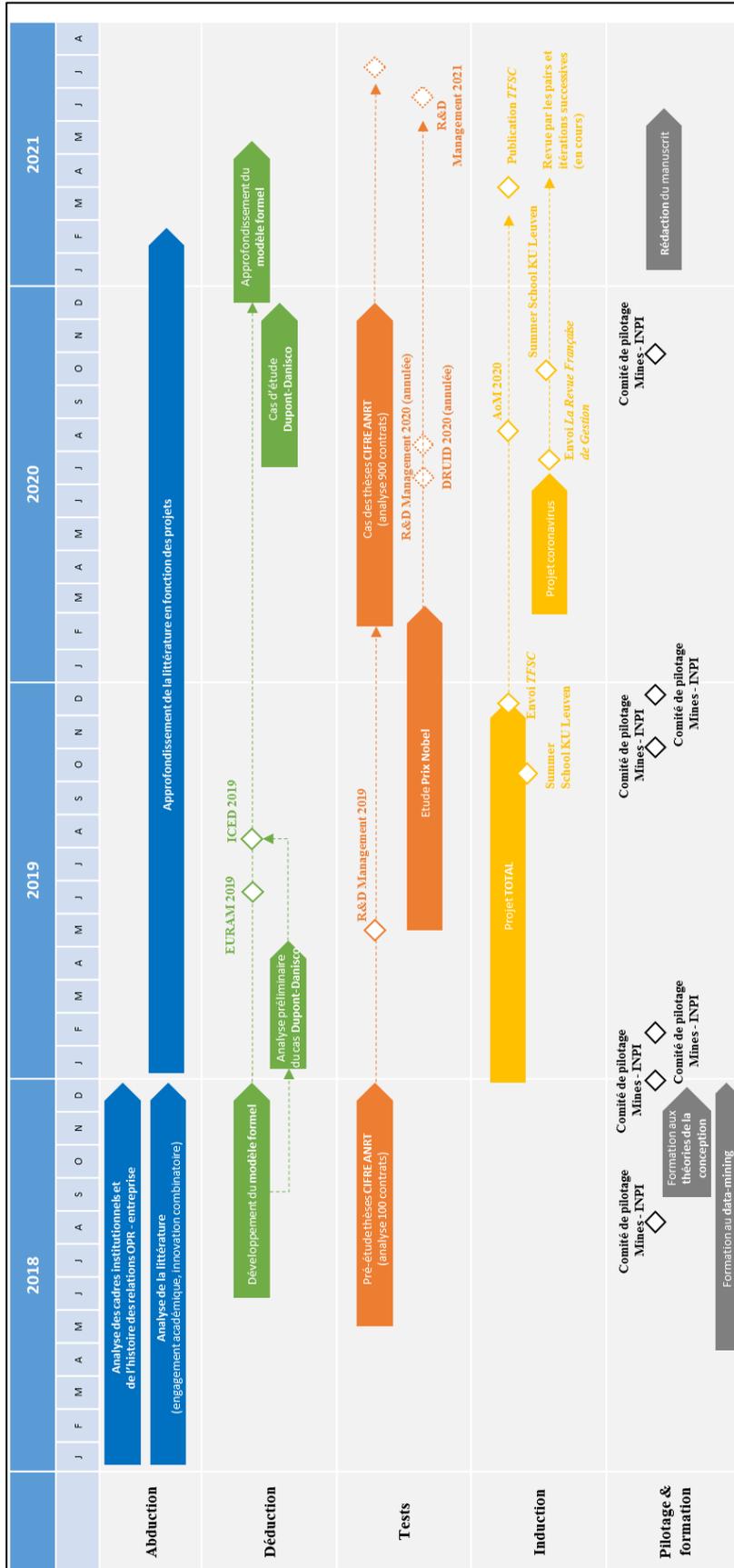


Figure 16 - Synthèse de l'itinéraire de recherche

Encadré 6 – Rôles et Missions de l’INPI

L’INPI est un Établissement Public autofinancé et placé sous la tutelle du Ministère de l’Economie et des Finances. L’INPI « participe à l’élaboration et la mise en place des politiques publiques dans les domaines de la propriété industrielle, du soutien à l’innovation et à la compétitivité des entreprises et dans la lutte anti-contrefaçon »⁴⁷.

Aujourd’hui, les missions de l’INPI peuvent être résumées ainsi, d’après l’article L411-1 du Code la Propriété Intellectuelle :

- Centraliser et diffuser toute information nécessaire pour la protection des innovations et pour l’enregistrement des entreprises ;
- Réceptionner les dépôts des demandes des titres de propriété industrielle, les examiner, les délivrer et les enregistrer et veiller à leur surveillance et à leur maintien ;
- Proposer des adaptations du droit national et international aux besoins des innovateurs ;
- Sensibiliser et former dans les domaines de la protection des innovations.

Pour donner quelques ordres de grandeur : l’INPI est un institut déployé sur le territoire dans 23 sites distincts et emploie 780 personnes au 07 janvier 2021. L’INPI a traité en 2019 :

- 17 000 demandes de dépôts de brevets ;
- 90 000 demandes de dépôts de marques ;
- 6 000 demandes de dépôts de dessins et modèles.

Les principales métriques de performance de l’Institut sont résumées dans la Figure 17 ci-dessous issue du Rapport Annuel 2019.

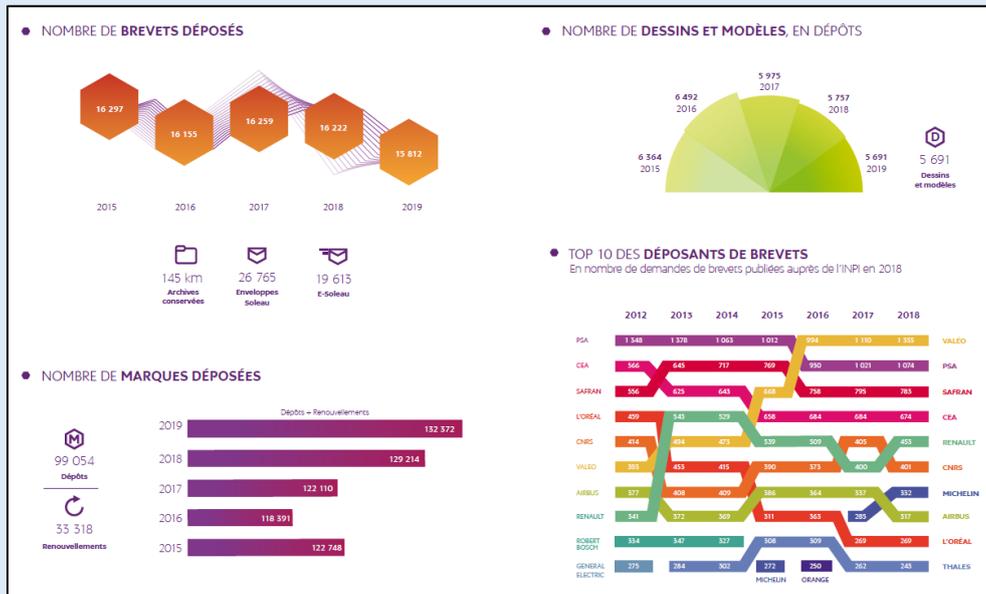
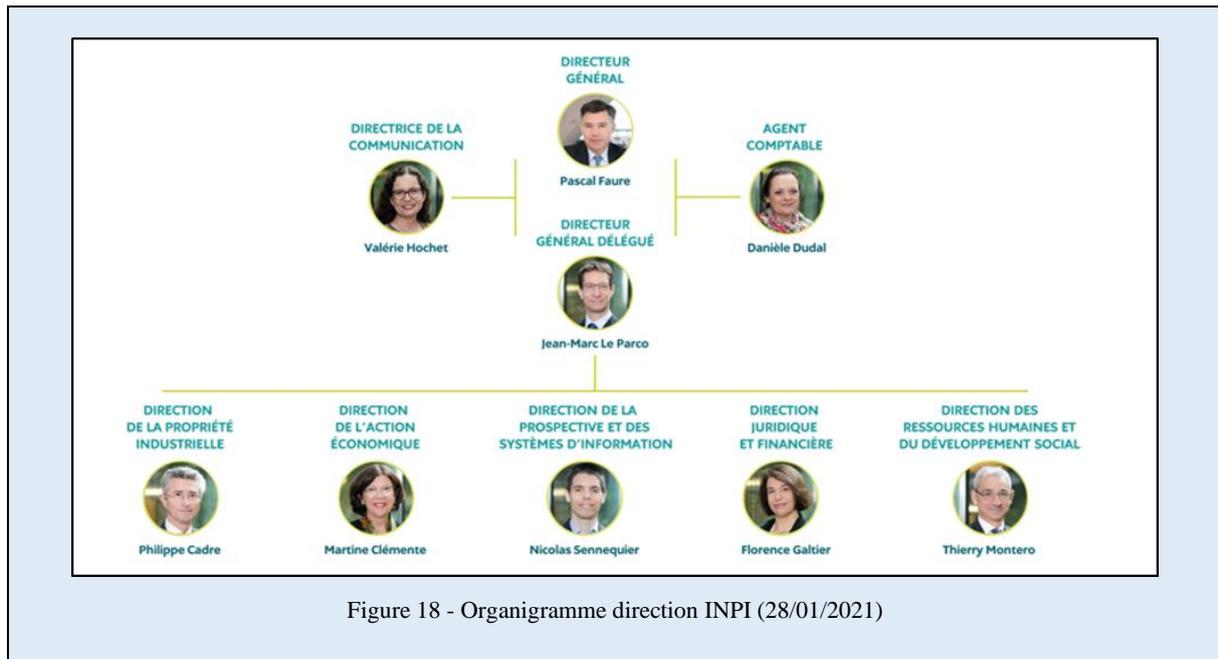


Figure 17 - Principaux indicateurs de performance INPI (source INPI, 2020)

L’organigramme de la direction de l’Institut est présenté dans la Figure 18 ci-dessous. On distingue en particulier la Direction de la Propriété Industrielle qui gère les dépôts et enregistrement des titres de propriété industrielle : c’est dans cette division que se situent notamment les « examinateurs brevets ». La Direction de l’Action Economique est pour sa part principalement en charge des actions de sensibilisation et de valorisation de la Propriété Industrielle, sur l’ensemble du territoire. Enfin, la Direction de la Prospective et des Systèmes d’Information (DPSI) est en charge de la coordination de la stratégie, des projets numériques innovants et des systèmes d’information de l’Institut.

⁴⁷ Site Web INPI consulté le 28/01/2021



Encadré 7 – Positionnement du chercheur au sein de l'INPI

L'INPI a un rôle particulier dans cette thèse puisque le chercheur est salarié de l'Institut dans le cadre du dispositif de Convention Industrielle de Formation à la REcherche (CIFRE). Ainsi, le chercheur occupe le poste de « chercheur » au sein de l'organisation pendant une durée de 36 mois d'aout 2018 à aout 2021 et dispose d'un bureau permanent au siège de l'Institut situé à Courbevoie. On peut distinguer dans cette expérience deux phases distinctes avec deux positionnements différents dans l'organisation liés à des effets de réorganisation :

- Période aout 2018 – aout 2019 : rattachement au Directeur Adjoint de l'Institut en charge de l'Innovation (poste aujourd'hui supprimé de l'organigramme suite à une réorganisation) – Frédéric Caillaud ;
- Période septembre 2019 – septembre 2021 : rattachement au Directeur de la Prospective et des Systèmes d'Information (DPSI) – Nicolas Sennequier.

Le positionnement particulier dans l'organisation a permis au chercheur d'être confronté aux enjeux de valorisation de la propriété industrielle par des échanges réguliers sur le contenu des travaux et de la recherche, principalement auprès des deux responsables hiérarchiques disposant d'une expérience conséquente dans les domaines de la valorisation et les relations OPR – entreprises (à l'INPI mais aussi par des expériences préalables). Les travaux ont également fait l'objet de présentations avec d'autres membres de la direction de l'Institut (Directeur Général, Directeur de la Propriété Industrielle, Directrice de l'Action Economique, Directeur de Brevets, Directeur des Ressources Humaines et du Développement Social, Directrice de la Communication).

Dans l'axe 2 de son Contrat d'Objectifs et de Performance 2017 – 2020, l'INPI avait pour objectif de « Contribuer à la structuration et à l'efficacité de l'écosystème de l'innovation pour un meilleur accompagnement de l'innovateur » (COP, p. 4). Ainsi l'INPI souhaitait apporter de nouveaux outils ou indicateurs liés à la création et à la valorisation de la propriété industrielle, pour aider les entreprises, les organismes publics de recherche à optimiser sa gestion de l'innovation et des partenariats. L'INPI, qui se qualifie en « Maison des Innovateurs », souhaitait entraîner ses partenaires dans le développement d'actions conjointes en faveur de l'innovation. Ces éléments expliquent en partie l'implication dans les travaux de recherche académique pour mieux comprendre les logiques de valorisation entre OPR et entreprises. D'autre part, l'INPI souhaite mieux valoriser ses bases de données en les mettant plus largement à disposition, notamment de chercheurs. Ainsi, l'Institut a permis de fournir pour cette thèse un accès à ses propres bases de données internes. L'INPI a également contribué par la mise à disposition de bases de données mondiales sur l'analyse des brevets (non gérées en propre par l'INPI).

Ici, nous caractériserons les principales ressources intellectuelles qui sont venues alimenter ce travail avec l'INPI :

- Bases de données brevets :
 - Mise à disposition de l'outil d'analyse brevet Clarivate Analytics DERWENT ;
 - Montage d'un serveur SQL avec accès à la base brevet complète de l'Office Européen des Brevets.
- Compréhension fine du processus de dépôt de brevet (processus utilisé pour assurer un traitement adéquat des bases de données) et des enjeux associés à la valorisation :
 - Formation Brevet 2019 – 3 jours ;
 - Echanges réguliers avec les responsables de l'organisation.
- Compréhension des enjeux et du fonctionnement de la valorisation par des échanges réguliers avec les responsables dans l'organisation.
- Intégration du chercheur dans les milieux de la valorisation par la participation à des évènements (VIVATEC, Conférence Markus Evans, etc.)
- Allers-retours praticiens – chercheurs par des comités de pilotage réguliers avec les Directeurs de Thèse et les responsables dans l'organisation.

2. Positionnement épistémologique

Nous revenons dans un premier temps sur notre positionnement épistémologique, hybride entre « chercheur-acteur » et « post-positivisme ». Nous présentons dans un second temps les implications de ce positionnement pour la conduite des travaux.

2.1. L'hybridation du « chercheur-acteur » et du « post-positivisme »

Dans une première approche, nous pourrions être tentés de présenter nos travaux en tant que « chercheur-acteur » (Lallé, 2004). Cette thèse est d'abord une thèse CIFRE dans une organisation publique française, l'Institut National de la Propriété Industrielle (INPI), où le chercheur évolue en tant que salarié. Nous avons également exploré des terrains de recherche au travers de contrats de recherche partenariale, à la fois chez Total et à l'Association Nationale de la Recherche Technologique (ANRT). De plus, soulignons que les travaux ont été en profonde interface avec des praticiens au-delà de l'organisation principale qu'était l'INPI avec des rencontres nombreuses avec des directeurs de la propriété industrielle, des experts en innovation dans des OPR, la participation à des colloques de praticiens sur la valorisation ou l'organisation de la science. Enfin, ajoutons que d'une part, l'Ecole des Mines (y compris le laboratoire de rattachement, le Centre de Gestion Scientifique) peut être considérée comme une organisation qui promeut une logique de double impact simultané, et que d'autre part, le chercheur a une expérience professionnelle antérieure de deux ans dans le conseil en management, principalement sur des thématiques de management de l'innovation, dans un grand groupe industriel public en France. Le chercheur étant donc engagé dans des projets de recherche partenariale avec des industriels et des OPR, effectuant la recherche dans une

institution qui promeut le double impact simultané, et étant salarié d'une organisation publique intéressée par le sujet valorisation : il est bel et bien un acteur de ce système. Le cas est d'autant plus flagrant sur l'analyse des thèses CIFRE qui sera conduite dans cette thèse puisque le chercheur est lui-même participant au dispositif.

Pour tenter de mieux qualifier notre positionnement, nous pouvons recourir à la logique proposée par David (2000, p. 14) et synthétisée dans le Tableau 6.

		Objectif	
		Construction mentale de la réalité	Construction concrète de la réalité
Démarche	Partir de l'observation des faits ou d'un travail du groupe sur son propre comportement	Observation participante ou non. Élaborer un modèle descriptif du fonctionnement du système étudié	Recherche-action Aider à transformer le système à partir de sa propre réflexion sur lui-même, dans une optique participative.
	Partir d'une situation idéalisée ou d'un projet concret de transformation	Conception « en chambre » de modèles ou outils de gestion. Élaborer des outils de gestion potentiels, des modèles possibles de fonctionnement, sans lien direct avec le terrain.	Recherche-intervention. Aider sur le terrain, à concevoir et à mettre en place des modèles et outils de gestion adéquats, à partir d'un projet de transformation plus ou moins complètement défini

Tableau 6 - Positionnement méthodologique en science de gestion (source : David, 2000, p.14)

Sur la base de ces éléments, nous pouvons conclure que notre objectif est une « construction mentale de la réalité » par le modèle de couplage à double impact simultané. Nous pensons que s'il existe, ce dernier peut permettre de constituer de nouveaux observables des couplages science - industrie. Pourtant, le choix de la « démarche » n'est pas trivial. Un faisceau d'indices nous indique que le modèle à double impact simultané existe, notamment en s'appuyant sur les communications institutionnelles, ce qui reste pourtant à démontrer. Or, s'il existe, nous pouvons partir des faits pour le révéler et auquel cas nous nous inscrivons plutôt dans une logique d'observation. Soit à l'inverse, au-delà de la simple communication institutionnelle, le modèle n'existe pas (encore), et dans ce cas, cela signifierait que nous nous inscrivons dans la démonstration d'une situation idéalisée (quart sud-ouest du tableau). Le questionnement serait alors : peut-on créer un couplage entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits, procédés ou services qui soit vertueux de manière simultanée ? Ici en post-rationnalisant, nous pouvons montrer que le modèle existe bel et bien : nous considérerons donc au moment de l'écriture de ce manuscrit que le modèle conceptuel proposé en lien avec la question de recherche N°1 est le résultat d'une combinaison d'observations de

la réalité empirique permise par les terrains, et d'éléments issus de la littérature en sciences de gestion (voir Chapitre 2). Ainsi, si nous sommes dans le quadrant nord-ouest du modèle de David (2000) « observation participante ou non », il nous faut déterminer le statut de notre participation. Au regard de notre implication dans diverses organisations au cours de ces travaux, nous aurions tendance à répondre par l'affirmative : nous avons un rôle de participant. Pourtant, le questionnement est légitime puisque notre action a principalement consisté à (1) générer des modèles en lien avec l'observation et la théorie, (2) tester la performance et les régimes managériaux associés à ces modèles en développant un arsenal méthodologique dédié, (3) puis enfin diffuser largement ces résultats pour bénéficier de boucles de rétroactions et d'appuis interprétatifs dans l'échange avec les praticiens. Cela invite à s'interroger sur la notion même de participation : est-ce que la diffusion des travaux, des cadres conceptuels, des résultats de recherche constituent une « participation » ? Il nous semble là encore pouvoir répondre par l'affirmative puisque ces résultats contribueront potentiellement à transformer les organisations partenaires, sans que les effets soient directement tangibles à l'aboutissement de cette thèse. Nous supposons en effet que ce sont plutôt les modèles conceptuels, soutenus par un argumentaire basé sur leurs performances, qui se diffuseront. L'opérationnalisation viendra potentiellement, dans un second temps, et n'a pas été un objectif direct recherché.

En analysant à posteriori nos travaux, nous pouvons souligner que l'ensemble des éléments qui ont porté sur l'analyse de la performance des modèles de couplage s'appuie sur une approche modélisatrice et hypothético-déductive. Cela nous enjoint à nous interroger sur un positionnement post-positiviste. Ce dernier peut être défini comme tel :

« [Le post-positivisme] se caractérise par la place prépondérante qu'il accorde à des dispositifs méthodologiques marqués par la quantification, l'expérimentation et à la validation empirique des énoncés selon un principe hypothético-déductif ; une visée de découverte de la vérité et la nature explicative des connaissances scientifiques ; la revendication d'une posture de neutralité et d'objectivité du chercheur et de sa démarche. » (Allard-Poesi et Perret, 2014, p. 14)

Il est clair que notre approche de la performance et de l'analyse de l'ampleur des couplages à double impact simultané, voire même des conditions et des facteurs institutionnels associés, est fortement marquée par ces principes hypothético-déductifs et de quantification. Nous avons abondamment eu recours à des analyses de bases de données de brevets et de publications scientifiques, avec le développement d'outils d'observations particuliers comme l'analyse des réseaux. Nous avons aussi largement utilisé des modèles statistiques pour démontrer nos hypothèses (régressions statistiques notamment). Enfin, nous avons également adopté un

positionnement qui tend à revendiquer une visée de « découverte de la vérité » et explicative : le modèle à double impact simultané existe-t-il sous certaines formes et dans certains contextes ? Quelles sont ces performances dans tel ou tel contexte ? Dans ce cadre, nous utilisons une approche hypothético-déductive qui suit la logique suivante (Anderson, 1983):

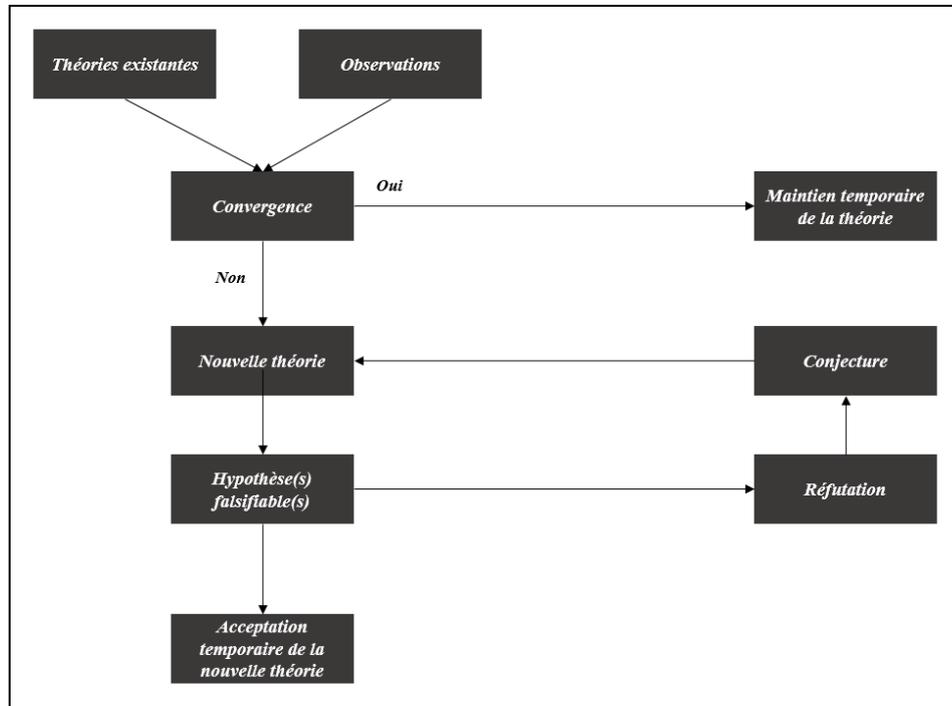


Figure 19 - Modèle de test hypothético-déductif (source : Anderson, p. 28)

Pourtant, comme nous venons de le montrer plus haut, la logique de revendication d'une posture de neutralité et d'objectivité ne peut être à première vue assurée du fait du positionnement vis-à-vis du terrain.

2.2. Implications du positionnement théorique pour la conduite de la recherche :

Ainsi, comme notre approche est hybride, il nous faut nous attarder sur les pratiques de recherche à mettre en place pour assurer la validité scientifique des résultats.

Commençons par la partie la plus simple à traiter : les tests basés sur des raisonnements hypothético-déductifs. Comme évoqué ci-dessus, notre dispositif de recherche va consister à s'efforcer de faire émerger des « trous » dans la littérature pour établir notre nouvelle théorie basée sur la logique de couplage à double impact simultané, et d'appréhender avec toute la rigueur scientifique requise, les analyses quantitatives que nous avons menées. En particulier,

un soin particulier sera apporté au nettoyage des données d'entrée et à la robustesse des traitements informatiques (développement de programmes sous R et STATA[®]) et statistiques. Lorsque l'analyse statistique sera basée sur une première approche qualitative de codage (voir le cas des CIFRE), cette dernière se fera toujours en double voire triple aveugle pour assurer la consistance des données.

À l'inverse, nous devons nous intéresser aux effets de contextualisation de notre recherche, en particulier en lien avec la modélisation. Il nous faut ici considérer notre positionnement de « chercheur-acteur » : il nous est nécessaire de mettre en place un arsenal permettant d'assurer la prise de recul et la validité scientifique des résultats obtenus. Pour cela, nous suivons les recommandations de Lallé (2004) de se soumettre à une double évaluation périodique des praticiens d'une part, et de la communauté académique d'autre part. Nous exposons ainsi dans le Tableau 7 les présentations des travaux réalisées auprès de praticiens (au-delà des réunions classiques de pilotage des projets de recherche partenariaux) et dans le Tableau 8, les présentations des travaux réalisés auprès de la communauté scientifique (hors présentations internes au laboratoire). Ces allers-retours constants témoignent des efforts consentis à favoriser cette pratique de recherche.

Contexte	Date
Ministère de l'Enseignement Supérieur de la Recherche et de l'Innovation (responsable des CIFRE), Club ressourceur Scientifique de l'ANRT, Direction Générale de l'ANRT	22/10/2018
Journée des Partenaires de la Chaire Théorie & Méthodes de la Conception Innovante (SNCF, Airbus, Thalès, etc.)	18/01/2019
Réunion de travail Institut National de la Propriété Industrielle (INPI) & Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE)	26/02/2019
Total – Comité Semestriel Compétences R&D	17/04/2019
INPI – Directeur Général	31/08/2019
InnoEnergy School Total (présentation format poster)	10/10/2019
Journée des Partenaires de la Chaire Théorie & Méthodes de la Conception Innovante (SNCF, Airbus, Thalès, etc.)	18/01/2020
INPI – Directeur Général	18/02/2020
Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) – Responsable Innovation	12/06/2020
INPI – Responsable de l'offre client PME / TPE	20/06/2020
Institut National de la Propriété Industrielle – Comité métier	10/12/2020
Journée des Partenaires de la Chaire Théorie & Méthodes de la Conception Innovante (SNCF, Airbus, Thalès, etc.)	13/01/2021
INPI – Directeur Général	09/02/2021
INPI – Responsable du programme de valorisation université – industrie	25/02/2021
40 ans du dispositif CIFRE (ANRT, MESRI, en présence de Madame la Ministre de l'Enseignement Supérieur de la Recherche et de l'Innovation)	15/03/2021

Tableau 7 - Présentations praticiens

Type	Contexte	Date
Présentations en conférences internationales à comité de lecture*	<i>R&D Management Conférence</i> , Paris, France	Juin 2019
	<i>European Academy of Management Conference</i> , Lisbonne, Portugal	Juin 2019
	<i>International Conference on Engineering Design</i> , Delft, Pays-Bas	Août 2019
	<i>Academy of Management</i> , Vancouver, Canada (<i>en ligne</i>)	Août 2020
	<i>R&D Management Conférence</i> , Glasgow, Royaume-Uni	Juillet 2021 (à venir)
	<i>Academy of Management</i> , Philadelphie, Etats-Unis (<i>en ligne</i>)	Août 2021 (à venir)
Présentations en conférences juniors à comité de lecture	<i>Summer school on data & algorithms for science, technology and innovation studies</i> (KU Leuven, OEB), Vienne, Autriche	Sept. 2019
	<i>Summer school on data & algorithms for science, technology and innovation studies</i> (KU Leuven, OEB), Louvain, Belgique (<i>en ligne</i>)	Sept. 2020
Présentations informelles**	Réunion de travail Unité d'Economie Appliquée (UEA) de l'ENSTA Paristech	Mars 2019
	Présentation avec G. de Rassenfosse (EPFL)	Juin. 2019
	Présentation avec J. Luo (STUD)	Août 2019
	Réunion de travail avec l'Institut für Lebensmittel und Ressourcenökonomik, Bonn, Allemagne	Déc. 2019
* Soumissions à R&D Management Conférence 2020 et DRUID 2020 annulées suite aux Covid-19		
** Hors présentations au laboratoire de rattachement		

Tableau 8 - Présentations scientifiques

3. Méthodologies de recherche et matériaux empiriques

Dans cette section, nous revenons sur les principales méthodologies de recherche développées et utilisées dans cette thèse, et leur articulation avec le matériau empirique.

Les méthodologies utilisées et le matériau empirique sont spécifiques à chaque thématique abordée dans les questions de recherche. Nous détaillons dans cette section ces éléments, à l'exception de la méthode bibliométrique, qui compte tenu de son importance dans nos travaux et de sa transversalité, et traitée dans une section ad hoc (voir section 4 du présent Chapitre page 181). Nous en proposons dans le Tableau 9 une synthèse.

	Question de Recherche N°1		Question de Recherche N°2		Question de Recherche N°3	
Thème	Modélisation	Démonstration empirique	Recherche fondamentale	Recherche appliquée	R&D industrielle	Crises
Méthode	<i>Modèle formel</i>	<i>Cas d'étude</i>	<i>Analyse quantitative / bibliométrie</i>	<i>Analyse quantitative</i>	<i>Modélisation / Analyse quantitative / Bibliométrie</i>	<i>Analyse quantitative / Bibliométrie</i>
Matériau empirique	N/A	Découverte CRISPR-Cas9 comme système immunitaire adaptatif des bactéries	Publications scientifiques publiées et brevets déposés par des lauréats du Prix Nobel	Projets de thèse CIFRE (dossiers demande CIFRE, contrats de collaboration, questionnaires de fin de CIFRE)	Brevets des entreprises leaders du secteur pétrole et gaz	Publications scientifiques, brevets et projets de vaccins sur les coronavirus
Section	Chapitre 4 (Partie 1)	Chapitre 4 (Partie 2)	Chapitre 5 (Partie 1)	Chapitre 5 (Partie 1)	Chapitre 5 (Partie 2)	Chapitre 5 (Partie 2)
essais	N/A	N/A	Essai N°1	Essai N°2	Essai N°3	Essai N°4

Tableau 9 - Synthèse des méthodologies de recherche et matériau empirique

3.1. QR1 – Modèle formel et cas d'étude :

Dans cette sous-section, nous revenons sur les méthodologies et le matériau empirique associé à la première question de recherche : « *Comment modéliser un couplage à double impact simultané entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits, procédés ou services ?* ». Nous revenons ici sur la méthodologie utilisée pour développer le modèle formel.

3.1.1. *Modèle formel des couplages science – industrie*

L'approche de cette première question de recherche relève d'une logique *déductive* (voir sous-section 1.1.1 p. 142 ci-dessus). Nous déterminons à partir (1) des apports de l'analyse des paradoxes de relations science – industrie (Chapitre 1), (2) des apports de la littérature en sciences de gestion (Chapitre 2) et (3) du cadre théorique des théories de la conception, un modèle formel des couplages science – industrie. En effet, un modèle peut être décrit comme un construit qui permet de répondre à un certain nombre de questions au sujet d'un système cible réel, artificiel ou imaginaire (Varenne, 2011). Ici, nous cherchons à expliciter formellement les conditions d'existence et de performance d'un couplage à double impact simultané, vis-à-vis des couplages plus traditionnels. Nous expliciterons dans le Chapitre 4

l'intérêt de recourir au cadre des théories de la conception pour cela, et ses logiques de fonctionnement (en particulier la théorie C-K).

Soulignons que ce modèle formel a été développé tout au long de la thèse et a fait l'objet de modifications substantielles au fur et à mesure de l'avancée des travaux. Ainsi, il constitue un véritable cadre qui permet d'expliquer la logique d'exploration des questions de recherche N°2 et N°3. En effet, la seconde question de recherche vise à tester les conditions d'existence et de performances développées dans le cadre du modèle. La troisième question de recherche quant à elle, a pour objectif d'induire du modèle des préconisations en termes de cadres institutionnels et conditions susceptibles de favoriser les couplages à double impact simultané. Témoignage des évolutions du modèle formel, une première version du modèle formel a été proposée dès la première année de thèse et a fait l'objet de présentations en conférence (voir Annexe 2 page 497).

Il est ensuite nécessaire de démontrer empiriquement la pertinence du modèle formel, et en particulier le cas le plus en rupture : le modèle de couplage à double impact simultané.

3.1.2. Démonstration empirique du modèle formel : le cas CRISPR-Cas9

Pour valider les principes développés dans le modèle formel, et avant d'en tester les conditions à grande échelle, il est nécessaire de pouvoir démontrer son fonctionnement sur au moins un cas particulier. Si nous donnons quelques exemples des couplages plus traditionnels, il est nécessaire pour le cas du couplage à double impact simultané, de creuser un cas d'étude. Nous avons ainsi fait le choix d'adopter *la méthodologie du cas d'étude qualitatif* (voir notamment Goffin *et al.*, 2019 ; Yin, 2003). Le cas d'étude qualitatif peut être décrit comme suit :

« [Case study is defined as an] empirical research that primarily uses contextually rich data from bounded real-world settings to investigate a focused phenomenon » (Goffin *et al.*, 2019, p. 592)

En suivant les recommandations de Eisenhardt (1989) le cas d'étude est sélectionné dans une logique théorique : le nôtre est particulièrement divergent des construits de la littérature. En effet, le cas étudié ici est la découverte scientifique de CRISPR-Cas9 comme mécanisme de défense immunitaire des bactéries par l'industriel de l'agro-alimentaire DuPont-Danisco au milieu des années 2000. Ce cas est extrême : il s'agit d'une découverte scientifique majeure (article scientifique le plus cité sur la thématique CRISPR pendant une dizaine d'années), qui a contribué à la structuration du champ scientifique CRISPR, mais est une découverte réalisée

par un industriel. La découverte a également contribué à des applications chez DuPont-Danisco (voir Encadré 8). Ainsi, à la fois le cas semble diverger des construits de la littérature (rupture de la logique institutionnelle, découverte de premier plan), et la présence du double produit (publication scientifique de premier plan et brevets) semble permettre une analyse fine de la logique du double impact simultané à partir du modèle formel.

Nous spécifions ici les différentes sources de données utilisées pour analyser le cas (Gibbert et Ruigrok, 2010). Les données exploitées sont issues exclusivement de données à caractère public. Nous notons ici que le chercheur est en contact avec DuPont-Danisco notamment dans l'objectif de compléter le cas par des entretiens semi-directifs qui viendront alimenter un projet de recherche post-thèse. Toutefois, la collecte de données n'a pas démarré et pour des raisons de confidentialité, aucune information issue des échanges préparatoires à ces entretiens n'est révélée ici. Les données exploitées proviennent de différentes sources publiques pour assurer la triangulation des données (Yin, 2003). En particulier, il s'agit d'articles de presse et de vidéos rendues publiques. Nous attirons l'attention du lecteur sur la richesse des contenus vidéo qui constituent les données les plus détaillées sur le cas. Par exemple, la présentation de P. Horvath lors de l'obtention du Prix Massry permet de nous renseigner sur le déroulé de la recherche scientifique à DuPont-Danisco. Les données ont été retranscrites, et nous avons également capitalisé sur les supports de présentations utilisés pendant ces présentations que l'on peut retrouver dans les vidéos.

Les données sont référencées de façon à être utilisées dans la démonstration au Chapitre 4 (Tableau 10).

Type	Date	Taille / durée	Titre	Source	Ref.
Vidéos	07/04/2016	38 min	<i>Discovery of CRISPR-Cas, the bacterial immune system - Massry Prize Lecture.</i> Présentation de P. Horvath	UCLA	V1
	07/04/2016	12 min	<i>Les enjeux des nouvelles biotechnologies : la modification ciblée du génome avec CRISPR-Cas9.</i> Présentation de P. Horvath	Sénat	V2
	21/11/2016	72 min	<i>CRISPR-Cas Systems in Bacteria: Discovery and Applications.</i> Présentation de P. Horvath et R. Barrangou	Canada Gairdner Award	V3
	20/10/2017	35 min	<i>Le système CRISPR-Cas : un outil naturel d'amélioration et de marquage génétique de souches bactériennes.</i> Colloque de rentrée du Collège de France. La nature en questions. Présentation de P. Horvath	Collège de France	V4
	10/03/2019	18min	<i>Human Nature</i> (Chapitre 2), Film documentaire. Adam Bolt et Regina Sobel. Produit par News and Guts Films, The Wonder Collaborative	Netflix	V5
	14/02/2020	19 min	<i>Stories of CRISPR : Rodolphe Barrangou</i>	Wonder collaborative	V6
Articles de Presse	27/07/2016	3 pages	<i>La saga CRISPR-Cas 2/6 - Des ciseaux dans le yaourt</i>	Le Monde	P1
	01/08/2016	3 pages	<i>La piste aux étoiles</i>	Le Monde	P2
	02/08/2016	3 pages	<i>Les nouvelles icônes de la Biologie</i>	Le Monde	P3
	03/09/2016	3 pages	<i>Directeur scientifique chez DuPont à Dangé-Saint-Romain (Vienne), Philippe Horvath est codécouvreur du " ciseau moléculaire ", une avancée scientifique mondiale.</i>	La Nouvelle République	P4
	03/09/2016	2 pages	<i>Philippe Horvath Châtelleraudais Nobélisable</i>	Centre Presse	P5
Articles scientifiques	2015	10 pages	<i>Perspective : The Heroes of CRISPR</i> par E. Lander	Cell	S1
	2007	4 pages	<i>CRISPR provides acquired resistance against viruses in prokaryotes</i> par Barrangou et al.	Science	S2
Rapports	2020	14 pages	<i>Scientific Background on the Nobel Prize in Chemistry</i>	Comité Nobel	R1
	2018	33	<i>Landscape Analysis of CRISPR-Cas9</i>	Clarivate Analytics	R2
Brevets	2005	299 pages	<i>The present invention relates to the use of one or more cas genes for modulating resistance in a cell against a target nucleic acid or a transcription product thereof.</i>	Danisco	B1
	2006	49 pages	<i>Tagged microorganism and methods of tagging</i>	Danisco	B2

Tableau 10 - Données cas DuPont / Danisco

Nous utilisons ces éléments pour démontrer la pertinence du modèle à double impact simultané. Une présentation du contexte du cas est proposée au Chapitre 4.

Encadré 8 – DuPont-Danisco

Danisco est une entreprise danoise leader dans la production d'additifs alimentaires. En 2004, Danisco acquiert Rhodia Food (branche additifs alimentaires de Rhône-Poulenc), y compris le site français de Dangé-St-Romain qui nous intéresse tout particulièrement pour ce cas d'étude.

En 2011, Danisco comptait 6 800 employés à travers le monde et est racheté par DuPont pour 6,3 milliards de dollars⁴⁸, et intégré dans la division Nutrition & Biosciences.

Les activités qui nous intéressent particulièrement pour ce cas d'étude sont celles de la production de ferments lactiques (division Nutrition & Biosciences de DuPont) : des additifs qui comprennent des bactéries acides lactiques (par exemple *Streptococcus thermophilus*) qui, mélangées à du lait, permettent la fermentation et la production notamment de fromage et de yaourt. C'est en travaillant sur *Streptococcus thermophilus* que l'équipe de DuPont-Danisco a pu faire la découverte fondamentale de CRISPR-Cas9 comme mécanisme adaptatif de défense immunitaire des bactéries.

En janvier 2021, la branche Nutrition & Biosciences de DuPont fusionne avec IFF afin de créer le leader mondial des ingrédients et solutions pour l'agroalimentaire, les produits de soin et de bien-être⁴⁹.

3.2. QR2 – Tests empiriques quantitatifs des conditions d'existence et de performances du modèle formel

Dans cette sous-section, nous discutons les méthodologies et le matériau empirique utilisé pour répondre à la seconde question de recherche : quelle dynamique historique et quelles performances pour le modèle de couplage à double impact simultané dans les couplages relevant classiquement de la « recherche fondamentale » et de la « recherche appliquée » ?

3.2.1. Test du modèle formel dans la recherche dite fondamentale

Pour tester les conditions d'existence et de performance du couplage à double impact simultané dans la recherche dite « fondamentale » nous devons trouver un proxy le plus représentatif possible de ce type de recherche. Nous avons fait le choix de nous tourner vers l'étude des Prix Nobel (essai N°1).

Pascal Le Masson a pu mener un entretien avec Albert Fert, Prix Nobel de Physique Français, que le chercheur a pu réécouter et retranscrire. Celui-ci se présente comme un lauréat atypique : s'est par des relations privilégiées avec Thomson CSF (qui deviendra Thalès) que le scientifique pourra développer et tester sa théorie de la « magnétorésistance géante », pour

⁴⁸ « DuPont s'offre Danisco pour 6,3 milliards de dollars », L'Express (ed., 10/01/2011)

⁴⁹ « Comment DuPont et IFF vont former le leader mondial des ingrédients pour la nutrition et les produits de soin », L'Usine Nouvelle (ed. 21/12/2019).

laquelle il obtient le Prix, et avec des retombées majeures pour l'industrie du semi-conducteur. Or, si Albert Fert semble un lauréat atypique, c'est justement parce qu'il semble s'inscrire dans une logique de double impact simultané, alors que les lauréats du Nobel apparaissent plutôt comme relevant d'une logique de « recherche fondamentale ». En effet, l'image des Prix Nobel est plutôt celle de chercheurs menant des recherches dans des OPR, de façon éloignée de l'industrie (voir Encadré 9). L'étude des lauréats du prix Nobel semble ainsi un contexte intéressant pour étudier la dynamique historique du couplage à double impact simultané dans la recherche dite fondamentale. En effet, en sélectionnant uniquement ces chercheurs, le degré d'originalité de leur découverte scientifique est garanti : cela nous permet de nous focaliser sur l'étude des conditions de telles découvertes, au regard des préconisations du modèle formel.

Encadré 9 – Le Prix Nobel

Le Prix Nobel est attribué chaque année depuis 1901 (sauf exception, pendant les deux Guerres mondiales) et s'appuie sur le testament fondateur d'Alfred Nobel rédigé en 1895 (voir Figure 20). Dans ce dernier, Nobel demande qu'une institution soit créée pour récompenser chaque année les personnes qui ont permis un progrès considérable dans cinq disciplines : physique, chimie, médecine, littérature et paix.

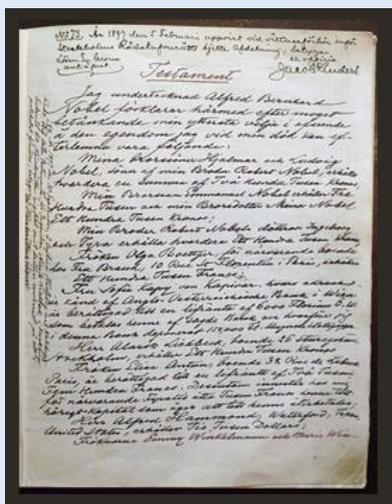
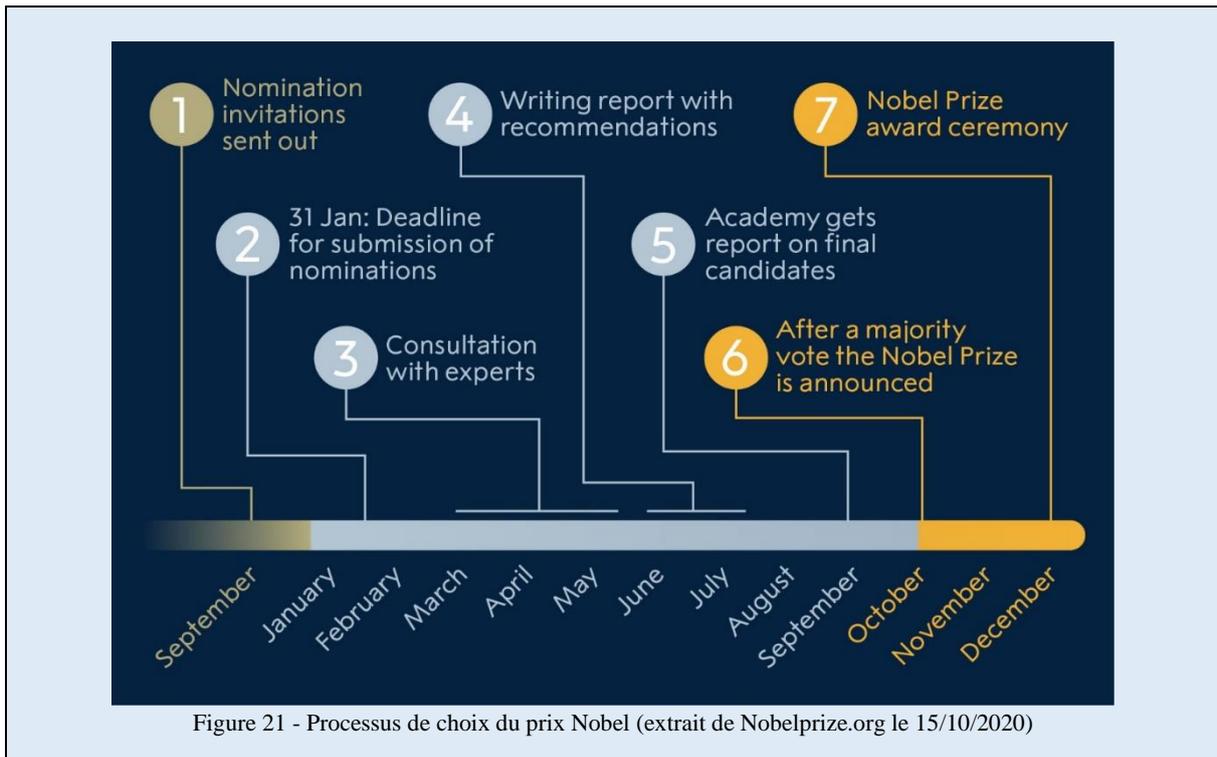


Figure 20 - Testament d'Alfred Nobel

Le choix du lauréat suit un protocole particulièrement strict (voir Figure 21) : la Fondation Nobel est chargée, sur la base de propositions de personnalités éminentes du champ, d'établir une liste de nominés. Le contenu des délibérations du Comité est confidentiel (et pour une durée de 50 ans).



Dans cette partie de la thèse, nous souhaitons tester de façon quantitative les conditions du modèle formel dans une logique *hypothético-déductive*. Nous utilisons alors comme matériau empirique les données de Li *et al.* (2019) publiées dans la revue *Nature*. Il s'agit d'un jeu de données en accès ouvert qui recense, à partir de méthodes de *machine-learning*, les méta-données (années de publication, co-auteurs, revues, etc.) des publications scientifiques de la cohorte quasi-complète des Prix Nobel de Physique, Chimie et Médecine jusqu'en 2016. De plus, les auteurs ont développé une méthode pour identifier pour chaque lauréat, le ou les articles qui constituent le *Papier Nobel*, c'est-à-dire le papier spécifique pour lequel un lauréat obtient quelques années plus tard, son prix. Ces *Papiers Nobels* constituent donc un proxy des découvertes scientifiques des lauréats.

Il nous faut dès lors concevoir une méthodologie qui permet d'identifier les lauréats qui pourraient s'inscrire dans une logique de couplage à double impact simultané : c'est-à-dire ceux qui auraient pu être exposés à des activités de développement de produits, procédés, ou services, activités ayant contribué à leurs découvertes scientifiques. Pour identifier les cas relevant d'un couplage à double impact simultané potentiel, nous classifions d'abord comme « inspiré par l'industrie » les lauréats suivants :

- Ayant publié au moins un papier avant / à date de la publication du *Papier Nobel* en étant directement affilié à une entreprise industrielle ;

- Ayant publié au moins un papier avant / à date de la publication du *Papier Nobel* avec un co-auteur affilié à une entreprise industrielle ;
- Ayant déposé au moins un brevet avant / à date de la publication du *Papier Nobel* dont le déposant est une entreprise industrielle.

Pour déterminer si les 518 lauréats étudiés sont « inspirés par l'industrie », nous avons donc utilisé cette méthode de classification en analysant 84 423 articles scientifiques écrits par des lauréats du Nobel et 5 270 brevets également déposés par des lauréats. Nous illustrons la logique de la méthode dans le cas d'Albert Fert et de son Papier Nobel de 1988 sur la magnéto-résistance géante, et co-écrit avec des scientifiques de Thomson CSF (voir Figure 22 ci-dessous).

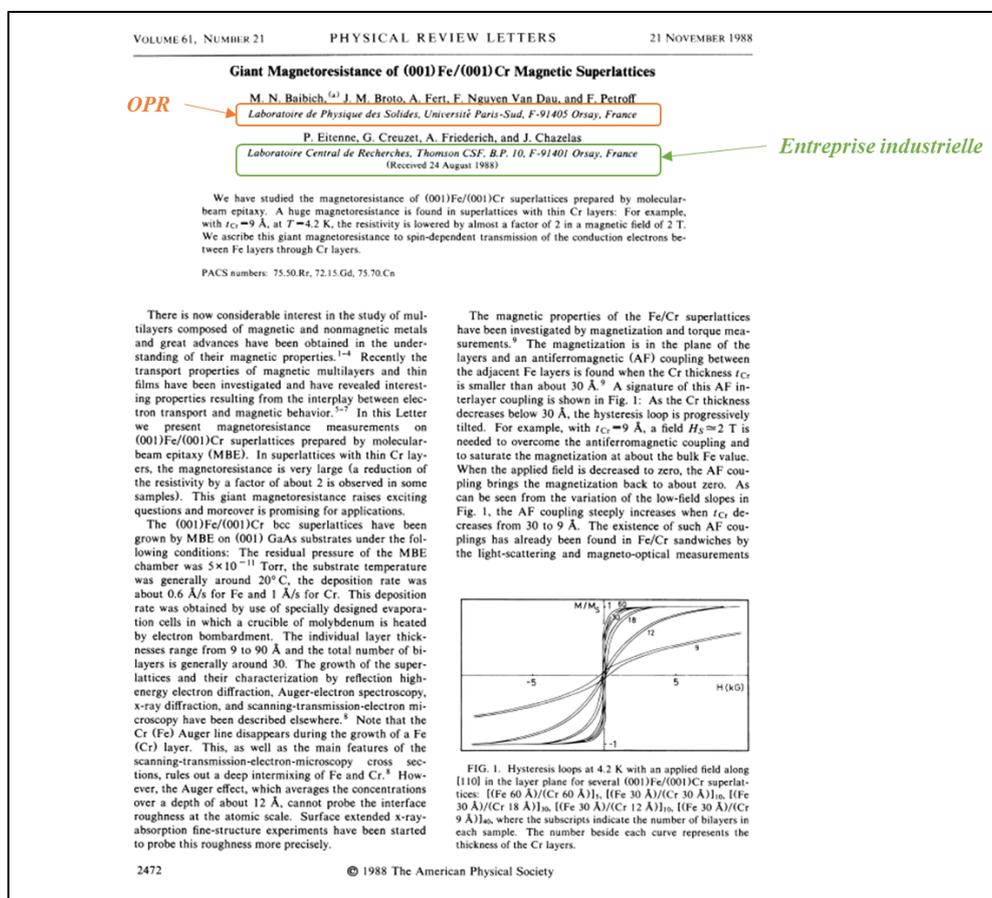


Figure 22 - Affiliations papier Nobel de Albert Fert

Cette méthodologie nous permet de vérifier une première condition du modèle formel de couplage à double impact simultané : l'exposition du scientifique à des connaissances originales issues des activités de développement de produits, procédés et services. Toutefois pour être bel et bien dans une logique de double impact simultané, il nous faut également spécifier une

seconde condition sur le rapport à l'industrie lié à l'orientation des travaux (nous parlerons de non-hybridation, une notion qui sera introduite au Chapitre 4 dans le cadre du modèle formel). Pour tester cette hypothèse, nous utiliserons des indicateurs bibliométriques classiques de la littérature (voir section suivante) de relations entre inventions et découvertes scientifiques (SNPL).

Ainsi, nous avons développé une méthodologie originale pour classifier les lauréats relevant d'une logique de couplage à double impact simultané. Nous sommes désormais capables d'analyser la dynamique historique du couplage à double impact simultané en étudiant par exemple, la proportion dans le temps de lauréats que nous avons pu identifier comme relevant d'un tel modèle de couplage, ou les effets des différentes disciplines scientifiques. Nous pouvons aussi comparer les performances des différents types de Nobel dans leurs activités post-papier Nobel. Pour conclure, la méthodologie peut être synthétisée comme présentée dans la Figure 23.

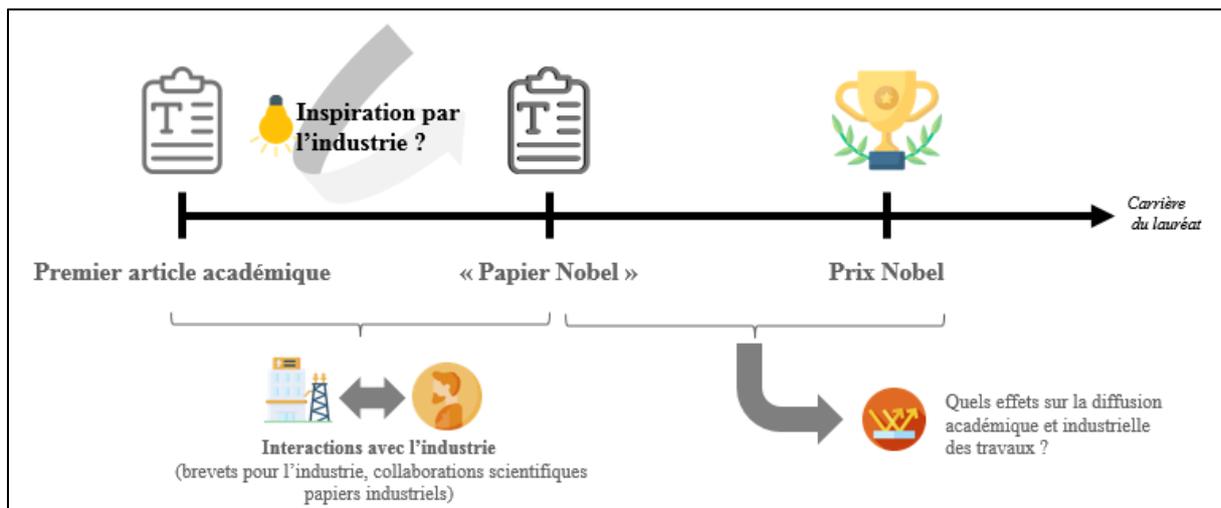


Figure 23 - Méthodologie d'analyse des lauréats du Nobel

Nous renvoyons le lecteur au détail de l'essai pour l'exposition des limites de cette méthodologie.

3.2.2. Test du modèle formel dans la recherche dite appliquée

Dans la deuxième partie de cette seconde question de recherche, nous nous intéressons à la recherche dite appliquée. Nous souhaitons adopter une logique hypothético-déductive similaire à celle du test du modèle dans la recherche dite fondamentale, en adoptant une approche quantitative. Si pour la recherche fondamentale nous nous sommes intéressés tout particulièrement à la dynamique historique du modèle de couplage à double impact simultané,

ici nous nous intéressons davantage à ses performances vis-à-vis des modèles de couplage plus traditionnels.

Pour cela, nous avons décidé de conduire notre étude sur un cas considéré comme archétypal de la recherche dite appliquée : les thèses menées en collaboration entre OPR et entreprises (essai N°2). En effet, ce type de thèse semblerait à première vue relever d'une logique de science résolutoire : la thèse serait « au service » des activités de développement de l'entreprise (Slaughter et Campbell, 2002). Nous nous concentrerons sur le dispositif français des thèses Conventions Industrielles de Formation à la Recherche (CIFRE), qui sont administrées par l'Association Nationale de la Recherche Technologique (ANRT). Ces thèses permettent la mise en relation (1) d'un laboratoire de recherche d'un OPR, (2) d'un doctorant et (3) d'une entreprise (ou d'une association). Nous renvoyons ici le lecteur à l'Encadré 10 pour une présentation de l'ANRT et à l'Encadré 11 pour une présentation du dispositif CIFRE.

Encadré 10 – L'ANRT

Il s'agit d'une association présidée en 2021 par Patrice Caine (PDG de Thalès) et qui réunit les acteurs privés et publics de la recherche française. En 2019, l'ANRT comprenait 354 membres et partenaires (entreprises et institutions publiques soit les ¾ des organisations de l'effort national de la R&D)⁵⁰.

L'ANRT a quatre principales missions :

- Informer par des benchmarks nationaux et internationaux sur la recherche partenariale et la R&D, des bulletins de veille, de la prospective, l'organisation de « petit-déjeuners stratégiques », l'organisation de colloques, etc. ;
- Favoriser les échanges entre ses membres : partage d'expérience, déjeuners, club PME & ETI, club Europe, Innovation et Compétitivité, rencontres scientifiques avec les doctorants CIFRE, etc.
- Influencer sur le système français de recherche et d'innovation principalement par la rédaction de rapports sur des thématiques spécifiques, des consultations, etc.
- Former pour la recherche et l'innovation majoritairement en s'appuyant sur le dispositif des Conventions Industrielles de Formation par la Recherche (CIFRE) opéré par l'ANRT depuis 1981 pour le compte du Ministère en charge de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI). S'ajoute au dispositif principal des dispositifs annexes : CIFRE-Défense pour le compte du Ministère des Armées depuis 2009, CIFRE-France/Maroc pour favoriser des CIFRE internationales.

⁵⁰ Rapport Annuel ANRT, 2019.

Encadré 11 - Le dispositif CIFRE

Le dispositif CIFRE est créé en 1981 et vise à : (1) renforcer les échanges entre les laboratoires de recherche publics et les milieux socio-économiques, (2) favoriser l'employabilité des docteurs et (3) contribuer au processus d'innovation et de recherche en France.

Le contrat CIFRE implique pour l'entreprise l'embauche d'un doctorant (en CDD ou CDI) pour une durée de 3 ans. Le doctorant est également inscrit dans une Ecole Doctorale, en relation avec son laboratoire de thèse et un directeur de thèse académique. Le projet de recherche avec l'entreprise doit contribuer à l'obtention du diplôme de Doctorat. L'entreprise et le laboratoire de recherche public sont également liés par un contrat précisant les modalités d'accueil du doctorant, les enjeux de propriété intellectuelle et la définition du projet de recherche. L'Etat abonde l'entreprise avec une subvention de 14 000€ / an pour couvrir une partie des frais de la recherche. La recherche est également éligible à des déductions d'impôts (CIR). Les relations entre les parties sont synthétisées dans la Figure 24 ci-dessous :



Figure 24 - Relation entre les parties prenantes dans le dispositif CIFRE (source : ANRT, 2020)

En 2016, les thèses CIFRE représentaient 9% de l'ensemble des doctorats financés en France et 6,5% des doctorats en général (Cour des Comptes, 2018b, p. 106). En 2018, c'est 1 450 thèses CIFRE qui ont été lancées. En particulier, les conditions de travail des doctorants CIFRE sont optimales : taux de soutenance élevé supérieur à 90% et un salaire moyen brut annuel de 29 628 € (ANRT, 2020, p. 8). Par ailleurs, 90% des doctorants CIFRE ont trouvé un emploi dans les 6 mois qui suivent la fin de leur CIFRE (ANRT, 2020, p. 8).

En particulier, soulignons que les CIFRE concernent tous les domaines scientifiques (des sciences de l'ingénieur aux sciences sociales), dans tous les secteurs économiques (aéronautiques, énergétique, électronique, finance, etc.) et ce dans tout type d'organisation (PME, grands groupes, ETI, collectivités territoriales).

Pour tester le modèle dans le cadre du dispositif CIFRE, nous souhaitons d'abord pouvoir spécifier pour chaque projet le type de couplage envisagé *ex ante*, et notamment celui à double impact simultané. Dans un second temps, nous souhaitons pouvoir mesurer les performances *ex post* de chaque projet en termes d'activités de recherche scientifique et d'activité de développement de produits, procédés ou services. L'enjeu est d'étudier si le choix d'un modèle de couplage particulier pour le projet est déterminant pour les performances scientifiques et les développements.

Pour cela, nous avons eu accès à un matériau empirique particulièrement riche au travers d'une collaboration avec l'ANRT. Nous avons pu analyser pour 635 thèses CIFRE⁵¹ exclusivement lancées en 2015 (pour éviter un effet temporel, données les plus récentes au démarrage du projet) les informations suivantes :

- **Dossiers de demande de CIFRE** comportant des informations sur le profil de l'entreprise (localisation, chiffre d'affaires, etc.), du laboratoire (localisation, université de rattachement, etc.) et du doctorant (nationalité, études préalables, etc.), ainsi que sur le déroulé de la thèse à venir (discipline, salaire du doctorant, co-tutelle internationale, etc.) ;
- **Contrat de collaboration entre l'OPR et l'entreprise** qui spécifie les conditions contractuelles de la thèse, la propriété intellectuelle, les transferts financiers, le temps passé par le doctorant dans chacune des institutions et qui comporte une annexe technique avec le résumé de la thèse (généralement de 4 à 12 pages) ;
- **Questionnaires de fin de CIFRE** envoyés par l'ANRT aux trois parties et qui comportent des informations sur le déroulé de la thèse et sur ses performances (nombre de brevets déposés, nombre d'articles scientifiques publiés, nombre de présentations du doctorant en conférences, Prix de thèse, etc.).

Afin de spécifier le couplage envisagé dans chacun de ces projets de thèse *ex ante*, nous devons mettre au point une méthodologie spécifique. Pour cela, nous utilisons les contrats de collaboration. Ceux-ci se présentent sous la forme de PDF scannés, signés par les différentes parties, et détaillant les conditions de la recherche. Il s'agit également de données sensibles et confidentielles. Un aperçu de la page de couverture anonymisée d'un contrat est proposé dans la Figure 25 ci-dessous.

⁵¹ Initialement, 909 avaient été sélectionnés, mais compte tenu de la disponibilité d'informations complémentaires (questionnaires de fin de CIFRE) ou de l'incomplétude de certains dossiers, seuls 635 sont finalement traités.

CONVENTION DE RECHERCHE	
ENTRE	
<p>ALÉNE, Société Anonyme, cotée sur le marché Euronext/Alternext de Paris (ALÉNE), ayant son siège social au 10-19, rue de Valenciennes et 1, rue de Valenciennes, 99-190 Courbevoie, représentée par Monsieur Gilles BOUQUIN, en qualité de Président Directeur Général,</p> <p>Ci-après dénommée l'« INDUSTRIEL », ou « ALÉNE »,</p>	
D'une part,	
ET	
<p>ALÉNE, Société par Actions Simplifiée (SAS) au capital de 3 940 060 €, RCS PARIS 820 003 093, ayant son siège social au 151, boulevard de l'Hôpital – 75013 PARIS, représentée par Monsieur Stéphane BOUQUIN, en qualité de Directeur,</p> <p>Agissant au nom et pour le compte de l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers (« ENSA »), tutelle du laboratoire DYNFLUID (et ci-après désigné par le « Laboratoire ») du Campus de Paris, conformément à la convention de concession de service public signée entre l'État et ALÉNE le 29 juin 2016 approuvée par le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche le 4 juillet 2016, Ci-après désignée « ALÉNE »</p> <p>ALÉNE, ENSAM et le Laboratoire sont ci-après collectivement désignés par « Les Etablissements »</p>	
D'autre part,	
<p>L'INDUSTRIEL et ALÉNE ci-après désignés individuellement par la « Partie » ou collectivement par les « Parties ».</p>	
Et	
<p>Monsieur ALÉNE, Ci-après désigné le « Chercheur ».</p> <p>Le Chercheur, en apposant sa signature à la présente Convention, reconnaît en avoir pris connaissance et s'engage à respecter les obligations visées aux articles de la présente Convention et aux l'annexe 1 et 2.</p>	
- 1 -	SA

Figure 25 - Exemple de contrat de collaboration

Nous cherchons ici à coder chaque contrat en fonction du type de couplage envisagé. Pour cela nous avons procédé de façon itérative. D'abord nous avons développé une méthode à partir d'un nombre restreint de contrats (environ 100) et en respectant une logique d'allers et retours praticiens – chercheurs (présentations avec l'ANRT, présentation en conférences à *R&D Management 2019*). La méthode a ensuite été stabilisée et répliquée sur 909 contrats de thèses CIFRE démarrés en 2015 (dernière année disponible) et mis à disposition par l'ANRT. Les contrats ont été codés en supervisant une équipe de trois ingénieurs de recherche qu'il a fallu faire monter en compétence sur la méthodologie, en suivant le processus décrit dans la Figure 26 ci-dessous. Un soin particulier a été apporté au codage (doublé, voire triplé dans certains cas) et une harmonisation des choix effectués lorsque les ingénieurs de recherche avaient des codages qui divergeaient. Finalement, sur 909 contrats, 748 ont été codés avec succès (161 avaient des données insuffisantes sans biais statistiques, du fait par exemple de problème de

numérisation des documents), puis 113 ont été écartés, car nous ne disposions pas des questionnaires de fin de CIFRE associés pour en évaluer la performance.

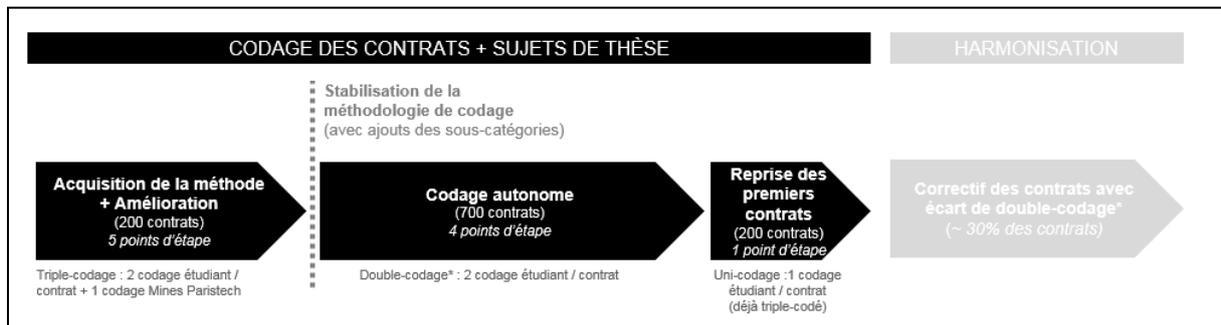


Figure 26 - Procédure de codage des contrats de collaboration

Ici, la méthode de classification repose sur la lecture détaillée du résumé de thèse afin de déterminer le rapport entre les activités de développement et les activités de recherche scientifique dans la thèse. Par exemple, une première approche consiste à tester si l'objectif du travail de thèse est de s'intéresser à un produit spécifique de l'entreprise clairement explicité dans le résumé de thèse. Le tableau détaillé des critères de classification des trois types de couplage est proposé dans l'essai N°2, en s'appuyant sur les construits de la littérature de l'engagement académique (les couplages traditionnels sont interprétés comme des orientations *market-pull* ou *research-push*). Nous proposons dans le Tableau 11 ci-dessous des exemples de projets classifiés et le contenu textuel du résumé de thèse associé.

Orientation des travaux	Discipline	Objectif du projet	Verron scientifique & technique	Connaissances laboratoire	Connaissance entreprise
Tiré par le marché (market-pull)	Recherche clinique / santé publique	« L'objectif est de développer des tests de diagnostic par immunoblot et de ces pathogènes [...] Les premiers serviront des tests de confirmation, les seconds de tests de dépistage. » (p.13) « La finalité est, suite à l'étape de recherche et de faisabilité qui fait l'objet du travail de thèse proposé, d'industrialiser les produits ainsi développés puis de les commercialiser » (p. 14)	« Ce projet répond à une demande réelle des cliniciens et des mycologues, confrontés à l'absence de techniques fiables et standardisées dans le domaine » (p.13)	« Des contacts avec des centres hospitaliers partenaires (dont celui de [...] équipe co-encadrant la thèse [...]) permettront alors l'obtention des sérums caractérisés nécessaires à la mise en place des techniques de diagnostics. » (p. 13) « L'UMR développe des outils de diagnostics innovants pour des utilisations en laboratoire (sensibilité, rapidité) et sur le terrain (simplicité, robustesse) » (p. 20)	« [Entrepise A] est spécialisée dans le développement, la production et la commercialisation de tests de diagnostics sérologiques utilisant la technique de l'immunoblot. [...] Depuis 6 ans, [...] [Entrepise A] développe et commercialise une nouvelle gamme de tests de diagnostic rapide utilisant la technique de l'immunochromatographie ». (p. 28)
Poussé par la recherche (research-push)	Chimie des matériaux	« Le projet actuel vise à connaître de manière plus précise les modifications de la composition chimique des lubrifiants, tant au niveau des additifs non polymériques [...] que la base hydrocarbonnée, au cours du fonctionnement du moteur [...] » (p. 9)	« L'exposition accrue des lubrifiants à des NOx conduit ainsi à accélérer l'altération des différents constituants chimiques [...] des huiles moteurs ». (p. 08) « L'influence spécifique des NOx sur l'altération des constituants des lubrifiants n'a été que peu étudiée au niveau moléculaire à ce jour [...] » (p. 09)	« Cette étude reposera, notamment, sur la méthodologie analytique et la bonne connaissance des principales familles d'additifs de lubrifiants acquis au [Laboratoire B] [...] » (p. 09)	« [Entrepise B], spécialisée dans la formulation, le transport et la distribution des produits pétroliers. [...] a, depuis plusieurs années, acquis des connaissances et développé des compétences sur la formulation des produits pétroliers, y compris leurs additifs, leur production, leur mise en œuvre dans différentes applications et leur caractérisation. » (p. 02)
Double impact simultané (simultaneous discovery – invention)	Génie des matériaux	« L'objectif est le développement conjoint de nouvelles enceintes sous ultra-vide pour l'élaboration, la caractérisation et la structuration de matériaux pour les dispositifs de demain » (p. 2)	« Pour chacun de ces domaines, il est aujourd'hui nécessaire d'élaborer, de structurer et de caractériser sous ultra-vide des objets de basse dimension et de taille nanométrique comme des couches minces, les multicouches et les super-reseaux, les agrégats, les précipités ou les plots » (p. 2) « Cette thèse permettra de renforcer [...] et principalement la partie recherche sur les nouvelles thématiques scientifiques dans le domaine de la manipulation d'aimantation sous impulsion optique » (p. 19)	« [Laboratoire C] a acquis une réputation internationale dans les domaines de l'électronique du spin, du nanomagnétisme, des nanomatériaux et de la physique des surfaces. Les progrès et découvertes dans ces disciplines transversales ont mené à de nombreuses applications, par exemple le stockage de l'information, les capteurs ou le photovoltaïque. De plus, le groupe [Laboratoire C] s'est illustré très récemment en démontrant la faisabilité et l'efficacité de la réécriture rapide de données magnétiques à l'aide d'une lumière polarisée circulairement » (p. 2)	« La création du département [Département de l'entreprise C] de la société [Entrepise C] est portée par la volonté de créer une nouvelle activité d'équipements de laboratoire et de petite production dans le domaine des dépôts et analyse des matériaux et plus généralement des nanotechnologies. L'objectif est l'exportation des machines et des savoir-faire vers des laboratoires internationaux » (p. 2) « La réalisation de tels matériaux demande des moyens d'élaboration (MBE, PVD et PLD) couplés à des moyens de caractérisation in situ tels que la diffraction d'électron, XPS, Auger, STM, AFM/MFM, effet Kerr in-situ. Ceci sera possible grâce à l'équipement Tube développé par [l'Entrepise C] » (p. 21)

Tableau 11 - Exemples de projets de thèse CIFRE classifiés

La classification des projets selon le mode de couplage constitue le point dur méthodologique de cette partie. Une fois cette classification stabilisée, nous pouvons mesurer les performances en utilisant les proxys classiques de la littérature : les publications scientifiques associées à chaque projet de thèse pour les activités de recherche scientifique, les brevets déposés pour chaque projet de thèse pour les activités de développement de produits, procédés et services. Ces données sont obtenues à partir des questionnaires de fin de CIFRE envoyés aux trois parties par l'ANRT.

Enfin, une dernière étape consiste à étudier le degré d'influence de la classification sur les performances des deux activités (ou de leur produit conjoint). Pour cela, nous développons un modèle de régression statistique. Une attention particulière est alors mise sur les variables de contrôles, ici nombreuse grâce à la richesse du matériau, qui nous permet de statuer sur le pouvoir explicatif de la classification sur les performances.

Ainsi, nous avons explicité ici les méthodes développées et les matériaux empiriques associés à cette seconde question de recherche. Nous proposons maintenant de procéder de la même façon pour la troisième question de recherche.

3.3. QR3 – Analyse des cadres institutionnels et des conditions

La troisième question de recherche de ce travail de thèse est la suivante : « Quels cadres institutionnels et conditions pour favoriser les performances du modèle de couplage à double impact simultané ? » Nous adoptons ici une approche plus inductive : nous capitalisons sur les apports du modèle formel (QR1) et les démonstrations empiriques (QR2) pour discuter les cadres institutionnels qui permettraient de soutenir le couplage à double impact simultané. Nous avons fait le choix de traiter en premier lieu le contexte de la R&D industrielle. Dans un second temps, nous analyserons le cas des périodes de crise, où la double contrainte de production de connaissances scientifiques nouvelles et d'innovation se fait plus forte.

3.3.1. R&D industrielle : régimes de dynamique de l'expertise pour le double impact simultané

Dans cette partie, nous cherchons à déterminer quels cadres institutionnels et conditions dans la R&D industrielle pourraient permettre de soutenir le double impact simultané (essai N°3). Pour cela, nous nous intéressons aux différents régimes afférents à l'organisation et à la dynamique de l'expertise dans le cadre de la R&D industrielle (Cabanès, Le Masson et Weil,

2020). Nous avons choisi de nous intéresser à une industrie particulière, dans laquelle il y a un renouvellement fort des expertises maîtrisées par les organisations leaders du marché (Perrons, 2014) : l'industrie du pétrole et du gaz. En effet, compte tenu de la rareté des hydrocarbures, des enjeux environnementaux et de sécurité, les entreprises de ce secteur doivent renouveler leurs approches, notamment pour s'orienter vers des énergies vertes, ou développer des processus d'exploration et d'exploitation des hydrocarbures plus économes. Ce contexte semble alors propice à l'analyse du double impact simultané : c'est un secteur industriellement complexe qui s'appuie sur des activités scientifiques, et qui doit développer des inventions originales pour faire face aux grandes transitions du secteur.

Pour conduire cette analyse, nous avons mené un travail de recherche partenariale avec l'un des leaders du secteur : Total. Nous présentons brièvement l'entreprise dans l'Encadré 12 ci-dessous. Nous avons d'abord mené une analyse exploratoire sur la dynamique de l'expertise dans cette organisation par la conduite d'entretiens (voir Annexe 1). En capitalisant sur les connaissances acquises sur le secteur et l'organisation, nous avons pu développer une méthodologie d'analyse des régimes de dynamique de l'expertise qui pourraient soutenir le double impact simultané. Ces éléments permettent une approche quantitative par l'étude de 50 776 brevets déposés par les 16 principales entreprises du secteur entre 1989 et 2016.

Encadré 12 – L'entreprise Total

Total est un groupe français de l'industrie du pétrole et du gaz présent en 2019 dans plus de 130 pays. Le groupe a environ 107 000 collaborateurs et produit 3 millions de barils d'hydrocarbures par jour principalement en Europe (1/3 de la production), dont environ la moitié de gaz et l'autre moitié de pétrole. Le groupe a également investi dans les énergies renouvelables et est un acteur majeur du raffinage de pétrole brut, vendu pour moitié en Europe. Le groupe est également un acteur majeur de la R&D, activité dans laquelle il investit plus de 1 milliard de dollars par an.

Le groupe est divisé en quatre grandes divisions (Total, 2019, p. 7) autour d'une holding groupe (3% des effectifs en 2019) et les effectifs sont les suivants (Total, 2019, p. 9) :

- Total *Exploration Production* (12% des effectifs) ;
- Total *Integrated Gas, Renewable and Power* (14% des effectifs) ;
- Total *Marketing & Services* (24% des effectifs) ;
- Total *Raffinage Chimie* (47% des effectifs).

L'ambition de Total, entreprise fondée en 1920, est de devenir « la *major de l'énergie responsable* » (Total, 2019, p. 9) et ses activités peuvent être synthétisées à partir de la Figure 27 ci-dessous.

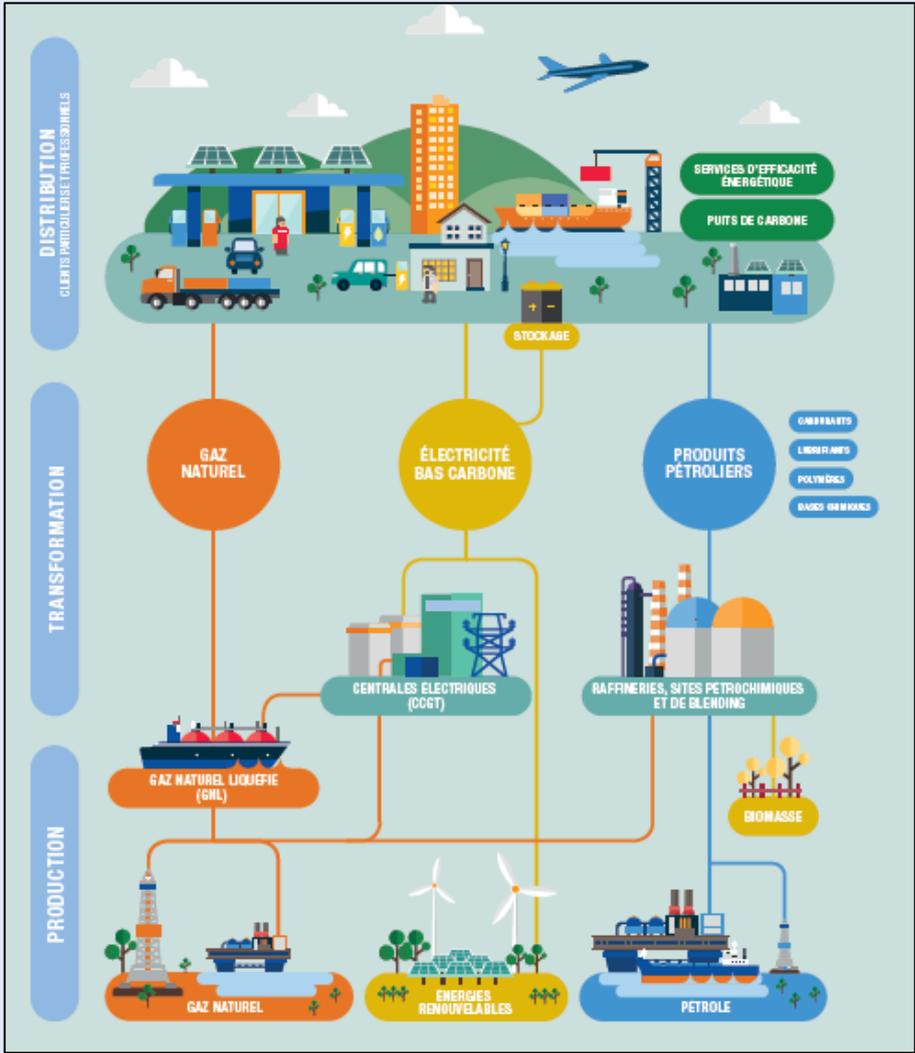


Figure 27 - Activité Total (source : Rapport Annuel 2019, Total, p. 13)

Pour répondre à notre question de recherche, nous avons besoin de développer une méthode qui permet (1) de spécifier des situations relevant de couplage à double impact simultané et, (2) de révéler différents régimes de dynamique de l'expertise. Or, l'étude de la dynamique de l'expertise nécessite de se référer à une classification des expertises stable dans le temps, disponible sur longue période, et comparable entre les organisations. Ici, nous mobilisons la littérature sur l'innovation combinatoire et travaillons à partir des brevets déposés par les organisations leaders du secteur. En s'appuyant sur les travaux de Felk *et al.* (2011) et Kokshagina *et al.* (2014) nous considérons que les classes technologiques associées aux brevets et issues de la Classification internationale des Brevets (IPC) sont des proxys de l'expertise d'une organisation (une méthode usuelle en bibliométrie - voir section suivante).

Premièrement, en termes de couplage à double impact simultané, nous considérons qu'un brevet est un observable permettant d'attester un développement de produit ou procédé. Mais il nous faut également tester la présence ou non d'une découverte scientifique. Pour cela, nous utilisons une approche innovante : nous nous appuyons sur les travaux de Alstott *et al.* (2017b, 2017a) qui proposent une cartographie de la *proximité* des expertises sur lesquelles se basent les inventions, à partir de l'analyse de 3,9 millions de brevets. Pour chaque combinaison d'IPC (par exemple A01A – A01B), les auteurs proposent un indice (*Alstott Index*) compris entre 0 et 1 correspondant à la probabilité plus ou moins élevée que lesdites IPC soient combinées entre elles dans une invention. Or, nous considérons ici que cette cartographie, qui est par ailleurs stable dans le temps, présente l'état des connaissances scientifiques et techniques. Ainsi, un brevet qui proposerait une combinaison nouvelle (par exemple A01A – A01B proche de 0 d'après Alstott et al.) constituerait une rupture par rapport à l'état des connaissances scientifiques et techniques, ce que nous interprétons comme une *découverte* inhérente aux activités scientifiques. Ainsi, nous proposons un indice appelé ADOI (*Alstott Derivated Originality Index*) qui se présente tel que : $ADOI = 1 - \text{Alstott Index}$. Ainsi, nous pouvons utiliser cette métrique en calculant pour chaque brevet, son score ADOI, en faisant la moyenne des ADOI des différentes combinaisons des IPC du brevet, soit le degré d'originalité de la découverte scientifique associée à l'invention.

Deuxièmement, nous devons développer une méthode pour révéler différents régimes de dynamique de l'expertise. Pour cela, nous capitalisons sur les travaux de Yayavaram et Ahuja (2008) et Yayavaram et Chen (2015) sur la structure des *bases de connaissances* des organisations. En utilisant leur méthodologie, nous pouvons représenter l'organisation des expertises dans l'organisation sous la forme d'un réseau : chaque expertise, c'est à dire IPC utilisée dans un brevet de l'organisation, correspond à un sommet. Chaque fois qu'un brevet

utilise deux expertises, on considère que ces expertises sont combinées entre-elles et donc représentées par un lien. Un exemple est proposé dans la Figure 28 ci-dessous sur la base de notre analyse pour l'entreprise Total en 1995. Ensuite, pour définir quel régime d'expertise est associé à chaque invention, nous comparons les IPC présentes dans le brevet déposé en période t avec la structure de l'expertise de l'organisation en période $t-1$ et développons une typologie sur la base de (1) l'apparition d'expertises nouvelles et (2) les nouvelles combinaisons. La typologie permet de faire apparaître quatre régimes de dynamique des expertises distincts (recomposition, absorption, raffinement, et clusterisation) et constitue l'un des résultats clés de l'essai N°3.

Enfin, il ne nous reste plus qu'à combiner les deux approches et tester quels régimes d'expertise sont associés en moyenne à un score d'ADOI le plus élevé possible afin de déterminer si un régime particulier favorise plus ou moins les couplages à double impact simultané. Une illustration de la méthode sur le cas du sous-marin autonome développé par Total est proposée dans l'Encadré 13.

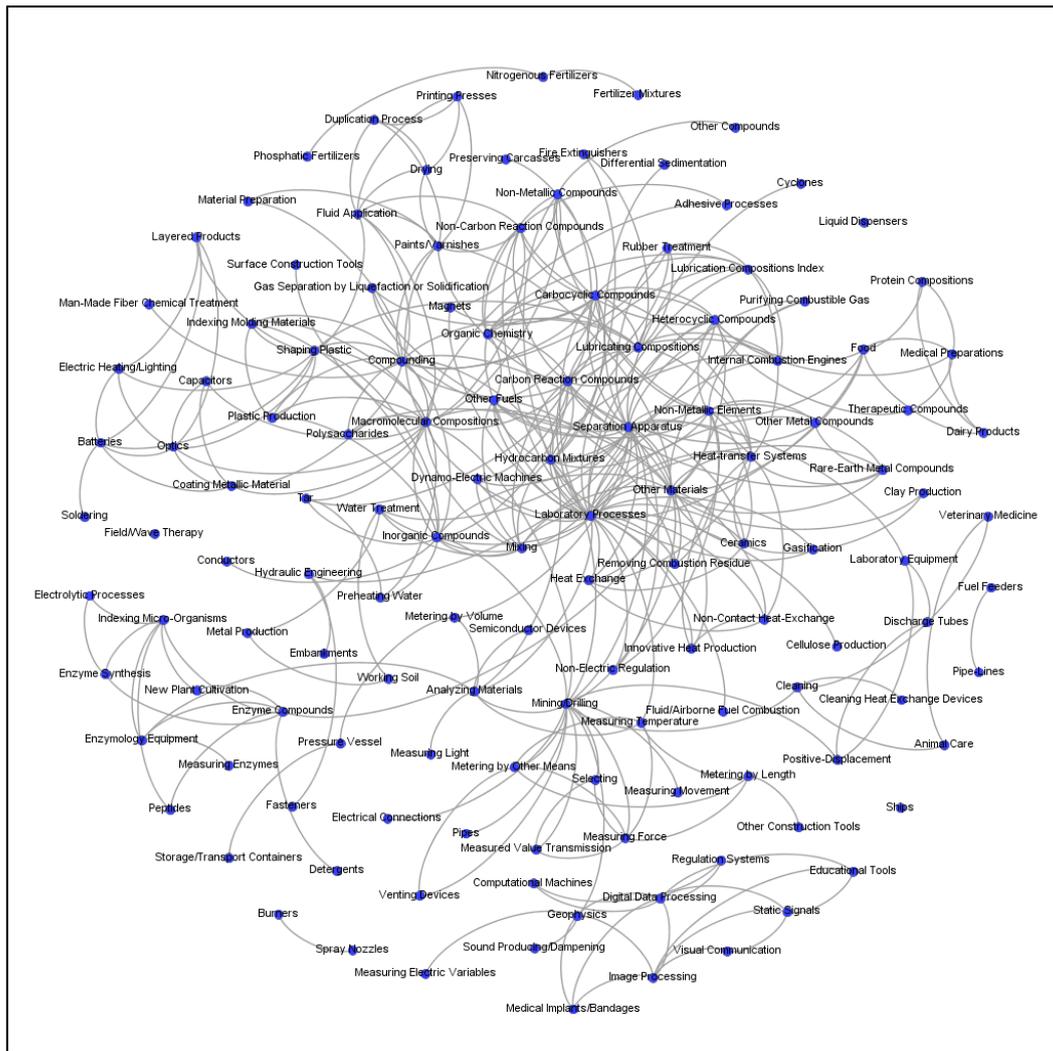


Figure 28 - Représentation de l'expertise chez Total en 1995

Encadré 13 – Cas du sous-marin autonome de Total

Total est une entreprise leader dans l'exploitation d'hydrocarbures « deep-offshore ». Pour mener à bien cette activité, Total exploite plus de 3 000 km de pipeline, dont la surveillance (fuite, corrosion, etc.) est complexe et coûteuse. Total a ainsi développé, avec des partenaires, un prototype de sous-marin autonome pour surveiller les infrastructures (voir Figure 29). Il est capable d'éviter les obstacles, de circuler au plus près des conduites, de se repérer sur une carte sous-marine par l'analyse de son environnement, de fournir une image 3D des conduites, d'étudier la corrosion par un système de mesure de potentiel électrique⁵². Ainsi, ce robot constitue à la fois une avancée scientifique et un développement industriel de premier plan. Mais comment est-il caractérisé par notre approche ?



Figure 29 - Sous-marin autonome Total (source : Total Exploration - Production)

En mai 2014, Total co-dépose un brevet afférant à la manière dont le sous-marin peut détecter et suivre automatiquement une conduite d'hydrocarbure sous la mer ou l'océan (Figure 30).

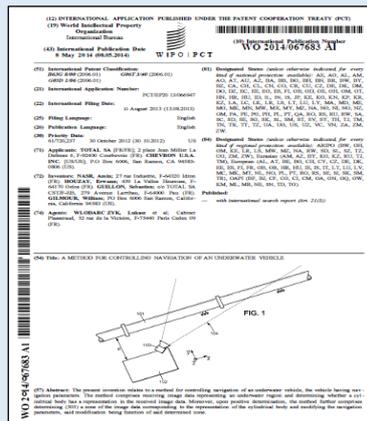


Figure 30 - Brevet sous-marin autonome Total

Le brevet est composé de trois classes technologiques de niveau 4 : G06T (traitement ou génération d'image), B63G (installations offensives ou défensives de navire [...] sous-marin) et G05D (système de commande ou de régulation des variables non électrique). Le score ADOI du brevet, parmi les plus élevés des brevets étudiés, est présenté au Tableau 12 ci-dessous.

Combinaisons	ADOI
G06T – G05D	1.00
G06T – B63G	0.99
G05D – B63G	0.99
Score ADOI du brevet (moyenne)	0.99

Tableau 12 - Calcul de score ADOI pour le brevet sous-marin autonome

⁵² Voir : <https://www.ep.total.com/fr/domaines/offshore-profond/un-auv-pour-optimiser-linspection-des-pipelines>

Par ailleurs, nous pouvons caractériser si les expertises utilisées pour ce brevet et leurs combinaisons sont nouvelles ou non au regard de la structure des expertises maîtrisées par l'organisation à ce stade. Ces éléments permettent de caractériser le régime de dynamique de l'expertise associé à cette invention. Les résultats sont présentés ici dans le Tableau 13.

Expertises	Caractérisation	Combinaisons	Caractérisation
G06T	Ancienne (18 brevets déposés depuis 1988)	G06T – G05D	Nouvelle
G05D	Ancienne (14 brevets déposés depuis 1985)	G06T – B63G	Nouvelle
B63G	Nouvelle	G05D – B63G	Nouvelle
Régime :	Recomposition		

Tableau 13 – Identification du régime d'expertise pour le brevet sous-marin autonome

Nous pouvons dès lors nous focaliser sur la méthodologie et le matériau empirique utilisé dans la dernière partie de cette thèse et qui engage une réflexion sur les crises.

3.3.2. Crises : conditions et cadres institutions pour le double impact simultané

Dans la dernière partie de cette thèse, nous nous intéressons plus particulièrement aux crises (essai N°4). En effet, comme nous l'avons souligné, le couplage à double impact simultané semble d'intérêt face aux crises qui nécessitent à la fois l'émergence de nouveaux savoirs scientifiques et de nouvelles innovations. Or, durant cette thèse, est apparue la crise du Covid-19 avec ce double impératif : production de connaissances en épidémiologie sur le fonctionnement du virus et sa diffusion (ie. découvertes scientifiques), et développement de remèdes comme des vaccins ou des traitements (ie. développements de produits). Ainsi, nous avons souhaité explorer la pertinence de nos résultats obtenus avec le modèle formel (QR1) et les démonstrations empiriques associées (QR2) pour en *induire* les cadres institutionnels et conditions qui pourraient permettre d'encourager ou de soutenir le couplage à double impact simultané dans les crises, en prenant comme cas d'étude empirique, les crises liées aux coronavirus.

Pour cela, nous explorons sur longue période, les couplages dans lesquels s'inscrivent les industriels dans les activités de recherche scientifique et de développement sur les coronavirus (voir pour une brève présentation de l'histoire des coronavirus, l'Encadré 14). Nous utilisons comme matériau empirique principal les méta-données de 18 954 articles scientifiques traitant des coronavirus entre le 01/01/2000 et le 15/05/2020. Ces données sont complétées de l'analyse de 1 622 brevets sur cette thématique (mais hors crise du Covid-19 compte tenu des délais

d'examen par les Offices), et de l'exploration d'une base de données de l'OMS et du Milken Institute sur 267 projets de vaccins contre la Covid-19 au 01/03/2021. La méthode principale employée est ici l'approche bibliométrique (voir détails section suivante). La particularité du cas coronavirus, c'est qu'il existe des périodes où les activités de développement et de recherche scientifiques sont menées « hors crise », alors qu'à d'autres périodes elles sont menées « en crise » (SARS-Cov, MERS-Cov, Cov-19) : une caractéristique intéressante pour étudier l'effet spécifique des crises, avec la possibilité de comparer ces deux périodes distinctes.

Afin d'explorer les couplages à double impact simultané, nous développons une méthodologie basée sur une approche institutionnelle : nous analysons spécifiquement les articles scientifiques publiés par des entreprises industrielles sur la thématique. En nous appuyant sur la littérature et l'étude des brevets, nous montrons que les industriels qui publient des articles scientifiques sur les coronavirus sont plus à même de déposer des brevets sur la thématique, et que ces brevets sont plus qualitatifs. L'investissement des industriels dans des activités de recherche scientifique sur la thématique favorise donc le développement de produits. Ce prérequis nous permet plus spécifiquement de nous concentrer le potentiel de découverte scientifique des industriels, et les conditions qui favorisent l'originalité des découvertes, en crise et hors crise. Pour qualifier le degré de rupture des découvertes scientifiques, nous utilisons un indicateur classique de la bibliométrie : le nombre de citations post-publication par d'autres articles scientifiques.

Ainsi, nous pouvons d'une part analyser si les crises conduisent les industriels à s'inscrire davantage dans des couplages à double impact simultané, en particulier ici pour leurs contributions dans les activités de recherche scientifique. D'autre part, nous pouvons analyser quelles conditions favorisent les couplages à double impact simultané en explorant les effets en crise et hors crise de (1) l'expertise préalable sur la thématique, (2) le recours à la collaboration avec un OPR, (3) l'antériorité de la collaboration avec un OPR. L'exploration de ces régimes d'actions est répliquée sur les projets de vaccins contre la Covid-19 afin de valider la logique double impact simultané.

Encadré 14 – Brève histoire des coronavirus

La découverte du premier coronavirus humain (HCov) date de 1965⁵³ lorsque deux chercheurs anglais, Tyrell et Bynoe cherchent à découvrir les causes du rhume. Ils parviennent à isoler une souche virale baptisée B814 à partir de prélèvements respiratoires d'un écolier présentant un rhume, et lui donnent le nom de coronavirus du fait de la « couronne » observée au microscope sur cette souche. C'est le 16 novembre 1968 que le mot fait son apparition à partir d'un article publié dans la revue *Nature* (Figure 31).

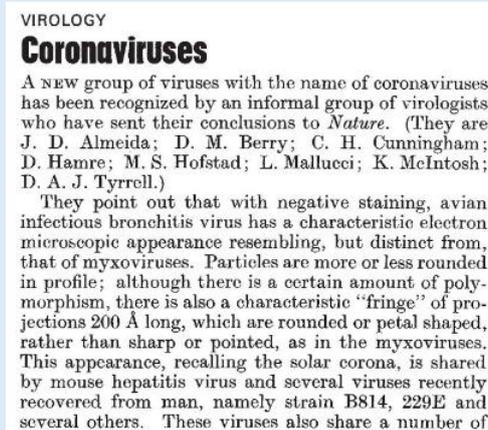


Figure 31 - Extrait du premier article sur les coronavirus (1968)

Alors que les recherches scientifiques sur les coronavirus vont s'intensifier, plus d'une centaine de coronavirus sont découverts, dont sept seulement affectant l'humain. Ceux-ci apparaissent de manière aléatoire créant alors des crises sanitaires. Trois sont particulièrement notables : le SARS-Cov-1 (2003-2005) avec environ 8 000 cas et 800 décès, le MERS-Cov (2013-2015) avec environ 1 200 cas et 450 décès, et enfin le Covid-19 (2019-2021) avec environ 158 millions de cas et 3,29 millions de décès⁵⁴. Il est à noter que les coronavirus touchent aussi les élevages (diarrhée épidémique porcine, bronchite infectieuse aviaire) et les animaux domestiques.

Ces éléments permettent de postuler que les recherches sur les coronavirus doivent être dépendantes de l'apparition de nouveaux virus, nécessitant des découvertes scientifiques. De plus, l'apparition de nouveaux coronavirus doit conduire certains industriels à investir dans ce domaine pour développer vaccins et remèdes.

Ainsi, nous achevons notre présentation des différents matériaux empiriques et des méthodologies développées dans cette thèse pour répondre à chaque question de recherche. Avant de clore ces questions, nous souhaitons revenir plus en détail sur l'approche bibliométrique : une méthodologie au cœur de nos travaux et transverse à nos réflexions.

⁵³ « Il était une fois les coronavirus », Le Monde, ed. 27/03/2020

⁵⁴ Chiffres au 10/05/2021

4. Focus méthodologique : l'approche bibliométrique

Dans cette section, nous revenons sur le recours à la bibliométrie, un aspect essentiel de cette thèse. Nous présenterons brièvement cette méthode scientifique et présentons les principales bases bibliométriques exploitées.

4.1. La bibliométrie comme méthode scientifique

La bibliométrie caractérise l'étude quantitative de la dynamique des sciences et des technologies en tant que processus social de communication d'informations entre différentes parties prenantes. L'histoire de la bibliométrie est en interrelation très forte avec le développement de l'informatique et de bases de données de plus en plus facilement accessibles aux chercheurs pour étudier des phénomènes avec une démarche quantitative. Pourtant, sa genèse est aussi « à mi-chemin entre les instances de contrôle bureaucratique et le monde de la recherche » (Heilbron, 2002, p. 78). En France, l'Observatoire des Sciences et des Techniques (OST) a d'ailleurs été créé en 1990 pour « concevoir et produire des indicateurs quantitatifs sur la recherche et l'innovation » (Filliatreau, 2008, p. 64). Il est intéressant de remarquer que les rapports de performance du Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation incluent de plus en plus d'indicateurs bibliométriques (tout comme les communications institutionnelles des écoles et universités – voir par exemple Abdessemed et Bueno-Merino, 2016), et que ces indicateurs sont même utilisés dans les jurys de concours et de promotion des chercheurs, ou pour l'évaluation de projets de recherche (Filliatreau, 2008).

Mingers et Leydesdorff (2015) proposent de définir ainsi la bibliométrie :

« [Scientometrics] can be considered as the study of the quantitative aspects of science and technology seen as a process of communication. Some of the main themes include ways of measuring research quality and impact, understanding the processes of citations, mapping scientific fields and the use of indicators in research policy and management. » (Mingers et Leydesdorff, 2015, p. 1)

Il faut souligner ici les spécificités du vocabulaire. Mingers et Leydesdorff (2015) indiquent notamment que le terme de « scientométrie » pourrait à la fois englober : la « bibliométrie », « l'infométrie » (ie. analyse quantitative d'objets de communication et d'information en général), « la webométrie » (ie. analyse de pages web en lien avec la science). Nous retenons ici le terme « bibliométrie » à l'instar de celui de « scientométrie » qui nous semble davantage une approximation de langage. Dans cette thèse, nous nous focaliserons sur l'analyse

quantitative de publications scientifiques et de brevets d'invention. Une brève histoire de la première base bibliométrique est présentée dans l'Encadré 15.

Encadré 15 - Histoire du Science Citation Index

Nous proposons ici une brève synthèse de l'histoire de l'émergence du *Science Citation Index* sur la base des travaux de Heilbron (2002) et Mingers et Leydesdorff (2015).

La bibliométrie s'est développée avec les efforts de structuration d'une base de données par Eugene Garfield à partir des années 1950. Ce dernier a développé l'idée d'un index des citations scientifiques dès les années 1950 sur le modèle du *Shepards' Cimator* : une collection de publications contenant toutes les décisions juridiques aux États-Unis, que chaque avocat et juge était obligé de consulter pour accéder à la jurisprudence. Or le *Shepards' Cimator* était un produit d'une entreprise commerciale particulièrement lucrative, la *Shepard Citations Incorporated*, fondée à la fin du 19^{ème} siècle.

Pourtant, pour lancer sa société, Eugene Garfield a besoin de subventions publiques qu'il peine à trouver. Dans les années 1960, dans le contexte politique lié à l'augmentation des crédits pour la recherche publique (en lien avec le lancement de *Sputnik*), l'État voit un intérêt à subventionner ses travaux. Beaucoup de scientifiques s'y opposent, publiquement, dans *Science* et *Nature* même si Merton indique qu'il serait intéressé par l'exploitation des données bibliométriques.

En 1963, le premier volume du *Science Citation Index* est publié à Philadelphie. La base deviendra ensuite propriété de *Thomson Reuters*, puis de *Clarivate Analytics*.

4.2. Bases de données bibliométriques exploitées dans la thèse

Dans cette thèse, des bases de données relatives aux publications scientifiques, aux brevets et aux liens entre ces deux bases ont été exploitées. Nous revenons brièvement sur la structure et le contenu de ces bases.

4.2.1. Base de données de publications scientifiques

Dans cette thèse, nous avons exploité par deux fois des bases de données de publications scientifiques : pour l'étude sur les liens des Prix Nobel avec l'industrie (essai N°1), et l'étude sur les publications industrielles en lien avec les coronavirus (essai N°4). Dans ces deux cas, les publications scientifiques ont été extraites de la base de données Lens.org.

La base de données Lens.org agrège les données bibliographiques de plusieurs sources distinctes : *Microsoft Academics*, *CrossRef*, *PubMed* et *CORE* ce qui en fait pour nous la base la plus pertinente pour notre étude (Figure 32). Contrairement à la base des publications scientifiques présentes sur *Clarivate Analytics*, les données de Lens.org sont en accès libre (avec limite de téléchargement) et peuvent être également exploitées à partir d'une API disponible sur le logiciel R (avec un abonnement étudiant temporaire sans limitation).

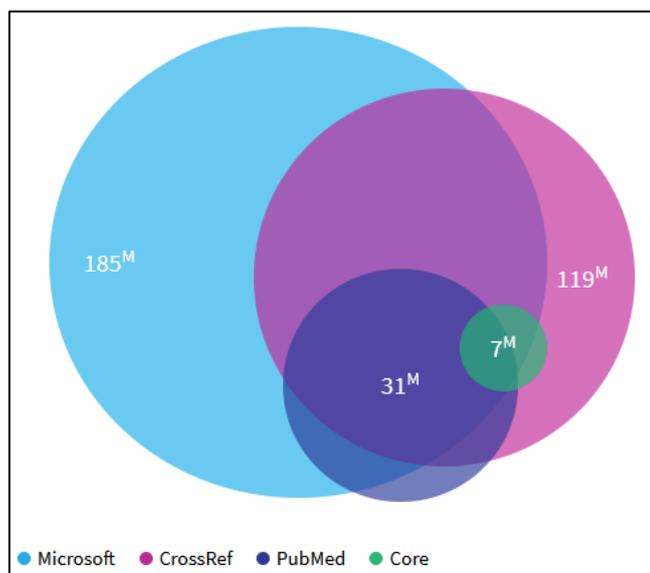


Figure 32 - Bases de données agrégées dans Lens (source : Lens.org)

Au 29/01/2021, la base Lens.org référence 225 millions de documents scientifiques de tout type, dont des articles de revues scientifiques, des ouvrages, des communications de conférences, etc. Dans nos études, nous utiliserons uniquement les articles issus de revues scientifiques classées, considérés comme plus robustes pour ce type d'analyse (les revues étant impliquées dans des efforts de structuration de leurs données bibliographiques). À cette même date, la base comprend 115 millions d'articles scientifiques publiés dans des revues classées.

Les informations usuelles auxquelles le chercheur a accès dans des données bibliométriques sur les publications scientifiques sont résumées dans le Tableau 14 suivant :

Type d'information	Détails
Contenu de l'article	Titre, numéros de page, volume, issue, langue, résumé
Auteur(s)	Nom, Prénom, identifiants (type ORCID)
Affiliation de l'auteur	Nom de l'affiliation, GRID, pays
Source	Titre du journal, éditeur, pays, codage des sujets de la revue
Financement	Sources de financement, pays, organismes
Références bibliographiques	Par identifiant unique Microsoft Academics ou Lens.org
Citations scientifiques	Nombre de citations, papiers citant par identifiant unique
Citations brevets	Références des brevets citant le papier scientifique

Tableau 14 - Principales informations bibliométriques des publications scientifiques

Des données peuvent être consultées directement sur le site Lens.org comme dans le cadre d'une recherche du papier ci-dessous (Figure 33), ou par des recherches directement sur l'API via R.

The launch of innovative product-related services: Lessons from automotive telematics

Sylvain Lentia, Christophe Midler

Research Policy, Issue 1, Volume: 38, Pages: 156-169, 2009

Additional Info: [Open Access](#) [Full-Text](#)

8 Citing Patents 78 Citing Scholarly Works Reference Count: 56

Summary Citing Patents 78 Citing Works 56 References Recommended Collections

Show Article Add to Collection Download Citation

Abstract
In the literature on new product development, most existing studies on the end of the design process concentrate on managing ramp-up in the field of manufactured products. This situation poses a problem at a time when our economies increasingly depend upon services and products are more and more related with sophisticated services that provides value for customers and producers. This article examines the management of the final phases of the design process of an innovative product-related service. Our research thus makes three contributions: 1) An analysis of the implementation process shows that the simultaneity of the production and consumption of a service means that three types of learning - technical, sales and uses - take place at the same time. Launch management strategies have thus to be adapted. 2) An analysis of the data collected confirms this difference by bringing to light great contrasts in these different aspects of learning. 3) This led us to identify a field that needs exploration by researchers in product and services innovation: the design of the sales process. Furthermore we underline two scenarios to manage the launch of innovative product-related services.

Authors
Sylvain Lentia, Christophe Midler

Field of Study
Engineering, Project management, Marketing, Innovation management, New product development, Process management, Underline, Engineering design process, Service product management, Product Innovation, Telematics

Institutions
1. Université de Cergy-Pontoise - 33 boulevard du port, 95011 Cergy, France
2. Ecole Polytechnique

Links to other sources
[halhs.archives-ouvertes.fr](#) [econpapers.repec.org](#) [econpapers.repec.org](#) [ideas.repec.org](#) [halhs.archives-ouvertes.fr](#) Show all...

Citing Scholarly Works

In: Research Policy, Issue 1, Volume: 38, Pages: 156-169
Journal is Open Access: false
Published: 2009
Publication Info: Journal Article
Publisher: Elsevier BV

Open Access

License: Unknown
CiteSeerX Full-Text
Le Centre pour la Comm... Full-Text
Show 2 more...

Sources

029-116-821-044-516
10.1016/j.respol.2008.10.020
1490011775
Find full-text at your institution

Figure 33 - Fiche type d'un article scientifique sur Lens.org

Par exemple, dans le cadre de cette thèse, des données sur les identifiants *Microsoft Academics* des publications scientifiques des Prix Nobel ont été collectées à partir de travaux de Li *et al.* (2019). Des informations bibliométriques plus complètes ont été collectées à partir de l'API Lens.org en utilisant lesdits identifiants pour obtenir les affiliations de l'ensemble des auteurs et observer des liens avec l'industrie (ie. papiers co-écrits avec des auteurs de l'industrie).

D'autres bases de données ont été abondamment utilisées : les bases référençant les brevets d'invention.

4.2.2. Bases de données de brevets d'invention

Pour les travaux de cette thèse, deux bases de données ont été exploitées : la base *Derwent Innovation* (*Derwent World Patent Information*) et la base *PATSTAT*.

Premièrement, la base *Derwent World Patent Information* est une base de données privée à laquelle un accès a été permis par l'INPI pour la réalisation des travaux de cette thèse. La particularité de cette base de données est qu'elle propose un outil de consultation de brevets d'invention (au niveau mondial) que nous qualifierons de « clé en main » avec des données dites « nettoyées ». En effet, la donnée brevet est souvent considérée comme difficile d'accès, car les résumés des titres peuvent paraître parfois difficiles à comprendre et interpréter (pour

des raisons légales, ou de par un comportement volontaire de l'inventeur). Des erreurs de référencement peuvent également s'être glissées dans les titres. Ainsi, au 29/01/2021, Derwent propose environ 46 millions de familles de brevets sur sa base, et une équipe de près de 900 ingénieurs éditent et synthétisent de nouveaux résumés des brevets⁵⁵. L'entreprise indique avoir corrigé des éléments dans 18% des brevets reçus. La base propose également des services d'harmonisation des portefeuilles de brevets de grands groupes en identifiant les brevets déposés par des filiales majoritaires d'un groupe. En ce sens la donnée brevet enrichie par Derwent est particulièrement qualitative. À l'inverse, l'extraction de données est limitée (40,000 lignes par extraction) et il n'est pas possible d'utiliser un API externe (par exemple sous le logiciel R) qui permettrait un usage plus avancé. Par exemple, l'usage s'est avéré particulièrement utile pour extraire les données de portefeuilles de brevets des principaux déposants du marché pétrole et gaz, avant que ceux-ci ne soient revus de manière fine avec les experts en études brevets de Total. Nous présentons dans la Figure 34 un exemple de recherche brevet via cette base. Les données peuvent être exportées via un fichier CSV puis exploitées dans le logiciel R ou Excel. À l'inverse, l'usage s'est avéré impossible dans le cas de l'identification des brevets de Prix Nobel : aucune procédure automatique n'était ici possible, il aurait fallu faire une recherche manuelle avec nom et prénoms des 500 lauréats du Prix Nobel identifiés. La base PATSTAT permet quant à elle ce type d'analyses.

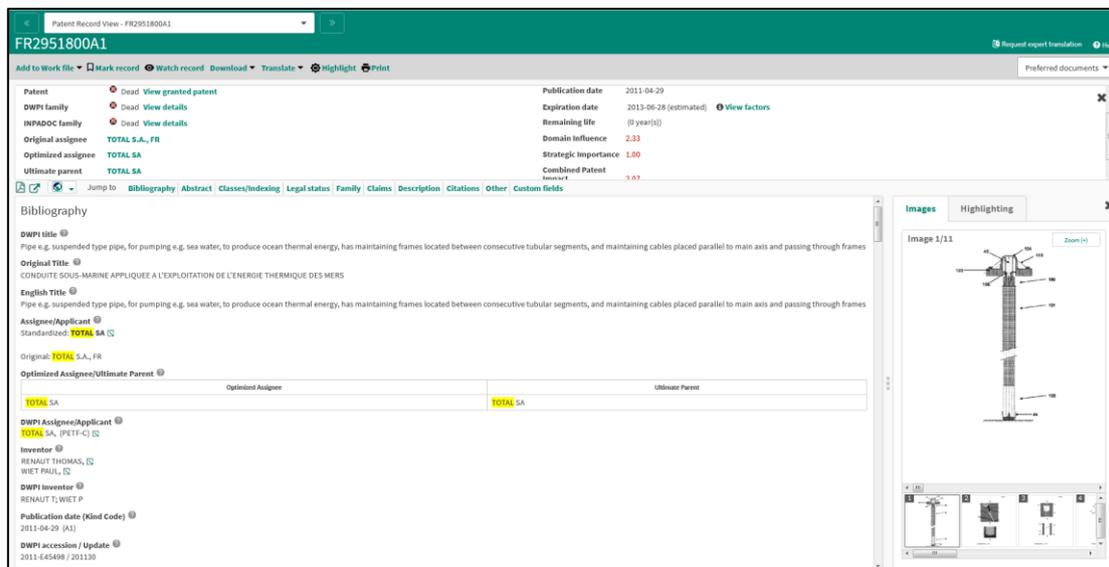


Figure 34 - Capture d'écran d'une recherche brevet sur Derwent

⁵⁵ Site Internet Clarivate Analytics.

Deuxièmement, la base PATSTAT. Cette dernière est une base de données proposée par l'Office Européen des Brevets (OEB) et mise à disposition par l'INPI dans le cadre de cette thèse. La base est « brute » : nous avons mis en place à l'INPI un serveur Linux dédié pour structurer la base et pouvoir la requêter avec des outils SQL, ou directement via le logiciel R. Contrairement à la base DERWENT, les données ne sont pas nettoyées : la recherche d'un portefeuille d'une entreprise est ici complexe puisqu'il faudrait par exemple indiquer dans une requête l'ensemble des filiales possibles. De plus, une même entreprise peut avoir différente appellation : « IBM », « I.B.M », « I.B.M. », « I B M », etc. autant de difficulté pour traiter ces données. À l'inverse, le traitement des données n'est pas limité et il est possible de faire de vastes recherches automatisées. Par exemple, nous avons ici développé un algorithme pour extraire tous les organismes déposants de brevets dont au moins un inventeur comportait le nom et le prénom de 500 lauréats du Prix Nobel avec des limites temporelles liés à leurs périodes d'activités. La particularité du format des données de PATSTAT est qu'elles sont regroupées en 29 « tables » qui communiquent entre-elles par le biais de « clés ». Par exemple la table TLS201 qui regroupe les principales données relatives au contenu du brevet à sa date de dépôt, communique avec la table TLS202 qui regroupe les données de « titres du brevet » par le biais d'une « clé », ici le numéro d'identifiant d'application de dépôt de brevet. La Figure 35 synthétise les différentes tables et leurs correspondances (PATSTAT, 2020, p. 24). Notons enfin que la base PATSTAT est plus complète que la base DERWENT : 100 millions de brevets sont répertoriés avec les éléments légaux de plus de 40 Offices de brevets dans le monde.

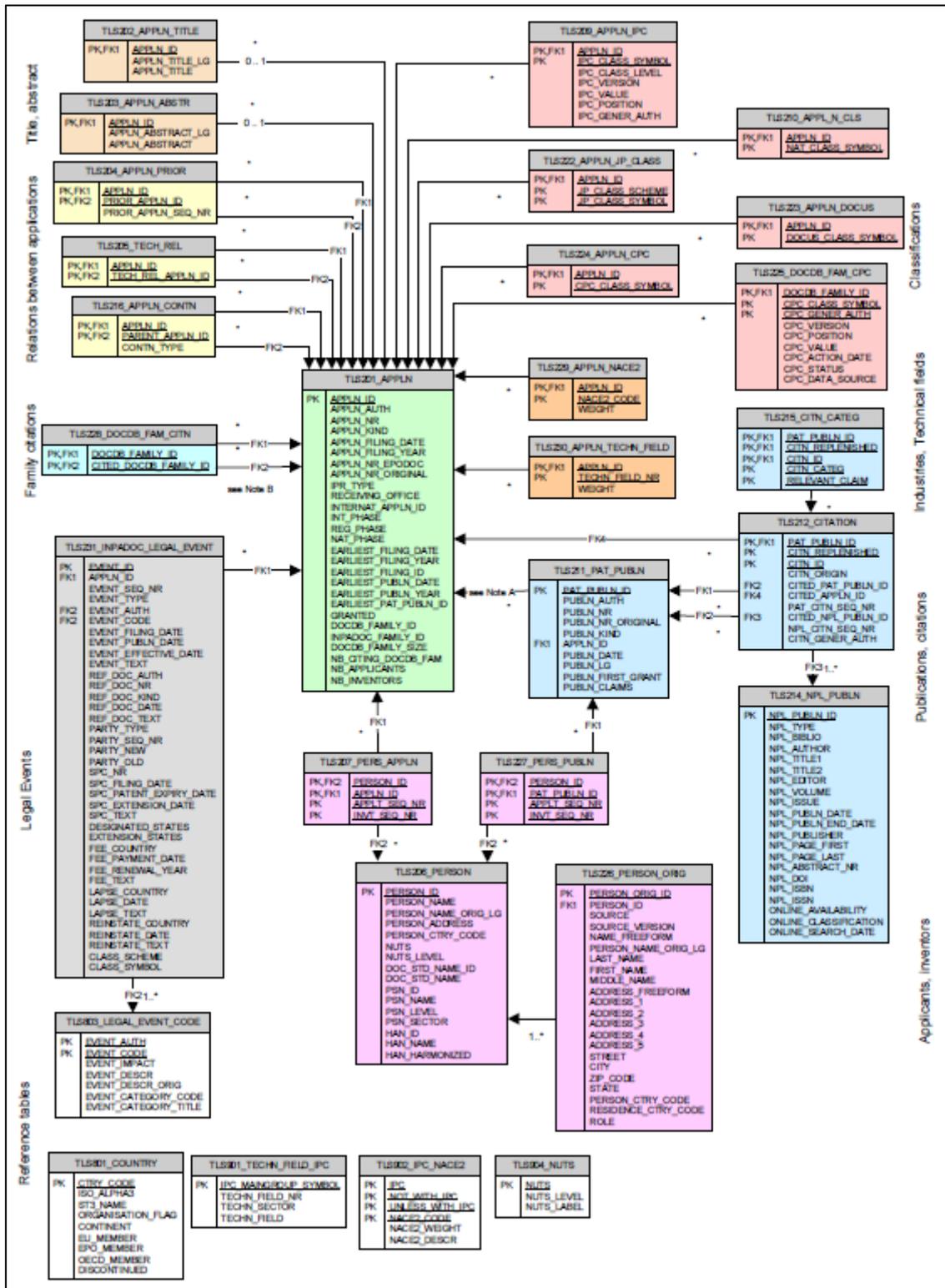


Figure 35 - Diagramme de fonctionnement PATSTAT

Nous résumons ici les principales données auxquelles le chercheur a usuellement accès dans les études bibliométriques sur les brevets (Tableau 15). Compte tenu de l'importance des

données de classes technologiques dans cette thèse, nous proposons dans l'Encadré 16 une brève présentation de cette donnée particulière.

Type d'information	Détails
Identifiant du brevet	Identifiant de dépôt, identifiant de publication, identifiant de famille
Déposant	Nom et pays de l'organisation déposante
Inventeur	Nom, prénom, pays de(s) inventeur(s)
Affiliations des inventeurs	Nom de l'affiliation
Office	Office de dépôt
Classes technologiques IPC	Code IPC (4-digit, 7-digit)
Brevets cités	Par identifiant de dépôt, type de citation (inventeur / examinateur)
Brevets citant	Par identifiant de dépôt, type de citation (inventeur / examinateur)
Citations d'articles scientifiques (SNPL)	Nom et auteurs des articles scientifiques cités
Validité	Acceptation par l'office
Date et priorités	Date de dépôt, date d'acceptation, priorités

Tableau 15 - Principales données bibliométriques des brevets

Encadré 16 - Classification Technologique des Brevets

La Classification Internationale des Brevets (CIB, ou IPC pour son acronyme anglais) est créée par les Accords de Strasbourg (1917) et consiste en un système hiérarchique permettant de classer les brevets en fonction de leurs principes technologiques. La base est administrée et régulièrement mise à jour par l'Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI).

Aujourd'hui, les examinateurs brevets classent toute demande de brevet (y compris les non validées) au sein de la classification. Un brevet peut être classifié dans une ou plusieurs classes technologiques. Le système est particulièrement précis puisqu'il existe aujourd'hui plus de 75 000 subdivisions. L'objectif est de pouvoir rechercher plus facilement les brevets antérieurs dans le cadre de recherches d'antériorité.

La base est en accès libre sur le site de l'OMPI⁵⁶ et comporte huit principales classes :

- A: Human Necessities
- B: Performing Operations, Transporting
- C: Chemistry, Metallurgy
- D: Textiles, Paper
- E: Fixed Constructions
- F: Mechanical Engineering, Lighting, Heating, Weapons
- G: Physics
- H: Electricity

⁵⁶<https://www.wipo.int/classifications/ipc/ipcpub/?notion=scheme&version=20210101&symbol=none&menulan g=fr&lang=fr&viewmode=f&fipcp=no&showdeleted=yes&indexes=no&headings=yes¬es=yes&direction=o2n&initial=A&cwid=none&tree=no&searchmode=smart>

4.2.3. Publications scientifiques dans les brevets (SNPL)

Nous présentons ici brièvement la base de données utilisée concernant les publications scientifiques citées dans les brevets (*Scientific Non Patent Literature*, SNPL) au cours de cette thèse. Comme nous l'avons indiqué au Chapitre 2, il s'agit d'une donnée importante pour discuter du lien entre science et industrie, et pour définir l'orientation plus ou moins appliquée de certains travaux de recherche (ie. plus de citations dans les brevets pourrait ainsi signifier une plus grande proximité avec l'application, et donc un plus grand éloignement des travaux de la recherche fondamentale). Une citation SNPL est caractérisée par un examinateur brevet ou inventeur qui cite pour défendre la nouveauté ou l'activité inventive du brevet (ou objecter à sa nouveauté) un article issu de la littérature scientifique. Ces éléments sont consignés de manière systématique dans le brevet.

Si l'intérêt pour les SNPL est fort depuis de longue date (voir par exemple Fleming, 2001), le manque de structure de ces données a longtemps limité son exploitation. Le développement d'algorithmes de structuration dans la période récente a permis l'émergence de plusieurs bases (Jefferson *et al.*, 2018 ; Marx et Fuegi, 2020 ; Poegel *et al.*, 2019). Dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé les données de Marx et Fuegi (2020) qui présentent l'intérêt d'être une base accessible gratuitement et exploitable directement via le logiciel R. La base proposée réunit 22 millions de liens brevets – publications scientifiques pour des brevets aux États-Unis et dans les principaux autres offices (EPO, JP). La base présente également un indice de confiance de 1 à 10 pour la qualité du lien. Pour assurer la robustesse de nos analyses, nous avons sélectionné uniquement le niveau maximum de confiance (soit 14,6 millions de citations).

4.3. Principaux indicateurs et proxys utilisés et leurs limites

Dans les études bibliométriques, les scientifiques cherchent généralement à évaluer les performances soit d'une publication scientifique, soit d'un brevet ou bien à en décrire les caractéristiques à grande échelle. De très nombreuses techniques existent et nous ne présenterons pas ici une revue exhaustive du champ des possibles. Notre choix s'arrête sur les indicateurs et proxys utilisés majoritairement dans cette thèse et en particulier : (1) les citations reçues, (2) les SNPL et deux proxys : (3) les publications scientifiques comme proxy de l'effort scientifique des entreprises et (4) les classes dans la CIB comme proxy de l'expertise scientifique et technologique.

4.3.1. *Qualité d'une invention ou d'une découverte scientifique*

Dans cette thèse, nous avons utilisé plusieurs indicateurs pour évaluer la qualité d'une invention ou d'une découverte scientifique : les citations reçues, le classement des publications scientifiques, et un indicateur dérivé de travaux sur la distance entre des codes technologiques. Concernant le recours aux citations reçues, il s'agit de l'indicateur le plus classique en bibliométrie. Le recours à cet indicateur a généralement deux principaux usages :

« *Two of the most notable uses are to assess the attributes of the idea embedded in a scientific article and to track its diffusion through time, space and technology domains* » (Jaffe et de Rassenfosse, 2010, p. 1360)

Il s'agit donc ici d'un indicateur classique de « valeur » ou de « qualité » (Harhoff *et al.*, 1999). Cet indicateur a été utilisé dans les travaux sur les Prix Nobel (essai N°1) et dans les travaux sur les modèles de valorisation pendant les crises (essai N°4). Pour les brevets, l'idée sous-jacente est qu'une invention qui reçoit un nombre important de citations serait plus qualitative puisqu'elle implique que les futurs inventeurs soient contraints de faire des efforts importants pour démontrer en quoi leur invention est nouvelle par comparaison à celle-ci, ou que les examinateurs des Offices l'utilisent pour démontrer en quoi une autre invention ne respecterait justement pas les principes de nouveauté. Pour les publications scientifiques, l'idée sous-jacente est qu'une publication qui reçoit un nombre important de citations serait plus qualitative puisqu'elle a généré une lignée de travaux importants qui s'y réfèrent, et constituerait ainsi une avancée scientifique conséquente. Soulignons ici que l'analyse de ce critère se fait généralement dans une fenêtre donnée (généralement à 3 ans, ou à 5 ans) afin d'obtenir des éléments de comparaison stables. De plus, les comparaisons se font généralement en relatif : « tel groupe de brevet a reçu plus de citations que tel autre, et cette différence est statistiquement significative ». Soulignons que plusieurs études ont permis d'attester la validité de cet indicateur (voir par exemple, Albert *et al.*, 1991). Citons quelques limites à ces indicateurs, en s'appuyant notamment sur les travaux de Jaffe et de Rassenfosse (2010). Premièrement, un effet d'Office pour les brevets : selon les Offices de brevets qui analysent le brevet, le nombre de citations peut varier. Par exemple, à l'USPTO, en raison de la réglementation dite « *Duty of Disclosure, Candor, and Good Faith* », un manquement de l'inventeur dans le référencement de l'état de l'art peut conduire à la révocation du brevet, tandis qu'à l'EPO la philosophie est plutôt qu'un bon rapport technique est synthétique et ne présente que les citations les plus importantes. Deuxièmement, toujours pour les brevets, un effet de familles de brevets

(Martinez, 2010 ; Martínez, 2011) : alors que le brevet est déposé individuellement dans chaque juridiction, une famille de brevet correspond à l'ensemble des brevets relativement similaires et d'un même déposant qui sont déposés dans plusieurs offices. Pourtant, les dialogues avec les examinateurs conduisent à ce que ces brevets puissent avoir des versions différentes et se citent entre eux. Or, dans cette thèse nous avons privilégié l'usage de familles de brevets (plutôt que de brevets) en supprimant les citations croisées. Troisièmement, là encore pour les brevets, des effets stratégiques des firmes pour « cacher » l'état de l'art ou éviter qu'une invention ne ressorte avec un haut niveau de citations peuvent biaiser les analyses (Sampat, 2010). Quatrièmement, pour les brevets et les publications scientifiques : des effets de modes ou des effets sociaux peuvent conduire à accroître les citations de certaines publications ou inventions. Cinquièmement, des effets de secteurs ou de discipline peuvent également biaiser les données, certains enregistrent des écarts de productivité scientifiques et techniques importants avec un impact sur le niveau potentiel des citations.

Concernant le recours au classement des publications scientifiques, cet indicateur a été utilisé dans le travail sur les thèses CIFRE (essai N°2) car il s'agissait de la seule donnée d'évaluation de la qualité des publications scientifiques disponible. Ici, les classements tels ceux de la FNEGE ou du CNRS font apparaître différents « niveaux » de revues scientifiques pouvant être liés aux éléments suivants : facteurs d'impact (là encore un indicateur dérivé des citations), impact sur la communauté académique, difficulté de voir un article soumis dans ce type de revue publié. Dans le cas des thèses CIFRE, nous avons par exemple mesuré les publications des doctorants qui étaient publiées dans des revues scientifiques dites de « rang A », soit les meilleures revues scientifiques des différentes disciplines. Là encore, cette logique de classement n'est pas dénuée de limites. En particulier, les citations reçues dans les revues de haut niveau sont très hétérogènes, laissant supposer que ces publications ne sont pas homogènes en termes de qualité.

Troisièmement, concernant les brevets, nous avons défini un indicateur d'originalité technologique pour chaque invention à partir des travaux de Alstott *et al.* (2017a, 2017b) qui proposent un indicateur de distance entre chaque paire de classes technologiques IPC. Leur indicateur est composite et une distance entre 0 et 1 est proposée pour chaque paire de classes technologiques : plus l'indicateur est proche de 1, plus les deux classes sont généralement combinées entre-elles. Nous avons utilisé cet indicateur pour considérer comme technologiquement original, des classes qui étaient particulièrement éloignées entre-elles. Cela suppose une rupture scientifique et technique pour les dépasser puisque les auteurs ont montré que la distance entre les classes technologiques est globalement stable dans le temps. Ici encore,

nous pouvons évoquer une limite. En particulier, la distance entre classes technologiques est liée à une logique d'occurrence statistique : de très rares combinaisons seront peu prises en compte dans le modèle.

4.3.2. Orientation des travaux de recherche

Dans cette thèse, nous avons utilisé les SNPL (présentées ci-dessus) comme un indicateur de l'orientation des travaux scientifiques. L'hypothèse est que plus un papier scientifique est cité dans les brevets, plus le papier est proche de l'application industrielle (Narin, Hamilton et Olivastro, 1997) et donc de la recherche appliquée. À l'inverse, un papier relativement peu cité dans les brevets serait plus proche de la recherche fondamentale. Cette hypothèse implique également certaines limites.

Premièrement, les travaux de Poege *et al.* (2019) font apparaître des effets de modes : par exemple, les articles scientifiques les plus cités n'ont aucun effet sur la qualité des brevets, car la SNPL de ces derniers est devenue la norme pour les brevets d'un champ donné. Deuxièmement, les effets de législation (différence entre Office) impliquent des comportements différents de citations SNPL. Enfin, troisièmement, soulignons que d'autres indicateurs sont possibles pour qualifier l'orientation des recherches en partant notamment des revues scientifiques. Un proxy possible est le nombre de co-auteurs rattachés à une entreprise publiant dans ladite revue. D'une part, ces bases sont privées et les bases SNPL qui sont en accès libre ont été privilégiées dans cette thèse. D'autre part, cette logique est essentialisante et suppose que la recherche effectuée dans les entreprises ne peut être fondamentale, ce qui n'est pas nécessairement le cas comme le montre par exemple le cas des Bell Laboratories. À notre connaissance, l'indicateur SNPL est le plus largement utilisé dans la littérature récente et c'est donc cet indicateur que nous avons privilégié pour qualifier l'orientation des travaux des scientifiques (appliqué vs. fondamentaux).

4.3.3. Publications scientifiques industrielles et efforts scientifiques des entreprises

Dans cette thèse, pour analyser les contributions scientifiques des entreprises et analyser les collaborations OPR – entreprise, nous avons généralement retenu les publications scientifiques dont l'un des auteurs était affilié à l'industrie. Ce mécanisme a été utilisé à plusieurs reprises : pour les travaux sur les Prix Nobel (essai N°1) et pour les travaux sur les modèles de valorisation en période de crise (essai N°4).

Soulignons quelques limites à l'utilisation de cet indicateur. Premièrement, une limite technique. Comme évoquée ci-dessous, le manque de structure ou de qualité des données brevets et publications scientifiques peut rendre difficile le repérage d'auteurs affiliés à l'industrie. La base Lens.org est par exemple couplée à la base *Global Research Identifier Database*⁵⁷ (GRID) qui indique pour chaque affiliation, son type. Par exemple « Mines ParisTech » sera classifié en « Education » et « Bell Laboratories » en « Private sector ». Pourtant, la base GRID ne couvre qu'une partie limitée des données de publications ou de brevets de Lens.org puisque si l'affiliation ne reprend pas la syntaxe exacte de l'affiliation, le lien ne se fait pas. Pour pallier cette difficulté, nous avons développé un algorithme par reconnaissance de mots clés (« inc. », « S.A. », « GmbH », etc.) pour repérer les affiliations qui pourraient être des entreprises et les résultats ont fait l'objet de vérifications manuelles. Deuxièmement, une autre limite est liée au fait que toute collaboration OPR – industrie ou tout projet de recherche d'un industriel ne conduit pas nécessairement à une publication scientifique dans une revue à comité de lecture. Enfin, troisièmement, il est également possible que pour des raisons stratégiques, l'entreprise qui a financé ou collaboré avec des chercheurs issus d'OPR, ne souhaite pas apparaître dans les affiliations du papier publié.

Ainsi, nous avons présenté ici les principaux indicateurs bibliométriques utilisés dans cette thèse.

5. Synopsis de la thèse

Dans cette section, nous proposons un synopsis des résultats de la thèse en fonction des différentes phases de la démarche de recherche.

- **Phase d'abduction (Chapitres 1 & 2) :**

Remarquons d'abord que la **phase d'abduction** correspond davantage au cadrage de la thèse qu'à un résultat en tant que tel : cette phase nous permet de faire l'hypothèse, à partir de notre analyse des paradoxes des relations science – industrie et de notre analyse de la littérature, de l'existence d'un couplage à double impact simultané.

⁵⁷ <https://www.grid.ac/>

- **Phase de déduction (Chapitre 4) :**

La phase de déduction présentée au Chapitre 4 nous permet de développer un modèle formel, qui s'appuie sur les théories de la conception et plus particulièrement la théorie C-K (Hatchuel et Weil, 2003, 2009) par l'adoption d'une approche cognitive originale des relations science - industrie. Le modèle formel décrit les interactions entre un *scientifique* impliqué dans des activités de recherche scientifique et un *industriel*, impliqué dans des activités de développement de produits, procédés et services. La performance est approchée à partir de deux notions : la capacité à sortir des zones de fixations cognitives (Agogué, 2012) et la non-hybridation des espaces de conception (ie. capacité des acteurs à conserver des natures de concepts qui leur sont propres), notion développée pour cette thèse. Le principal résultat de cette phase est la spécification des conditions d'existence et de performance du couplage à double impact simultané. Nous montrons que ce modèle s'avère particulièrement vertueux, car il conduit un phénomène de *défixations croisées* (ie. double sortie des zones de fixations des acteurs) sans *hybridation*. Pourtant, ses conditions d'existence sont particulièrement restrictives (échange bidirectionnel de connaissances, *k-reordering*, indépendantisation de la connaissance du partenaire, etc.). Ce résultat théorique est complété par un cas d'étude qui permet de démontrer la validité de l'approche sur le couplage à double impact simultané : la découverte de CRISPR-Cas9 comme mécanisme de défense immunitaire des bactéries chez DuPont-Danisco. Un résultat secondaire de cette phase consiste en la spécification de deux autres classes de couplages : *séquentiels* et *hybridés*. Ces deux modèles permettent d'enrichir et de discuter les modèles plus classiques dits linéaires et de science résolutoire, sans s'y réduire totalement, et en y apportant une dimension nouvelle par l'approche cognitive, à même d'expliquer certains succès ou échecs dans ces relations.

Nous attirons ici l'attention du lecteur sur le fait que bien que cette thèse s'appuie sur des essais, le Chapitre 4 correspond au cadre d'analyse explicatif de la démarche poursuivie dans les quatre essais et détaillée au Chapitre 5. Par ailleurs, si les éléments du Chapitre 4 n'ont pas fait l'objet d'un essai, c'est que le modèle formel a été enrichi de façon itérative tout au long de la thèse. Une première version du modèle a fait l'objet d'une présentation en conférence et est disponible en Annexe 2.

- **Phase de tests empiriques (Chapitre 5 – Essais N°1 & N°2) :**

La phase de tests empiriques permet d'explorer la dynamique historique et les performances du modèle de couplage à double impact simultané, et est présentée dans la première partie du Chapitre 5. L'enjeu est de déterminer si cette nouvelle catégorie de couplage

est pertinente pour expliquer certains phénomènes des sciences dites fondamentales ou appliquées.

Dans une première partie, pour les sciences dites fondamentales, nous étudions les carrières des lauréats du Prix Nobel (essai N°1) en nous appuyant sur une approche bibliométrique afin de déterminer si certains lauréats relèveraient du couplage à double impact simultané. Après avoir développé une méthode permettant de tester cette hypothèse, nous montrons que le couplage à double impact simultané est historiquement persistant, et en forte augmentation sur la période récente : au total, un lauréat sur cinq environ relève de cette dynamique. Enfin un résultat secondaire consiste à montrer qu'il existe des différences structurelles par type de discipline.

Dans une seconde partie, nous nous concentrons sur les thèses CIFRE comme proxy des sciences dites appliquées (essai N°2). En développant une méthode de codage qualitatif permettant de spécifier les couplages à l'œuvre dans chaque projet de recherche, nous évaluons les performances des différents couplages. Nous montrons que le couplage à double impact simultané permet de favoriser les performances scientifiques et industrielles, et de double impact, et que le choix du type de couplage constitue le critère explicatif principal de la performance d'un projet de recherche partenarial. Un résultat secondaire consiste à montrer que l'impact scientifique et l'impact industriel sont deux variables indépendantes dans les couplages plus traditionnels : il n'y a pas de choix à opérer.

- **Phase inductive (Chapitre 5 – Essais N°3 & N°4) :**

La phase inductive de cette thèse permet de discuter des conditions et cadres institutionnels associés au double impact simultané. Comme nous l'avons remarqué, les conditions d'existence de ce modèle sont particulièrement restrictives : il est ainsi nécessaire de discuter des régimes d'actions collectives qui permettent de le soutenir.

Dans une première partie, nous nous questionnons sur les régimes de la dynamique de l'expertise dans la R&D industrielle qui pourraient soutenir le double impact simultané (**essai N°3**). En développant une approche originale à partir de l'analyse des brevets dans le secteur du pétrole et du gaz, nous sommes à même de définir des situations relevant du couplage à double impact simultané, et d'identifier les régimes de dynamique de l'expertise associés à ces projets de R&D industrielle. Le résultat principal consiste à montrer que le régime dit de *recomposition* de l'expertise qui capitalise sur la combinaison d'expertises indépendantes internes à l'organisation, et potentiellement des expertises nouvelles, favorise le double impact simultané. À l'inverse, les approches *d'absorption* qui consistent à intégrer de nouvelles

expertises, ou créer de nouveaux « îlots » d'expertise ex nihilo dans l'organisation, ne favorisent pas ce type de couplage. Un résultat secondaire consiste également à proposer une typologie de régimes de dynamique de l'expertise en fonction de la structure de la base des connaissances des organisations.

Dans une seconde partie, nous engageons une réflexion sur l'effet des crises pour le couplage à double impact simultané (**essai N°4**). Cette partie est motivée par la volonté de contribuer scientifiquement à une meilleure compréhension des phénomènes associés à la crise du Covid-19 apparue au cours de la thèse. De plus, nous avons indiqué que comme les crises nécessitent le développement conjoint de nouveaux savoirs scientifiques et d'innovations, le couplage à double impact simultané pourrait s'avérer intéressant. En adoptant une méthode bibliométrique, et en étudiant les contributions des industriels à la science et au développement pendant les crises successives des coronavirus (SARS-Cov1, MERS-Cov, Covid-19), nous montrons que la crise n'est que marginalement un catalyseur du double impact simultané : des cadres institutionnels spécifiques doivent l'encourager. En particulier, la collaboration des industriels avec des OPR est un levier, si et seulement si la relation est antérieure à la survenue de la crise. D'autre part, le développement d'une expertise scientifique sur la thématique de recherche avant crise est un levier additionnel.

- **Synthèse du synopsis :**

Nous proposons un schéma récapitulatif du synopsis de la thèse dans le Tableau 16 ci-dessous.

		Hypothèse du couplage à double impact simultané entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits, procédés et services					Chapitre 1 & 2	
ABDUCTION	Question de recherche	Résultat principal	Résultat secondaire	Matériau empirique	Méthodologie	Littérature principale	Références	
DÉDUCTION	Comment modéliser un couplage à double impact simultané entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits, procédés ou services ?	Définition formelle des conditions d'existence et de performance (<i>défixation croisée, non-hybridation</i>) du double impact simultané	Définition formelle des conditions d'existence et de performance des couplages hybrides et séquentiels	N/A	Modélisation	Théories de la conception	Chapitre 4	
		Validation du modèle formel sur un cas d'étude	N/A	Découverte de CRISPR-Cas9 comme mécanisme de défense immunitaire adaptatif des bactéries (matériau d'archive)	Cas d'étude			
TESTS	Quelle dynamique historique et quelles performances pour le modèle de couplage à double impact simultané dans les couplages relevant traditionnellement de la « recherche fondamentale » et de la « recherche appliquée » ?	Le couplage à double impact simultané est persistant historiquement, performant et en accélération sur la période récente pour la recherche fondamentale	Contingence du couplage à double impact simultané à la discipline scientifique	Carrière des lauréats du Prix Nobel physique, chimie et médecine (méta-données de publications scientifiques et brevets)	Bibliométrie	Engagement académique / relations OPR - industrie	Chapitre 5 – Essai N°1	
		Le couplage à double impact simultané à des performances supérieures (académiques, double-impact) que les autres types de couplages, et est un déterminant principal de la performance	Indépendance des performances scientifiques et industrielles pour les couplages hybrides et séquentiels	Thèses collaboratives CIFRE (contrats de collaboration, questionnaires de fin de CIFRE)	Codage qualitatif et analyse quantitative	Engagement académique / relations OPR - industrie	Chapitre 5 – Essai N°2	
INDUCTION	Quels cadres institutionnels et conditions pour favoriser les performances du modèle de couplage à double impact simultané ?	Le régime de recomposition de l'expertise favorise le couplage à double impact simultané, à l'inverse du régime d'absorption	Typologie des régimes de dynamique de l'expertise en fonction de la structure des expertises dans l'organisation	Brevets de R&D industrielle dans le secteur pétrole et gaz	Bibliométrie	Invention combinatoire	Chapitre 5 – Essai N°3	
		Les crises ne sont que marginalement un catalyseur du double impact simultané : des conditions spécifiques doivent être mis en œuvre	N/A	Publications scientifiques, brevets et projets de vaccins d'industriels sur les coronavirus	Bibliométrie	Engagement académique / invention combinatoire / Relations OPR - industrie	Chapitre 5 – Essai N°4	

Tableau 16 - Synopsis des résultats de la thèse

Synthèse du Chapitre 3

Ce Chapitre 3 avait pour objectif de revenir sur la méthodologie de cette thèse : à la fois la démarche de recherche et le positionnement épistémologique, mais aussi le matériau empirique et les méthodes développées pour répondre aux questions de recherche.

Nous sommes d'abord revenus sur la démarche de recherche qui s'articule selon quatre phases distinctes. Dans une phase abductive, nous proposons l'hypothèse du couplage à double impact simultané à partir des paradoxes des relations science – industrie modernes (Chapitre 1) et de la littérature (Chapitre 2). Dans un second temps, avec une approche déductive, nous proposons un modèle formel des couplages science – industrie et en particulier des conditions d'existence et de performance du couplage à double impact simultané, testé sur un cas d'étude (Chapitre 4). Les hypothèses de ce modèle formel sont testées empiriquement et à grande échelle (Chapitre 5 – Partie 1). Enfin, une dernière phase inductive vise à proposer des conditions et des cadres institutionnels pour soutenir le couplage à double impact simultané (Chapitre 5 – Partie 2). Nous avons par la suite détaillé les différentes phases de l'itinéraire de recherche.

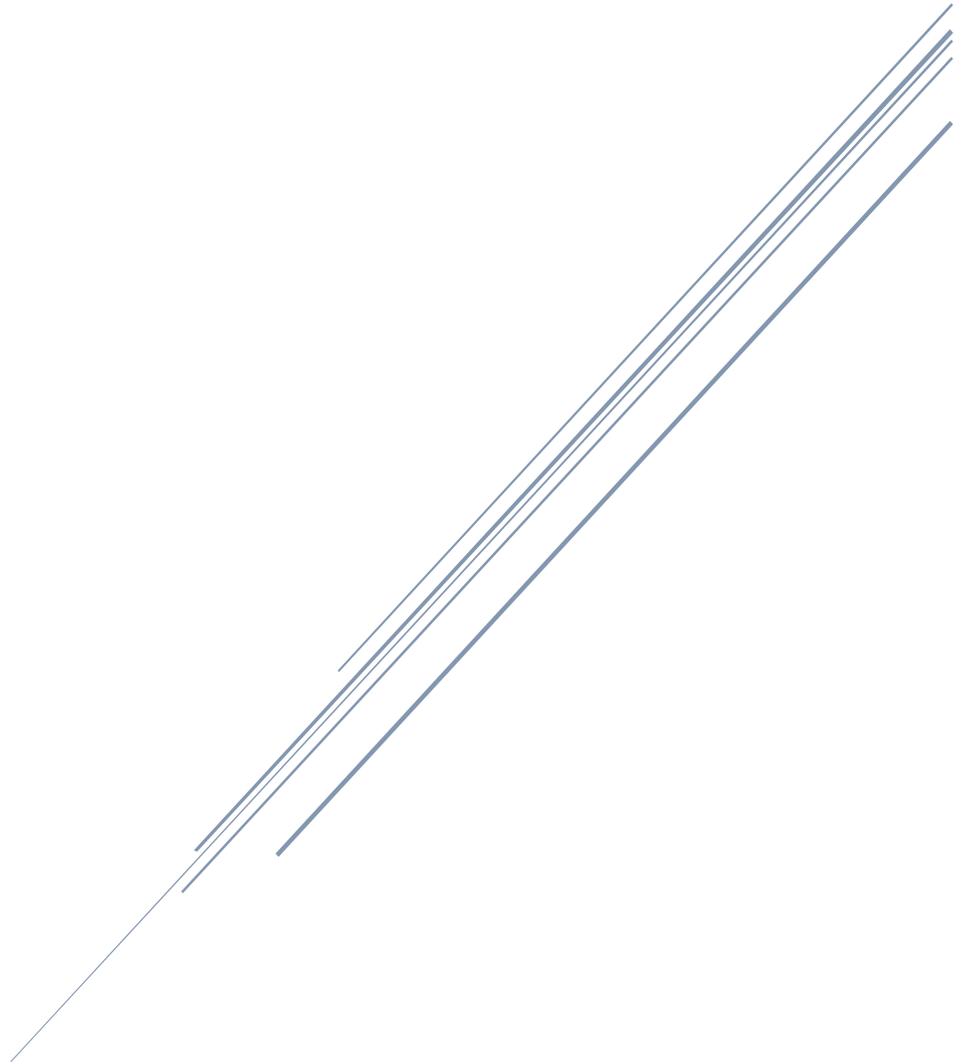
Dans un second temps, nous avons spécifié notre positionnement épistémologique que nous avons qualifié d'hybride entre « chercheur-acteur » et « post-positivisme ». En effet, la recherche est fortement ancrée auprès de praticiens (le chercheur est salarié en thèse CIFRE, plusieurs projets de recherche collaborative ont été menés). Pourtant, l'approche est post-positiviste avec une volonté de démontrer la pertinence et l'ampleur du modèle de couplage à double impact simultané, notamment par le recours à des méthodes hypothético-déductives. Ce positionnement particulier nous a conduits à favoriser une logique d'allers-retours constants entre théories et pratiques, permis notamment par de nombreuses présentations auprès des pairs de l'académie, mais aussi des échanges réguliers avec les praticiens sur les travaux.

Dans un troisième temps, nous sommes revenus de façon approfondie sur le matériau empirique et les méthodes développées dans cette thèse qui nous ont permis de répondre à nos questions de recherche. Nous avons détaillé le matériau empirique : le cas DuPont-Danisco, les carrières des Prix Nobel, les thèses CIFRE, la R&D industrielle des entreprises leaders du secteur pétrole et gaz, les industriels qui contribuent à la recherche scientifique sur les coronavirus. Compte tenu de notre approche exploratoire, il a été nécessaire de développer des outils d'observations spécifiques afin de révéler les couplages à double impact simultané. Nous avons également fait un focus sur le recours aux méthodes bibliométriques. En effet, le recours à la méthode hypothético-déductive et la volonté d'adopter une démarche quantitative nous ont conduits à exploiter abondamment les bases de données de publications scientifiques et de brevets. Ces bases permettent des analyses à grande échelle sur les couplages science-industrie, mais ne sont pas dénuées de biais et de limites que nous avons présentés sur chacun des indicateurs qui ont été utilisés dans les différents essais.

Ces éléments méthodologiques étant stabilisés, nous avons conclu ce Chapitre 4 par la présentation du synopsis des résultats de la thèse.

CHAPITRE 4 :

MODELES DE COUPLAGE RECHERCHE SCIENTIFIQUE - DEVELOPPEMENT PRODUITS, PROCEDES OU SERVICES



Ce chapitre vise à répondre à la première question de recherche en proposant un modèle formel des couplages science – industrie. D’abord, nous revenons sur les objectifs et la stratégie de modélisation, fondée sur les théories de la conception. Nous détaillons ensuite le modèle afin de faire émerger trois classes de couplages : séquentiels, hybridés et à double impact simultané. La pertinence du couplage à double impact simultané, le plus en rupture, est démontrée à partir d’un cas d’étude approfondi dans l’industrie agroalimentaire.

CHAPITRE 4 :

MODELES DE COUPLAGE RECHERCHE SCIENTIFIQUE - DEVELOPPEMENT PRODUITS, PROCEDES OU SERVICES

1.	<i>Objectifs et stratégie de modélisation</i>	203
1.1.	Éléments à modéliser	203
1.2.	Le recours aux théories de la conception comme stratégie de modélisation	205
1.2.1.	Les théories de la conception pour décrire la conception de produits innovants	205
1.2.2.	Les théories de la conception pour concevoir des interactions entre deux concepteurs	209
1.2.3.	Théorie C-K et conception de connaissances scientifiques nouvelles	210
2.	<i>Modèle formel des couplages</i>	212
2.1.	Cadre général de l'analyse	212
2.1.1.	Formalisme du couplage entre activités de recherche scientifique – activités de développement de produits	212
2.1.2.	Performances scientifiques et industrielles	214
2.1.3.	Logique d'interaction entre les acteurs	216
2.2.	Étape 1 - <i>Matching</i>	217
2.2.1.	Cas M-1 : Couplage séquentiel	217
2.2.2.	Cas M-2 : Couplage hybridé	220
2.2.3.	Cas M-3 : Pas de matching	223
2.3.	Étape 2 – <i>Building</i>	223
2.3.1.	Cas B-1 : Échanges pour favoriser des intersections.	225
2.3.2.	Cas B-2 : Modèle à double impact simultané (ie. préservation des espaces de conception)	228
2.4.	Discussion et implications du modèle formel :	231
2.4.1.	Classe des couplages séquentiels	231
2.4.2.	Classe des couplages hybridés	236
2.4.3.	Couplage à double impact simultané	240
3.	<i>Cas d'étude du modèle à double impact simultané</i>	243
3.1.	Présentation du contexte du cas CRISPR-Cas9	243
3.2.	Formalisation en C-K et démonstration du double impact simultané	249
3.2.1.	Situation initiale	249
3.2.2.	Phase de Matching	254
3.2.3.	Phase de Building	255
3.3.	Synthèse des apprentissages du cas et de la modélisation C-K	267
4.	<i>Retour sur le modèle formel et effets sur les questions de recherche</i>	269
4.1.	Apports du modèle formel des couplages	269
4.2.	La modélisation comme levier d'exploration des relations science – industrie :	272
	<i>Synthèse du Chapitre 4</i>	276

Ce Chapitre 4 entend répondre à notre première question de recherche : il s'agit de proposer un modèle formel permettant de décrire des couplages à double impact simultané, au regard de couplages plus classiques (science résolutoire, modèle linéaire). Pour cela, nous présentons dans un premier temps les objectifs de ce modèle formel et la stratégie de modélisation adoptée. Dans un second temps, nous explicitons le modèle et les différents couplages possibles entre ces deux activités. Enfin, dans un troisième temps, nous présentons une illustration du modèle le plus en rupture, à double impact simultané, à partir d'un cas d'étude : la découverte de CRISPR-Cas9 comme mécanisme de défense immunitaire adaptatif des bactéries.

1. Objectifs et stratégie de modélisation

Cette section vise à revenir sur les éléments à modéliser et sur le choix de retenir les théories de la conception pour proposer un modèle formel des couplages entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits, procédés et services.

1.1. Éléments à modéliser

Nous cherchons ici à concevoir un modèle formel qui permettrait de rendre compte de la variété des couplages entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits (ou de services, ou de procédés, mais par souci de simplification nous utiliserons uniquement dans ce Chapitre le terme « produit »). En particulier, le modèle devrait permettre d'explicitier le fonctionnement et les conditions de succès (ou d'échecs) d'un couplage dit à double impact simultané. L'enjeu est donc de révéler et de comprendre les mécanismes à l'œuvre pour générer à la fois percées scientifiques, et création d'inventions novatrices au cours d'un même projet, à partir d'une logique déductive.

Il nous apparaît nécessaire que le modèle formel rende compte des postulats et des résultats démontrés dans la littérature (voir Chapitre 2), ainsi que les paradoxes mis en lumière dans les relations science – industrie (voir Chapitre 1). Au-delà du couplage à double impact simultané, ledit modèle devra donc pouvoir rendre compte des autres types de couplages (modèle linéaire, science résolutoire).

Plus précisément, un enjeu clé souligné dans la littérature est celui de la mesure de la performance : quel serait le modèle de couplage le plus efficient ? Un modèle formel de qualité des couplages devrait donc permettre d'informer sur les performances en termes de capacité à générer des découvertes scientifiques et des produits radicalement nouveaux dans chacun des cas envisagés. Il devrait également pouvoir permettre de mettre en évidence les limites et les

arbitrages quasi insolubles sur lesquels nous avons conclu le Chapitre 1 : si les couplages hérités de la science résolutoire favorisent les percées industrielles, c'est nécessairement au prix d'une recherche scientifique avec une faible capacité à générer des découvertes majeures ; et inversement, si les couplages hérités du modèle linéaire favorisent les percées scientifiques, c'est nécessairement au prix de difficultés industrielles à proposer rapidement des innovations en rupture.

Enfin bien sûr, le modèle devra rendre compte de relations fécondes entre activités scientifiques et activités de développement de produits au sein de mêmes projets, comme le cas de l'*US Department of Energy* décrit par Goldstein et Narayanamurti (2018), ou les cas étonnants proposés au Chapitre 1 (découverte du transistor dans les *Bell Laboratories*, projet Manhattan, etc.). Le modèle devra donc reposer sur des hypothèses testables afin de pouvoir apporter une validité scientifique par des tests empiriques (voir phase suivante de la démarche de recherche).

Ces éléments sont synthétisés dans le Tableau 17 ci-dessous.

Objectifs	Détails	Sources
Permettre de décrire les mécanismes de différents types de couplages	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Couplages hérités du modèle linéaire ➤ Couplages hérités de la science résolutoire ➤ Couplages à double impact simultané (si possible) 	Ch.1
Permettre de décrire les performances	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Degré d'innovation dans les produits nouveaux développés ➤ Degré de rupture dans les nouveaux savoirs scientifiques, découvertes scientifiques 	Ch.2
Permettre de rendre compte des résultats de la littérature	<ul style="list-style-type: none"> ➤ L'orientation vers l'usage et l'engagement académique favoriserait la productivité scientifique ➤ L'orientation vers la science dans les activités de développement favoriserait la rupture technique et industrielle et des produits innovants ➤ Forte hétérogénéité au niveau du projet pour ces deux résultats 	Ch.2.
Permettre de rendre compte des limites, paradoxes et interrogations (évoquées notamment dans la littérature)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Les couplages hérités de la science résolutoire ne semblent pas conduire à des effets scientifiques notables (avec risque de dérive) ➤ Les couplages hérités du modèle linéaire conduisent à des difficultés d'intégration des connaissances nouvelles pour le développement de produits ➤ Difficultés de pilotage de la recherche partenariale, ou de la R&D industrielle 	Ch.1, Ch.2
Permettre de rendre compte des succès	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Rendre compte des succès possibles, y compris dans le cas du double impact simultané (projet Manhattan, transistor dans les <i>Bell Laboratories</i>, ARPA-E au DOE) 	Ch.1, Ch.2
Permettre de tester empiriquement	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Un modèle qui permet d'être testé à partir de cas d'études 	Ch.3

Tableau 17 - Objectifs de modélisation

Nous détaillons ci-après les choix entrepris pour proposer un modèle formel répondant à ces objectifs.

1.2. Le recours aux théories de la conception comme stratégie de modélisation

Pour modéliser les couplages entre les activités de développement de nouveaux produits et les activités de recherche scientifique, nous choisissons de nous appuyer sur les théories de la conception. Nous revenons ici sur les raisons qui nous poussent à explorer cette voie de recherche originale.

1.2.1. Les théories de la conception pour décrire la conception de produits innovants

Les théories de la conception (par exemple, Pahl et Beitz, 2013 ; Simon et Newell, 1958 - pour une synthèse voir Le Masson et al., 2017) constituent une alternative aux théories de l'invention combinatoire en s'appuyant sur la logique du raisonnement cognitif pour décrire la conception de produits nouveaux. Nous nous appuyons ici sur la théorie C-K (Hatchuel et Weil, 2003, 2009), l'un des formalismes les plus avancés et récents dans ce champ de recherche. Nous renvoyons le lecteur à l'Encadré 17 pour une présentation plus approfondie de la théorie C-K.

Dans la théorie C-K, le développement d'un nouveau produit - donc ici la conception d'un nouveau « concept » innovant - repose sur des expansions et des interactions (ie. conjonction, disjonction) entre deux espaces distincts : *l'espace des connaissances* (ie. espace K) et *l'espace des concepts* (ie. espace C) par une exploration dans l'inconnu. La théorie C-K permet de rendre compte des *fixations* (voir Encadré 18) des concepteurs (voir par exemple, Agogué, 2012) : les performances de la conception correspondant alors au dépassement desdites fixations. Ce cadre nous semble intéressant pour discuter les effets des connaissances, notamment scientifiques, sur le développement de produit. Le choix paraît d'autant plus robuste que dans notre cas, nous pouvons faire l'hypothèse que l'utilisation de connaissances scientifiques nouvelles pour la conception d'un produit nouveau relève bien d'une exploration dans l'inconnu : la connaissance scientifique étant nouvelle, son potentiel est inconnu (ie. les états possibles de la nature générés par cette connaissance ne sont pas prévisibles). Soulignons qu'utiliser la théorie pour décrire les mécanismes associés au développement de produit semble une voie, bien qu'alternative à l'analyse combinatoire, relativement classique (Agogué et Kazakçi, 2014).

Nous avons remarqué au Chapitre 2 que pour réaliser des tests empiriques, la littérature se réfère abondamment à l'invention et aux brevets. Or, la théorie C-K peut être mobilisée pour décrire finement le processus de l'invention brevetable au travers du modèle Action – Effet –

Connaissance (Kokshagina *et al.*, 2014 ; Le Masson, Weil et Hatchuel, 2010b ; Sincholle, 2009). Nous renvoyons le lecteur à l'Encadré 19 p. 208 pour davantage de détail sur ce point.

Ainsi, les théories de la conception permettent de décrire le raisonnement permettant à un concepteur de concevoir un nouveau produit innovant, et plus précisément une nouvelle invention. Ces éléments nous permettent de considérer ces théories comme prometteuses pour répondre à nos enjeux de modélisation. Toutefois, nous cherchons à modéliser des couplages entre deux activités : il nous faut donc démontrer que les théories de la conception permettent de modéliser ce type d'interaction.

Encadré 17 – La théorie C-K

Le principal avantage de la théorie C-K est qu'elle présente un formalisme du raisonnement de conception à la fois générique et génératif, et a été développé principalement par Hatchuel et Weil (2003, 2009). Le principe de la théorie C-K repose sur la distinction entre deux espaces en expansion (Le Masson, Weil et Hatchuel, 2017, p. 48) :

- *L'espace des connaissances* (« espace K ») qui regroupe des propositions ayant un statut logique (ie. propositions dont on peut considérer dans un contexte donné qu'elles sont « vraies » ou « fausses »). Cet espace inclut toutes les connaissances disponibles : réglementaires, croyances, mais aussi connaissances scientifiques et techniques (d'où l'intérêt pour notre sujet) ;
- *L'espace des concepts* (« espace C ») qui regroupe des propositions qui n'ont pas de statut logique dans l'espace des connaissances. Cela signifie qu'il est impossible de prouver que cette proposition est vraie ou fausse dans l'espace K⁵⁸.

La théorie suggère que le raisonnement de conception consiste en des interactions constantes entre l'espace des connaissances et l'espace des concepts. En particulier, toutes les propositions de l'espace C, c'est-à-dire les concepts, sont dépendantes de l'espace K. La logique sous-jacente pour le raisonnement de conception est la suivante : on ne conçoit pas à partir de rien, mais bien à partir de connaissances existantes. Pourtant, les concepts ne sont pas réductibles à des connaissances dans l'espace K : ce sont des propositions qui contiennent une part d'inconnu.

Ainsi, la conception est un processus dans lequel un concept engendre d'autres concepts ; et/ou implique la recherche de nouvelles connaissances qui induisent la génération d'autres concepts ; et/ou les connaissances conduisent à accéder à de nouvelles connaissances avec des répercussions sur l'espace des concepts. Ainsi, la conception s'achève lorsqu'un concept est finalement transformé en une connaissance : c'est la réussite ou l'échec du projet. Ainsi, on a bien une logique d'expansion des espaces : les connaissances permettent d'étendre les concepts par un processus de partitions et d'ajouts de propriétés, et les concepts entraînent une expansion des connaissances. Ainsi, pour un projet de conception donnée, l'espace K regroupe les connaissances qui sont nécessaires au développement d'un produit, tandis que l'espace C est un arbre de propositions indécidables avec des nœuds qui correspondent à des partitions du concept initial c'est-à-dire des sous-concepts du concept initial (voir Figure 36).

⁵⁸ Par exemple, « une voiture sans roue » ou « un bateau qui vole » (Le Masson, Weil et Hatchuel, 2017, p. 48)

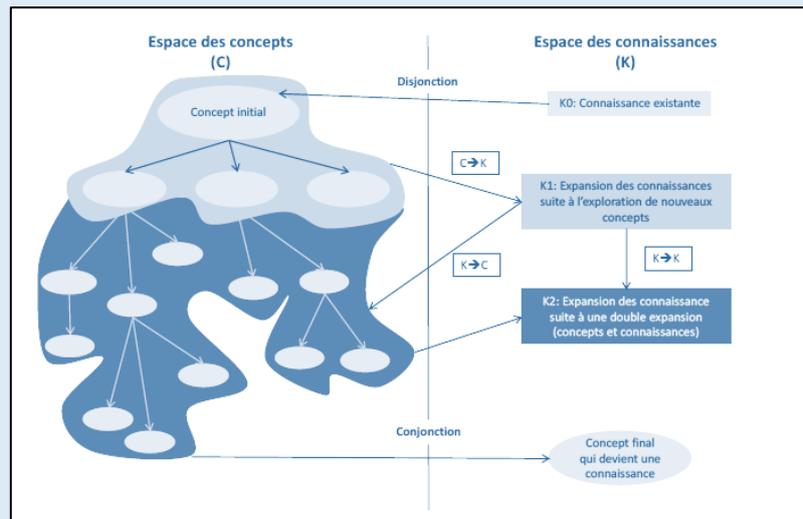


Figure 36 - Représentation de la théorie C-K (source : Cabanes, 2017)

Il existe donc quatre opérateurs dans la théorie C-K :

- $K \rightarrow C$, dit opérateur de *disjonction* qui permet d'élargir l'espace C à partir d'éléments de l'espace K en partitionnant le concept initial ;
- $C \rightarrow K$, dit opérateur de *conjonction* qui permet à un concept de devenir une connaissance. Il s'agit d'une opération d'ajout ou de soustraction de propriétés de l'espace K à des concepts de l'espace C afin de parvenir à des propositions avec un statut logique ;
- $C \rightarrow C$, dit opérateur de *partitions* dans C qui permet de générer des sous-concepts. Une partition peut être restrictive (réduit l'espace des possibilités) ou expansive (nouvelles caractéristiques au concept *initial*) ;
- $K \rightarrow K$, dit opérateur d'expansion dans K et qui permet une expansion de l'espace des connaissances.

Enfin, la théorie C-K permet également de discuter des performances d'un régime de conception à partir d'inputs (types de connaissances, capacité de production, effectifs de R&D, etc.) et des outputs c'est-à-dire la capacité d'expansion à générer des objets radicalement nouveaux (Le Masson, Weil et Hatchuel, 2017).

Pour discuter des performances, il nous faut aborder ici le concept de « fixation » (Agogué, 2012 ; Agogué *et al.*, 2014 ; Camarda *et al.*, 2017). Soulignons ici que la littérature en management de l'innovation a discuté les « sentiers d'innovation », c'est-à-dire des voies dans lesquelles des choix alternatifs n'étaient pas possibles en raison d'un manque de connaissance, de capacité d'absorption ou de choix technologiques historiques (Sydow, Schreyögg et Koch, 2009). Kaplan et Tripsas (2008) ont introduit la notion de « dépendance au sentier » en montrant comment des acteurs sélectionnent des idées dans un espace cognitif collectif lié à une trajectoire technologique dominante. Thrane, Blaabjerg et Møller (2010) ont pour leur part souligné en quoi le collectif contraignait cette sélection et cette génération d'idée dans un espace cognitif réduit. En effet, les effets de fixations peuvent subvenir au niveau cognitif et sont liés au fait que les individus tendent à générer des idées créatives les plus facilement accessibles (Hatchuel, Le Masson et Weil, 2011). Sur cette base, Agogué et Le Masson (2014) distinguent deux formes de raisonnement de génération d'idées. D'abord un raisonnement fixé basé sur l'utilisation de routines cognitives qui appellent des solutions existantes, avec des paradigmes stables, et qui favorisent l'adaptation de ces solutions et l'innovation incrémentale. Et un raisonnement exploratoire qui conduit à des idées créatives et disruptives par une approche contrôlée de l'exploration et de ses alternatives. Il a été montré, par exemple avec des tâches simples (tâche de l'œuf), comment ces effets de fixation venaient contraindre la capacité d'un concepteur à générer des solutions en rupture, et donc en dehors de l'espace de fixation (Agogué, 2012 ; Camarda *et al.*, 2017). Les effets de fixations peuvent être aisément modélisés dans la représentation C-K puisque certaines partitions dans l'espace des concepts seront alors considérées en fixation (Agogué, 2012).

Encadré 18 – Les fixations en conception

Pour discuter des performances en théorie de la conception, il nous faut aborder le concept de « *fixations* » (ex. Agogué, 2012 ; Agogué *et al.*, 2014 ; Camarda *et al.*, 2017).

Notons que la littérature en management de l'innovation a discuté les « sentiers d'innovation », c'est-à-dire des voies dans lesquelles des choix alternatifs n'étaient pas possibles en raison d'un manque de connaissance, de capacité d'absorption ou de choix technologiques historiques (Sydow, Schreyögg et Koch, 2009). Kaplan et Tripsas (2008) ont pour leur part introduit la notion de « dépendance au sentier » en montrant comment des acteurs sélectionnent des idées dans un espace cognitif collectif lié à une trajectoire technologique dominante. Thrane, Blaabjerg et Møller (2010) ont de leur côté souligné en quoi le collectif contraignait cette sélection et cette génération d'idée dans un espace cognitif réduit. Ces notions peuvent être réinterprétées à l'aune des théories de la conception. On peut définir les fixations en s'appuyant sur la définition de Jansson et Smith qui furent parmi les premiers à utiliser cette notion pour la conception.

« *Design fixations [are] defined as a blind adherence to a set of ideas or concepts limiting the output of conceptual design* » (Jansson et Smith, 1996, p. 1)

Ainsi, les fixations peuvent subvenir au niveau cognitif (Purcell et Gero, 1996) et sont liées au fait que les individus tendent à générer les idées créatives les plus facilement accessibles face à un problème de conception donné (Hatchuel, Le Masson et Weil, 2011). Sur cette base, Agogué et Le Masson (2014) distinguent deux formes de raisonnement de génération d'idées. D'abord un *raisonnement fixé* basé sur l'utilisation de routines cognitives qui appellent des solutions existantes, avec des paradigmes stables, et qui favorisent l'adaptation de ces solutions et l'innovation incrémentale. Et un *raisonnement exploratoire* qui conduit à des idées créatives et disruptives par une approche contrôlée de l'exploration et de ses alternatives.

Il a été montré, par exemple avec des tâches simples (tâche de l'œuf), comment ces effets de fixation venaient contraindre la capacité d'un concepteur à générer des solutions en rupture, et donc en dehors de l'espace de fixation (Agogué, 2012 ; Camarda *et al.*, 2017). Les effets de fixations peuvent être aisément modélisés dans la représentation C-K puisque certaines partitions dans l'espace des concepts seront alors considérées en fixation (Agogué, 2012).

Encadré 19 – Le modèle Action – Effet - Connaissance

Sincholle (2009) et Le Masson, Weil et Hatchuel (2017) proposent un modèle dit « Action – Effet – Connaissance » pour modéliser le brevet d'invention et éviter une approche uniquement basée sur la propriété intellectuelle. Ici une *action* A_i est définie par la solution apportée par l'invention (ie. l'intervention effectuée sur un objet) ; un *effet* E_i décrit les effets de l'action sur un objet spécifique (ie. conséquences de l'action) ; les *connaissances* représentent ici l'état de l'art (K_0) et le résultat de la nouvelle action ou du nouvel effet. Le modèle permet d'illustrer les critères de brevetabilité. Le premier critère, celui de la nouveauté est présenté ainsi dans le Droit :

« (1) *An invention shall be considered to be new if it does not form part of the state of the art.* (2) *The state of the art shall be held to comprise everything made available to the public by means of a written or oral description, by use, or in any other way, before the date of filing of the European patent application*” (art. 54 of the European Patent Convention). »

Le modèle vérifie donc cette condition avec le formalisme suivant :

$$(A_1, \dots, A_n \rightarrow E_1, \dots, E_n) \notin K_0$$

De plus, le modèle permet de définir un autre critère de brevetabilité, l'activité inventive, définie ainsi :

« *An invention shall be considered as involving an inventive step if, having regard to the state of the art, it is not obvious to a person skilled in the art* » (art. 56 of the European Patent Convention).

Ce critère signifie que la personne qualifiée dans l'état de l'art (PQA), ne doit pas pouvoir intuitivement et sans effort générer l'invention. Le modèle vérifie alors :

$$(A_1, \dots, A_n \rightarrow E_1, \dots, E_n) \notin PQA(K_0)$$

Enfin, en s'appuyant sur la théorie C-K, Felk *et al.* (2011) et Kokshagina *et al.* (2014) développent la méthode « C-K Invent » et soulignent que les étapes inventives pour générer un brevet s'apparentent à des partitions expansives, hors de

$PQA(K_0)$, dans l'espace C. Ces partitions expansives "significantly modify or propose new actions and effects to generate new sentences - new ideas for patent proposals" (Kokshagina et al., 2014, p. 405). Les éléments du modèle sont résumés dans la Figure 37.

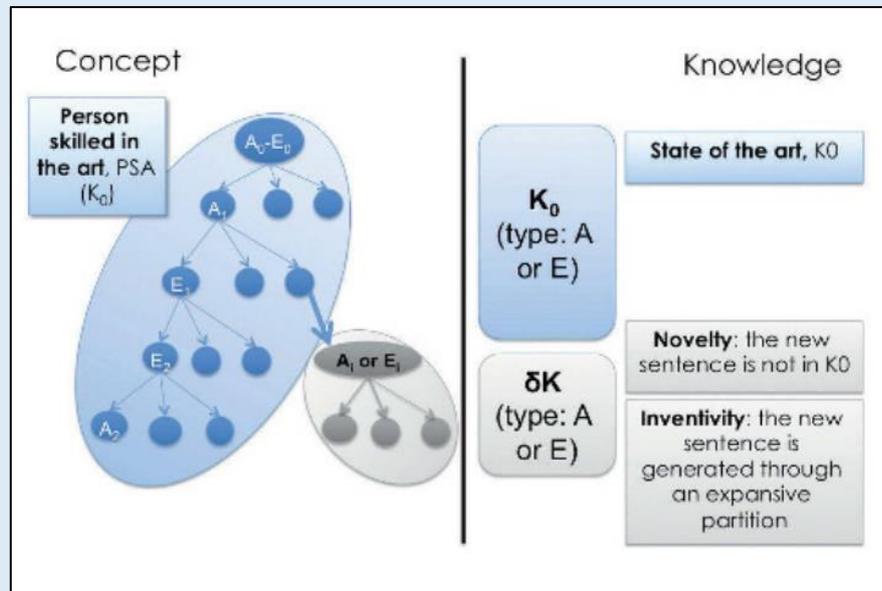


Figure 37 - Modèle C-K Invent (source: Kokshagina et al., 2014, p. 405)

Les mécanismes et les formalismes proposés dans ce modèle nous semblent ici d'intérêt pour modéliser les différents couplages, en particulier pour le concepteur industriel.

1.2.2. Les théories de la conception pour concevoir des interactions entre deux concepteurs

Dans notre cas, il nous faut modéliser les interactions entre deux acteurs : un concepteur d'un produit innovant, mais aussi un scientifique qui produit de nouvelles connaissances. Certains travaux ont permis de mettre en exergue les interactions de deux concepteurs distincts en s'appuyant sur la théorie C-K, et nous revenons ici brièvement sur ces éléments (Gillier et al., 2010 ; Gillier, Kazakçı et Piat, 2012 ; Klasing Chen et al., 2017).

Premièrement, Gillier et al. (2010) décrivent l'utilisation de la théorie C-K pour des projets d'exploration entre deux firmes distinctes. Les auteurs supposent que chaque firme dispose de son propre espace des connaissances K distinct, qui comprend toutes les compétences, technologies, informations et stratégies internes à l'organisation. Chaque firme a également son espace des concepts C distinct, qui permet de décrire la stratégie d'innovation avec les concepts de produits, de services ou les méthodologies que la firme voudrait concevoir. L'exploration dans l'inconnu va alors se dérouler en deux temps. D'abord une phase de « *matching* » (Gillier et al., 2010, p. 888) qui a pour objectif de réduire la distance entre les partenaires qui

s'échangent des parties de leurs espaces C et espaces K afin d'identifier des recoupements. Puis une phase de « *building* » (Gillier *et al.*, 2010, p. 888) où les partenaires vont générer des partitions expansives avant d'obtenir de nouveaux concepts. Pour les auteurs, l'enjeu de la co-exploration est de déterminer des concepts en rupture, d'intérêt pour les deux firmes, sur lesquels les parties vont pouvoir travailler ensemble, et appelé « concepts génériques ». Ces travaux nous permettent de mettre en exergue un mécanisme en deux temps d'interaction entre les concepteurs à partir de la théorie C-K. Les travaux sont complétés par Gillier, Kazakçı et Piat (2012) qui démontrent l'importance du développement d'un objectif commun entre les parties (ie. « *common purpose* », Gillier, Kazakçı et Piat, 2012, p. 372). Cet objectif permet de rechercher des intersections entre les C-K des deux concepteurs dans l'étape de « *matching* », ou de générer de nouveaux concepts partagés dans l'étape de « *building* ». Ainsi, la théorie C-K nous semble être une piste intéressante pour modéliser les interactions entre deux concepteurs, dans notre cas un concepteur de développement de produits, et un scientifique.

Deuxièmement, remarquons que la théorie C-K semble un cadre intéressant pour étudier les relations science – industrie. D'une part les travaux de Gillier *et al.* (2010) et Gillier, Kazakçı et Piat (2012), bien qu'ils ne se focalisent pas sur cette question, incluent dans leurs cas d'études des laboratoires de recherche issus d'OPR et des entreprises. D'autre part, les travaux de Klasing Chen *et al.* (2017) montrent comment la théorie C-K est utile pour explorer à la fois des enjeux scientifiques et industriels dans le cadre de thèses industrielles. Les auteurs s'appuient sur la théorie et montrent, à partir d'un cas d'étude, comment des outils dérivés de C-K permettent de favoriser le développement de concepts scientifiques génératifs, d'intérêt pour l'industriel (au lieu d'une logique simple de transfert).

Ainsi, au-delà de l'utilisation de la théorie C-K pour décrire la conception de produits, mobiliser cette théorie dans le cadre de couplages entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits semble prometteur. Mais cela suppose de considérer qu'il existe un « concepteur » de connaissances scientifiques nouvelles.

1.2.3. Théorie C-K et conception de connaissances scientifiques nouvelles

Ici, il nous faut démontrer comment les théories de la conception, et particulièrement la théorie C-K, pourraient permettre de définir les mécanismes cognitifs associés à la découverte scientifique. À notre connaissance, il n'existe pas de théorie décrivant précisément ce phénomène du point de vue cognitif. Pour cela, nous nous basons sur les travaux précurseurs de Hatchuel *et al.* (2013).

D'après les auteurs, le principe des découvertes scientifiques est de s'appuyer sur une méthode scientifique, c'est-à-dire une logique de modélisation. La science s'appuie donc sur des *observations* et des *modèles*, et l'enjeu des discussions scientifiques est de déterminer la validité de ces modèles, de les tester et d'étudier comment ils se comportent face à des données d'observation existantes ou expérimentales. Les auteurs établissent donc les hypothèses suivantes :

- **Observabilité** : l'objet de la modélisation scientifique X_i est observable à partir des observations x_i (et on suppose que lesdites observations ne génèrent pas l'objet).
- **Consistance et complétude** : le modèle scientifique peut s'exprimer à partir d'une fonction de consistance (ie. la qualité du raisonnement scientifique, le fait qu'il n'y ait pas de redondance, pas de contradiction), et d'une fonction de complétude (ie. la qualité de la relation entre les prédictions du modèle et les observations).
- **Existence d'une anomalie** : le modèle vise à réduire deux types d'anomalies (1) le manque de consistance du modèle et (2) l'apparition d'une nouvelle observation Y qui n'était pas prévisible dans le modèle.
- **Existence d'un observable encore inconnu** : face aux anomalies, le scientifique fait l'hypothèse qu'il existe potentiellement un objet X' observable, mais pas encore observé. L'objectif du processus scientifique est donc d'élaborer $K(X')$ qui permettrait de fournir une définition de X' et de valider ses propriétés, ou bien d'obtenir d'autres observations x' qui permettraient de confirmer l'existence de X' .

Ainsi, les travaux de Hatchuel & al. (2013) permettent de montrer que la conception d'une théorie scientifique nouvelle et la conception d'un produit nouveau appartiennent à la même classe de « problèmes ». Ce résultat est d'un intérêt majeur pour notre modèle. Cela signifie que les théories de la conception constituent un cadre unifié qui permet de discuter les processus cognitifs à l'œuvre, à la fois dans la conception de théories scientifiques nouvelles, et dans la conception de produits innovants. Ainsi, ce cadre unifié apparaît particulièrement prometteur pour discuter les couplages entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits. Cela signifie que nous pouvons envisager de modéliser à partir de la théorie C-K, des interactions entre un concepteur scientifique et un concepteur industriel.

Ainsi, cette première section nous permet de considérer les théories de la conception, et plus particulièrement la théorie C-K, comme un cadre théorique intéressant pour une approche novatrice des interactions entre activités de recherche scientifique et activités de développement

de produits nouveaux, par le recours à une analyse du raisonnement de conception. Nous nous appuyons donc sur ce cadre théorique pour modéliser les couplages entre ces deux activités.

2. Modèle formel des couplages

Dans cette section, en nous appuyant sur les théories de la conception et particulièrement la théorie C-K, nous développons un modèle formel permettant de décrire différents couplages entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits nouveaux. Nous détaillons d'abord le cadre formel de la modélisation, avant d'aborder les différents couplages possibles, puis de les discuter.

2.1. Cadre général de l'analyse

Nous présentons d'abord la logique globale du modèle à partir de la théorie C-K dont nous adoptons les formalismes, que nous supposons ici connus. Nous discutons dans un second temps de la notion de performance dans le modèle.

2.1.1. Formalisme du couplage activités de recherche scientifique – activités de développement de produits

On suppose ici une représentation simplifiée du couplage activités de recherche scientifique – activités de développement de produits par un modèle à deux acteurs désignés p et p' . D'abord, nous supposons qu'un concepteur S cherche à concevoir de nouvelles connaissances scientifiques, et un autre concepteur I cherche à concevoir de nouvelles inventions industrielles. Chaque acteur dispose de son propre espace de conception C-K, à chaque période $t = 0, 1, \dots, k$ (où $t = 0$ représente l'état initial sans couplage) soit un espace $C^{S,t}$ et un espace $C^{I,t}$, ainsi qu'un espace $K^{S,t}$ et un espace $K^{I,t}$. Nous adoptons ici les formalismes classiques de la théorie C-K et donc les opérateurs traditionnels : expansion en connaissance ($K \rightarrow K$), partitions ($C \rightarrow C$), disjonction ($K \rightarrow C$), et conjonction ($C \rightarrow K$).

Nous insistons ici sur le fait que ces deux concepteurs cherchent à concevoir des concepts de nature différente : l'un des théories nouvelles potentielles, l'autre des produits nouveaux potentiels. Ces éléments nous permettent d'établir l'Axiome 1 :

Axiome 1 : La nature des concepts des parties p est différente en ce sens que le concepteur scientifique S cherche à établir une conjonction telle que $C^S \rightarrow K^S$ où C^S est une théorie scientifique nouvelle potentielle. Réciproquement, le concepteur industriel I cherche à établir une conjonction telle que $C^I \rightarrow K^I$ où C^I est un produit nouveau potentiel.

Cet Axiome 1 nous permet de définir pour chaque période de temps t les espaces C et K des deux concepteurs :

- L'espace des concepts du scientifique $C^{S,t}$ est composé des modèles conceptuels à concevoir pour expliquer les états de la nature soit $C^{S,t} = C_1^{S,t}, \dots, C_i^{S,t}, \dots, C_n^{S,t}$;
- L'espace des concepts de l'industriel C^I est composé de nouveaux objets possibles à concevoir pour innover soit $C^{I,t} = C_1^{I,t}, \dots, C_j^{I,t}, \dots, C_m^{I,t}$;
- L'espace des connaissances du scientifique $K^{S,t}$ est composé de l'ensemble des connaissances scientifiques acquises par le scientifique, soit les outils d'observation, les modèles, les méthodologies de recherche, les observations issues de la nature ou d'expérimentations, etc. soit $K^{S,t} = K_1^{S,t}, \dots, K_i^{S,t}, \dots, K_n^{S,t}$. On note $\Delta K_{i'}^{S,t}$ les connaissances manquantes qui permettent d'opérer la conjonction $C_i^{S,t} \rightarrow K_{i'}^{S,t}$.
- L'espace des connaissances de l'industriel K^I est composé de l'ensemble des connaissances liées à la production de produits innovants, soit les méthodes de l'organisation, les expertises, les compétences, les données sur le marché, etc. soit $K^{I,t} = K_1^{I,t}, \dots, K_j^{I,t}, \dots, K_m^{I,t}$. On note $\Delta K_{j'}^{I,t}$ les connaissances manquantes qui permettent d'opérer la conjonction $C_j^{I,t} \rightarrow K_{j'}^{I,t}$.

De cet Axiome, on peut proposer une définition sur la nature particulière des concepts qui seraient potentiellement partagés entre les acteurs.

Définition : Si les concepteurs I et S partagent un même concept, du fait de l'Axiome 1 portant sur la nature différente des concepts entre concepteurs scientifiques et industriels, on qualifiera ces concepts *d'hybridés*.

Cette définition est importante puisqu'elle a trait à la préservation ou non des espaces de conception des deux acteurs. Nous traitons maintenant des performances dans le modèle.

2.1.2. Performances scientifiques et industrielles

L'enjeu de notre modèle est également d'aborder la question des performances scientifiques et industrielles dans différents types de couplage. Pour cela nous utiliserons la notion de *fixations* (pour des détails sur cette notion, voir Encadré 18 p. 208). On propose ainsi l'Axiome 2 :

Axiome 2 : La partie p est soumise à des fixations cognitives dans son espace $C^{p,t}$ c'est-à-dire qu'il existe un sous-espace $F^{p,t}$ tel que $F^{p,t} \subset C^{p,t}$. On note la fixation pour un concept i donné $F^{p,t}(C_i^{p,t}) = f_{C_i^{p,t}}$

Cet Axiome 2 s'explique par le fait que les scientifiques et les industriels peuvent être soumis à certaines fixations cognitives. L'enjeu de cette thèse n'est pas de rendre compte de l'exhaustivité des différentes sources de fixations possibles dans la littérature, mais simplement d'évoquer quelques exemples structurés et emblématiques pour attester la possibilité de ces fixations. L'objectif est ici de montrer que comme tout concepteur, le scientifique est soumis à des fixations, tout comme cela a été démontré pour la conception de produits innovants (voir par exemple, Camarda *et al.*, 2017). Plusieurs exemples sont résumés dans le Tableau 18 ci-dessous.

	Fixations scientifiques	Fixations industrielles
Facteurs économiques	Incitations des chercheurs à rester dans des champs disciplinaires préexistants, à utiliser des méthodes usuelles, des thèmes à la « mode » pour faciliter le processus de publication et la revue par les pairs, et ainsi leur réputation.	Incitations économiques des inventeurs pour utiliser les technologies de leur organisation ou satisfaire la stratégie d'innovation de l'organisation.
Facteurs sociaux	Incitations des chercheurs à traiter certains sujets de recherche (ex. éviter les sujets transdisciplinaires), ou à adopter certaines méthodologies pour être accepté dans des groupes de recherche, reconnus dans certaines disciplines par leurs pairs.	Incitations des pairs de l'inventeur pour sélectionner certaines voies d'innovation et être accepté dans le groupe d'inventeurs ou d'experts de l'organisation.
Facteurs organisationnels	Incitations reçues par les institutions qui orientent les travaux de recherche selon certains axes (grands programmes, financements, etc.)	Incitations reçues par l'organisation en termes de financement ou d'axes stratégiques pour l'innovation.
Facteurs individuels	Routines intellectuelles pour la création de concepts dans des paradigmes de solution stables	
Sources	Ding et Choi (2011), Glenna <i>et al.</i> (2011), Koppman et Leahey (2019), Salandra, Criscuolo et Salter (2021), Tartari, Perkmann et Salter (2014), Mirc, Rouzies et Teerikangas (2017)	Agogué et Le Masson (2014), Camarda <i>et al.</i> (2017), Le Masson, Weil et Hatchuel (2014), Thrane, Blaabjerg et Møller (2010), Robinson, Le Masson et Weil (2012)

Tableau 18 - Fixations scientifiques et industrielles

Cet Axiome 2 nous permet d'envisager deux conditions qui ont trait à la performance des couplages. Premièrement, en termes de performances, nous nous intéressons à « l'originalité » des concepts scientifiques et industriels. Dès lors, on peut poser la condition P-1 suivante :

Condition P-1 : La performance scientifique ou industrielle est définie ici de telle sorte que :

- a) L'acteur p est capable de générer une conjonction pour un concept i donné qui devient une connaissance nouvelle j soit $C_i^p \rightarrow K_j^p$ (ie. C_i^p est vrai dans K^p)
- b) C_i^p est en dehors de la zone de fixation, soit $C_i^p \notin F^p$ (ainsi $F^p(C_i^p) = \emptyset$)

On notera ici que la performance est traitée ici de façon simplifiée, par une logique binaire : le concept est ou non dans la zone de fixation. On suppose également **qu'il n'y a pas de fixations dans l'espace des connaissances**. Ce choix se justifie par le fait qu'on suppose que l'accès à de nouvelles connaissances est inhérent à l'exploration des concepts : les fixations en C créent des contraintes en K sans qu'il soit nécessaire de les spécifier directement en K . Raffiner le modèle en ajoutant des fixations plus sophistiquées en K constituerait une piste de travail post-thèse. De plus, compte tenu de l'Axiome 1 concernant la nature des concepts, la performance scientifique et industrielle doit aussi être de telle sorte que l'on respecte la condition P-2 :

Condition P-2 : La performance scientifique ou industrielle est définie ici de telle sorte que le concept C_i^p sur lequel s'opère la conjonction est de nature p , c'est-à-dire qu'il ne s'agit pas d'une hybridation.

La condition P-2 permet de s'assurer que pour un axe de performance donné, la conjonction répond bien aux exigences de la communauté d'appartenance de p .

Pour conclure cette sous-section, on peut donc représenter la situation initiale sous forme de diagramme C-K à $t = 0$ (Figure 38). On notera que cette modélisation reprend la logique proposée par Kokshagina *et al.* (2014) et Felk *et al.* (2011) pour les brevets (voir Encadré 19 p. 208), en la généralisant et en l'adaptant à notre situation.

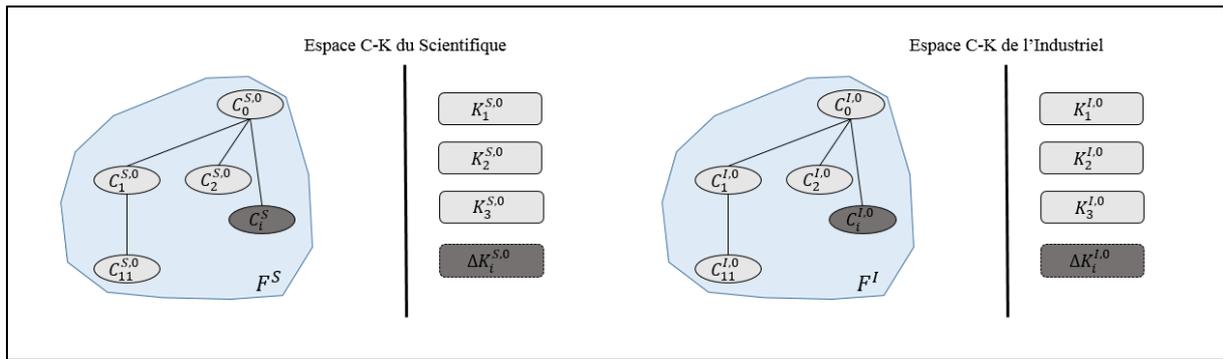


Figure 38 - Espaces C-K scientifique et industriel. Situation initiale

Il nous faut maintenant discuter les interactions entre les deux acteurs.

2.1.3. Logique d'interaction entre les acteurs

Pour décrire les interactions entre les deux concepteurs, nous nous appuyons sur la littérature et donc ici, sur la logique du modèle dit *matching – building* (Gillier *et al.*, 2010 ; Gillier, Kazakçı et Piat, 2012). Il faut souligner ici que le cadre *matching – building* est proposé par ses auteurs dans un contexte tout autre : la co-exploration, pour des activités de développement uniquement soit des cas où la problématique de la préservation des espaces de conception ne se pose pas. Ici, nous empruntons seulement aux auteurs la logique de phases de *matching* et de *building*. Nous adoptons toutefois ces phases à un contexte très différent : celui des relations science – industrie. Malgré cette focale sur un contexte particulier, nous généralisons finalement le modèle proposé initialement par Gillier *et al.* (2010) et Gillier, Kazakçı et Piat (2012) en développant des formalismes spécifiques (voir Axiome 3 ci-dessous).

Nous postulons donc que les interactions entre les concepteurs se déroulent par étapes avec deux grandes phases telles que décrites dans l'Axiome 3 ci-dessous.

Axiome 3 : L'interaction entre les concepteurs p et p' se déroule systématiquement en deux temps. D'abord une phase de *matching* où les concepteurs identifient des interactions potentielles entre leurs espaces C et K. Dans le cas où aucune interaction n'est trouvée c'est-à-dire que $C^p \cap C^{p'} = \emptyset$ et $K^p \cap K^{p'} = \emptyset$, alors les acteurs s'engagent dans une phase de *building* qui conduit chaque acteur à (par exemple pour p) :

- un *k-reordering* ce qui permet de dériver un supplément de connaissances $\varepsilon K^{p,0}$ avec $\varepsilon > 1$;

- un échange bidirectionnel de connaissances de telle sorte que l'acteur p va absorber $\vartheta K^{p',0}$ avec $\vartheta \in]0; 1]$, soit une part des connaissances de l'autre partie.

Pour une partie p , l'espace K est donc tel que : $K^{p,1} = K^{p,0} + \varepsilon K^{p,0} + \vartheta K^{p',0}$.

Cet Axiome 3 nous permet donc d'envisager les interactions entre les deux concepteurs dans notre situation. Rappelons que le *k-reordering* consiste en une réorganisation des connaissances de l'acteur du fait de la collaboration, ce qui l'amène à s'engager dans un processus de développement de connaissances ($K \rightarrow K$).

Pour définir différents couplages, dans les sous-sections suivantes, nous partons d'une situation simplifiée à partir de l'étape de *matching*. Nous montrons dans un second temps que les couplages proposés dans cette étape sont des cas particuliers d'une approche plus complexe à partir de l'étape de *building*. Les différents modèles proposés seront discutés dans la sous-section suivante.

2.2. Etape 1 - *Matching*

Dans la première étape d'interaction, les parties cherchent à déterminer de possibles recouvrements dans leurs espaces C-K. On suppose ici trois situations distinctes pour les deux parties p et p' :

2.2.1. Cas M-1 : *Couplage séquentiel*

On suppose qu'il y a **intersection sur les connaissances à acquérir, c'est-à-dire des connaissances ou concepts partagés entre les acteurs**. Ainsi, la partie p cherche à acquérir des connaissances pour opérer une conjonction d'un concept $C_i^{p,0}$ qui nécessite des connaissances supplémentaires $\Delta K^{p,0}$. Or, s'il y a intersection sur les connaissances à acquérir cela suppose qu'il existe $\Delta K^{p,0} \subset K^{p',0}$ ce qui signifie que la partie p' dispose immédiatement de la connaissance requise pour opérer la conjonction. Ainsi, le modèle M-1 respecte la condition suivante :

Condition M-1 : Il existe $\Delta K^{p,0}$ tel que $C_i^{p,0} \rightarrow K_j^{p,0}$ et la proposition $(\Delta K^{p,0} \subset K^{p',0})$ est vraie.

Dans ce modèle, il n'y a aucun effet sur les fixations des deux acteurs puisque par définition $C_i^{p,0} \subset F^{p,0}$ et le transfert n'engendre aucun effet sur p' . Le transfert résulte en ce que :

$$K^{p,1} = K^{p,0} + \Delta K^{p,0} \text{ où } \Delta K^{p,0} = \vartheta K^{p',0} \text{ avec } \forall \vartheta \in [0; 1]$$

Ici ϑ correspond à la part des connaissances de p' qui est absorbée par p . On obtient ainsi la conjonction $C_i^{p,0} \rightarrow K_i^{p,2}$.

Schématiquement, on obtient ici pour $p = S$, $p' = I$ et $K_3^{S,0} = \Delta K_i^{I,0}$ la procédure telle que décrite dans la Figure 39 ci-dessous.

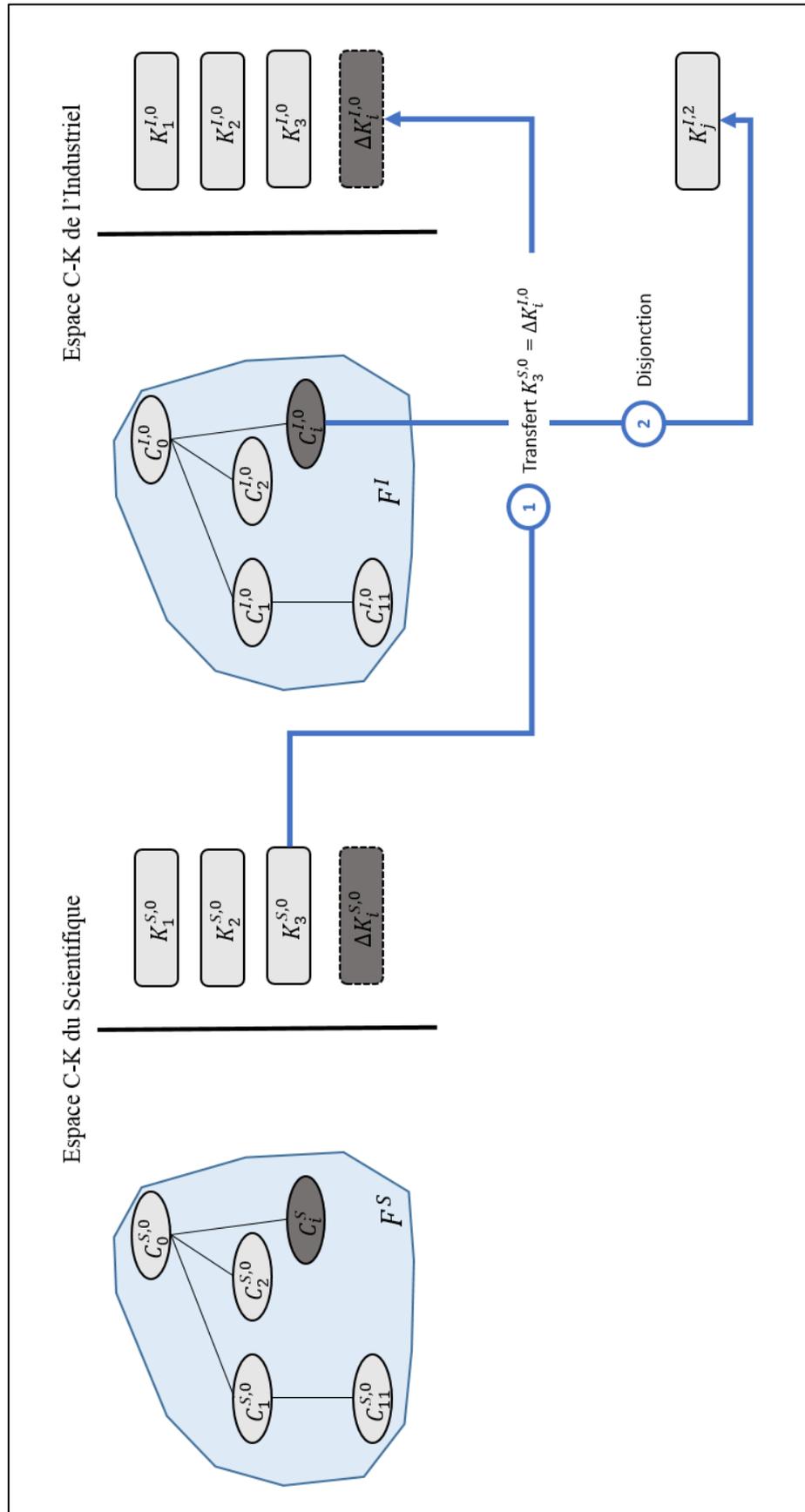


Figure 39 - Modèle M-1. Exemple

On parlera ici de *couplage séquentiel*, car la connaissance est disponible en amont, fruit d'un travail de recherche scientifique ou de développement de produit. Elle est transférée dans une seconde étape à une autre partie, élément décrit ici. Soulignons qu'il y a tout de même une logique de double impact : d'abord un type d'impact (industriel ou scientifique) avec la création de la connaissance en amont sans lien entre les parties, puis son transfert qui va générer l'autre type d'impact. On pourrait imaginer que les performances industrielles soient renforcées en raffinant le modèle, dans le cas où l'industriel aurait proposé un concept en dehors sa zone de fixation, et que la connaissance scientifique est transférée pour opérer la conjonction.

2.2.2. Cas M-2 : Couplage hybridé

On suppose ici qu'il y a **intersection de concepts**. Ici la partie p cherche à concevoir un nouveau concept $C_i^{p,0}$ qui nécessite des connaissances supplémentaires $\Delta K^{p,0}$. Or, il existe $C_i^{p,0} \subset C_j^{p',0}$ soit $C_i^{p,0} = C_j^{p',0}$ ce qui signifie que les deux parties souhaitent explorer un même concept. Formellement, le modèle M-2 respecte la condition suivante :

Condition M-2 : Il existe $C_i^{p,0}$ tel que la proposition $(C_i^{p,0} \subset C_j^{p',0})$ est vraie, soit $C_i^{p,0} = C_j^{p',0}$ deux concepts identiques.

D'après l'Axiome 2, ces concepts sont dans les zones de fixations de chacun des acteurs. On a donc les fixations suivantes :

$$(C_i^{p,0} = C_j^{p',0}) \subset F^{p,0} \text{ et } (C_i^{p,0} = C_j^{p',0}) \subset F^{p',0}$$

Les parties vont collaborer ensemble pour produire $\Delta K^{p,0} = \Delta K^{p',0}$ de telle sorte que $\Delta K^{p,0} = \mu K^{p,0} + \pi K^{p',0}$ avec $\mu, \pi > 1$, où μ et π représentent les connaissances supplémentaires acquises par les parties et mises en commun pour produire ΔK^0 . On obtient ainsi $K^{p,1} = (\mu K^{p,0} + \pi K^{p',0}) + K^{p,0}$ ce qui permet d'obtenir les conjonctions identiques $C_i^{p,0} \rightarrow K_i^{p,2}$ et $C_j^{p',0} \rightarrow K_j^{p',2}$.

En termes de performance, soulignons que la condition M-2 ne respecte pas la condition P-2 : les concepts sont similaires et donc hybridés. De plus, le couplage engendre un effet particulier sur les fixations. Par exemple, pour la partie p , la fixation est définie comme suit où β représente la part des fixations de l'autre partie qui sont absorbées :

$$F^{p,1}(C_i^{p,1}) = f_{C_i^{p,0}} + \beta f_{C_j^{p',0}} \text{ avec } \beta \in]0; 1]$$

Cela signifie que la probabilité de générer ultérieurement une nouvelle partition $C_{ik}^{p,2}$ dépendante de $C_i^{p,1}$ en dehors de la zone de fixation est particulièrement faible, soit formellement la probabilité P telle que $P((C_i^{p,1} \rightarrow C_{ik}^{p,2}) \notin F^{p',2})$ est faible. On peut considérer ici que cette probabilité est une fonction telle que :

$$X(f_{C_i^{p,0}}, f_{C_i^{p',0}}, \beta) \text{ avec } \frac{dX}{df_{C_i^{p,0}}} < 0, \frac{dX}{df_{C_i^{p',0}}} < 0 \text{ et } \frac{dX}{d\beta} < 0$$

Ainsi, plus les fixations initiales des deux parties sont fortes, et plus l'absorption de la fixation de l'autre partie est forte, plus les fixations post-collaboration seront fortes. On parlera alors de **renforcement des fixations croisé**.

Schématiquement, pour $C_3^{S,0} = C_{11}^{I,0}$ on obtient la procédure telle que décrite dans la Figure 40 ci-dessous.

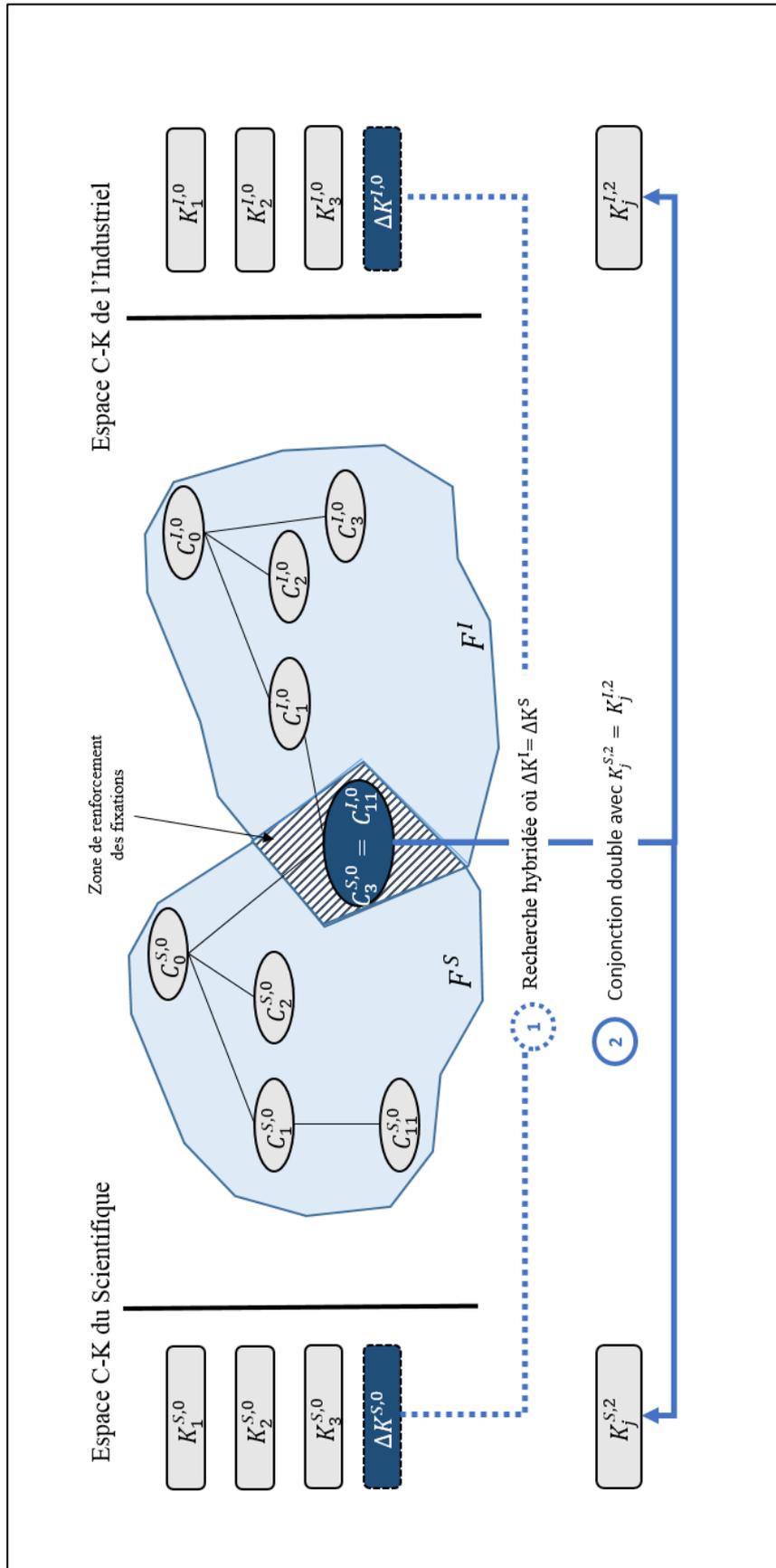


Figure 40 - Modèle M-2 : Exemple

2.2.3. Cas M-3 : Pas de matching

On suppose qu'il n'y a pas d'intersection immédiate soit formellement : $\Delta K^p \not\subset K^{p'}$ ou $C_i^p \not\subset C^{p'}$. On passera dès lors à la phase 2 de *building*.

Ainsi, nous avons présenté trois cas particuliers : le couplage séquentiel, le couplage hybridé, ou aucun *matching*. Nous présentons dès lors la phase de *building* et montrons que les cas M1 et M2 sont en fait des cas particuliers d'une situation plus complexe de *building*.

2.3. Étape 2 – Building

On suppose ici que la phase 1 de *matching* n'a pas conduit à l'identification d'intersections entre les C-K des deux acteurs. Les acteurs s'engagent alors dans un échange bidirectionnel de connaissances afin de collecter des informations sur les C-K de leurs partenaires. Par exemple ici, Gillier, Kazakçı et Piat (2012) indiquent que cette phase est “*an opportunity for partners not only to expand their concept and knowledge spaces but, more interestingly, to revisit them*” (Gillier, Kazakçı et Piat, 2012, p. 386). Ainsi, dans leurs échanges, les acteurs vont réorganiser leurs connaissances (logique de *k-reordering*, Le Masson, Weil et Hatchuel, 2017).

Formellement, cela signifie que les parties p et p' procèdent à la fois à un *k-reordering* et à un échange bidirectionnel de connaissances (voir Axiome 3). Schématiquement, on obtient donc la situation suivante (Figure 41) :

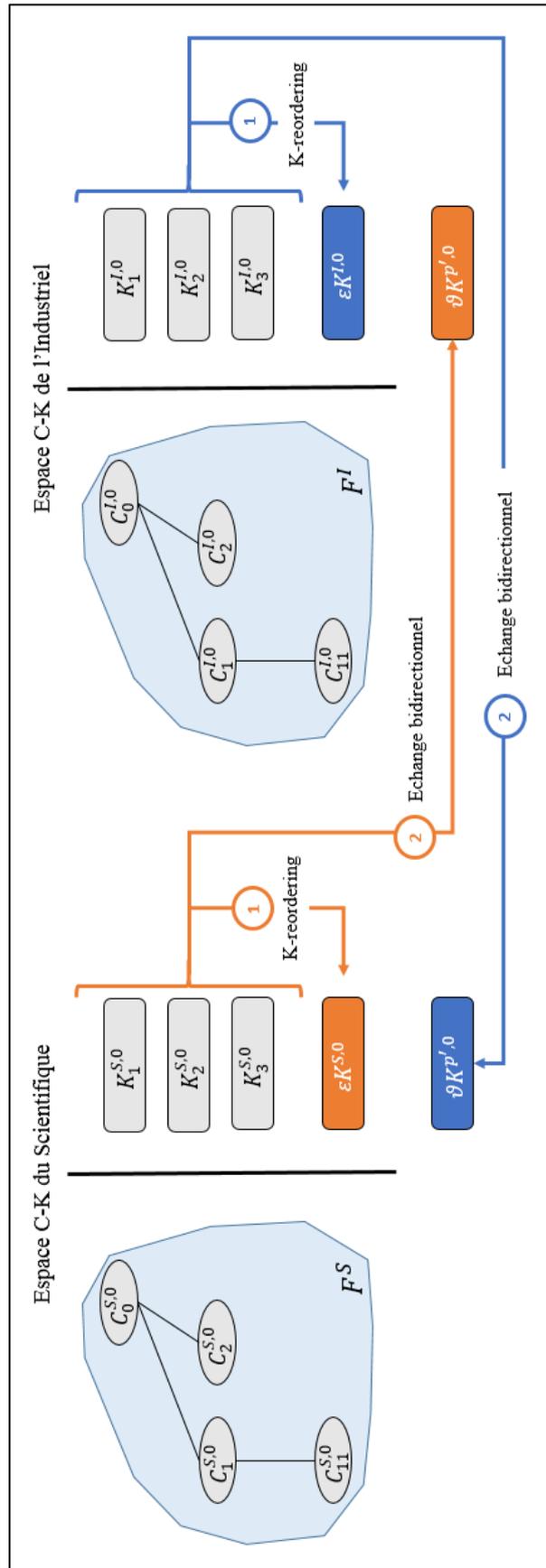


Figure 41 - Démarrage de la phase de *building*

Cet Axiome nous amène à discuter d'un second élément : la volonté ou non des parties à rechercher des intersections dans leurs espaces C et K dans le cadre de la collaboration. Cela nous amène à poser deux conditions :

Conditions : Préservation de l'indépendance des espaces de conception

- **Condition B-1** : les acteurs ne préservent pas l'indépendance de leurs espaces de conception, et ont pour objectif de développer des intersections mutuellement avantageuses entre leurs espaces C-K, favorisant l'hybridation et/ou le transfert.
- **Condition B-2** : les acteurs préservent l'indépendance de leurs espaces de conception, et ont pour objectif de développer des concepts qui leur sont propres, ce qui implique d'éviter les intersections et de ne pas entraîner d'hybridation.

Deux situations sont alors possibles en fonction de ces conditions : soit il y a une volonté de rechercher des intersections (cas B-1), soit il y a volonté de préserver les espaces de conception séparés (cas B-2).

2.3.1. Cas B-1 : Échanges pour favoriser des intersections.

Dans ces couplages, on suppose que la condition B-1 est vraie, c'est-à-dire que les acteurs souhaitent travailler ensemble sur un concept ou une connaissance d'intérêt mutuel. Deux cas sont alors possibles : soit il y a intersection sur les connaissances, soit il y a intersection sur les concepts.

- **Sous Cas B-1.1 – intersection de connaissances :**

Soit le *k-reordering* permet de générer une expansion de connaissance $\varepsilon K^{p,0}$ qui intersecte un $\Delta K^{p',0}$, une « demande » de connaissance associée à un concept $C_j^{p',0}$ de l'autre partie. Dès lors, on revient au modèle M-1 *couplage séquentiel*. Il n'y a donc aucun effet ici sur les fixations, bien que la partie qui transfère à bénéficier d'apprentissages liées au *k-reordering* et à l'échange bidirectionnel de connaissances soit : $\varepsilon K^{p,0} + \vartheta K^{p',0}$.

Ici le cas M-1 apparaît donc comme un cas particulier, le cas général étant le cas B-1.1 : on parlera dès lors de *classe des couplages séquentiels*.

- **Sous Cas B-1.2 – intersection de concepts :**

Soit la connaissance acquise $K^{p,1}$ issue du *k-reordering* et de l'échange de connaissances bidirectionnel favorise une disjonction de telle sorte que $K^{p,1} \rightarrow C_i^{p,1}$, et le concept intersecte l'espace des concepts de l'autre partie soit $C_i^{p,1} \subset C^{p',1}$. Plusieurs cas sont alors possibles en fonction des possibles sorties de la zone de fixation :

- 1) Soit les disjonctions n'ont conduit à aucune sortie des zones de fixations, on a donc $(K^{p,1} \rightarrow C_i^{p,1}) \subset F^{p,1}$ et $(K^{p',1} \rightarrow C_j^{p',1}) \subset F^{p',1}$: on revient à la situation du modèle hybridé M-2.
- 2) Soit les disjonctions conduisent un acteur à sortir de sa zone de fixation, on a donc par exemple : $(K^{p,1} \rightarrow C_i^{p,1}) \not\subset F^{p,1}$ et $(K^{p',1} \rightarrow C_j^{p',1}) \subset F^{p',1}$. L'effet sur les fixations est alors limité puisque du fait de la recherche d'intersections, ce nouveau concept est inclus dans l'espace des fixations de l'autre partie soit $C_i^{p,1} \subset F^{p',0}$. La fixation de l'autre partie apparaît alors comme une *force de rappel des fixations* et il y a bien hybridation des natures des concepts. La fixation est donc telle que : $F^{p,1}(C_i^{p,1}) = \beta f_{C_j^{p',1}}$ avec β la part des fixations de l'autre partie absorbée.
- 3) Soit les disjonctions conduisent les deux acteurs à sortir de la zone de fixation, on a donc : $(K^{p,1} \rightarrow C_i^{p,1}) \not\subset F^{p,1}$ et $(K^{p',1} \rightarrow C_j^{p',1}) \not\subset F^{p',1}$. Toutefois, même si les fixations sont dépassées, nous restons dans un modèle hybridé ce qui vient limiter les performances.

À titre d'illustration pour le modèle B-1-2, dans le cas où les disjonctions ne conduiraient à aucune sortie des zones de fixations, on obtient la Figure 42 ci-après. On notera ici que le modèle M-2 de couplage hybridé apparaît comme un cas particulier possible du modèle B-1-2 : on parlera alors de *classe des couplages hybridés*.

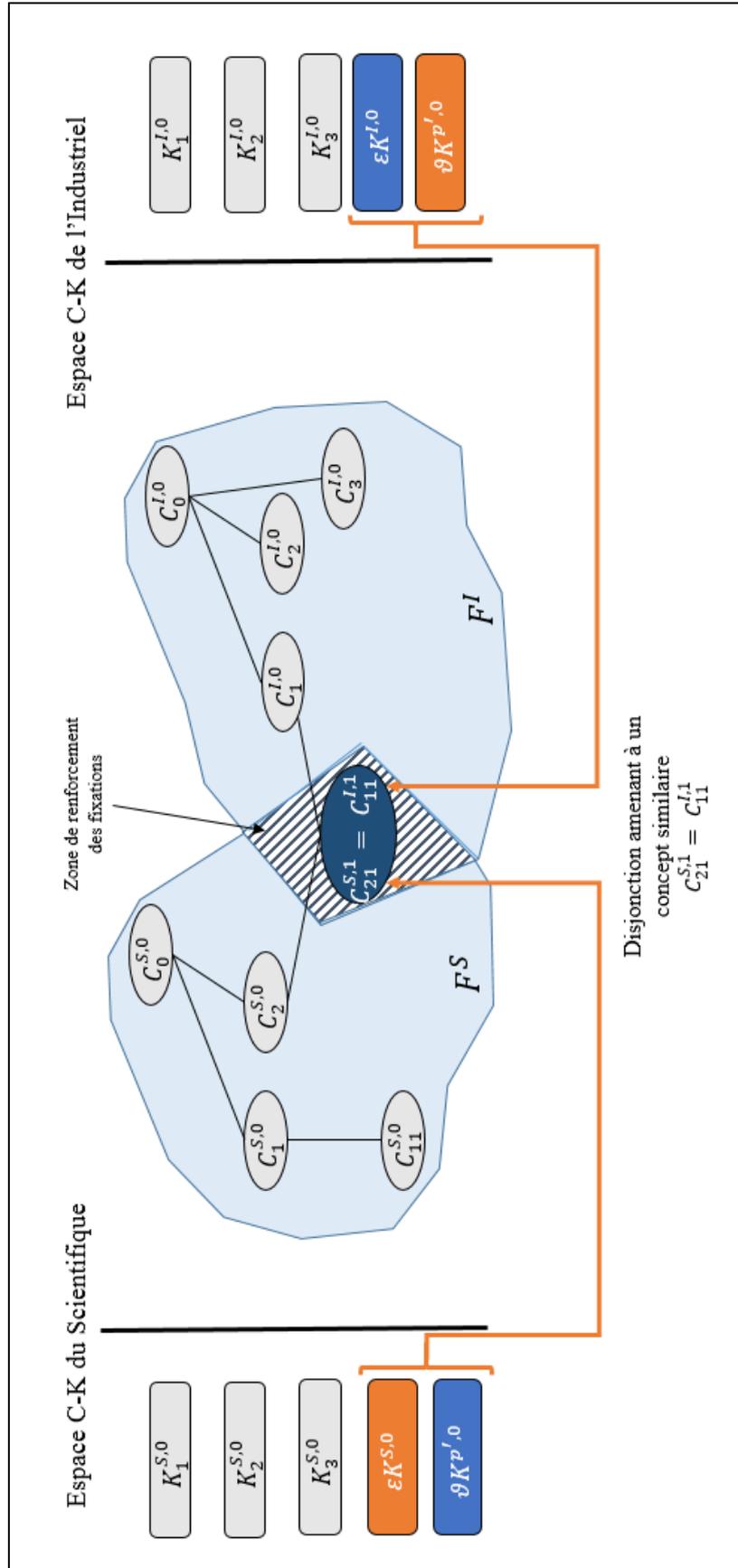


Figure 42 - Modèle B-1-2 / Cas 1. Exemple

2.3.2. Cas B-2 : Modèle à double impact simultané (ie. préservation des espaces de conception)

Dans ce modèle de couplage, il n'y a pas d'hybridation : les concepts scientifiques restent des théories scientifiques potentielles, les concepts industriels restent des concepts de produits potentiels. Par ailleurs, on suppose que les parties continuent de s'engager dans des échanges bidirectionnels de connaissances et le couplage se fait en deux temps :

- 1) **Temps 1** : sur la base du *k-reordering* et des connaissances absorbées dans le cadre de l'échange bidirectionnel, on obtient une disjonction $K^{p,1} \rightarrow C_i^{p,1}$ donnant lieu à une conjonction $C_i^{p,1} \rightarrow K_i^{p,2}$. L'avantage ici est qu'il n'y a pas d'hybridation, et que la fixation est uniquement celle du concepteur p (ie. pas de renforcement des fixations). Ainsi la probabilité de sortir de la zone de fixation est telle que $P((C_i^{p,1} \rightarrow K_i^{p,2}) \notin F^{p,1})$ est une fonction qui dépend du caractère original de $\varepsilon K^{p,0} + \vartheta K^{p',0}$ par rapport aux connaissances de la partie p . On postule ici que la condition suivante est respectée soit la condition B-2.a.

Condition B-2.a : dans le modèle à double impact simultané, la connaissance supplémentaire acquise par la partie p en période 1 respecte la condition suivante : $(\varepsilon K^{p,0} + \vartheta K^{p',0})$ est telle que $(K_i^{p,1} \rightarrow C_i^{p,1}) \notin F^{p,1}$ et $(C_i^{p,1} \rightarrow K_i^{p,2})$ est vraie dans K^p

- 2) **Temps 2** : ici il y a une volonté de ne pas créer d'intersections. Ainsi, les partenaires étant toujours dans un processus d'échanges mutuels, la nouvelle connaissance générée par la partie p est absorbée par la partie p' soit formellement : $K^{p',2} = K^{p',1} + \vartheta'' K_i^{p,2}$. Or, ici on obtient donc une nouvelle disjonction $K_j^{p',2} \rightarrow C_j^{p',2}$ donnant lieu à une conjonction pour ladite partie $C_j^{p',2} \rightarrow K_k^{p',3}$. Ainsi la probabilité de sortir de la zone de fixation est telle que $P(C_i^{p,1} \rightarrow K_i^{p,2}) \notin F^{p,2}$ est une fonction qui dépend du caractère original de $(\varepsilon' K^{p',0} + \vartheta' K^{p',0}) + \vartheta'' K_i^{p,2}$ par rapport aux connaissances de la partie p' . On peut donc établir le postulat B-2.b.

Condition B-2.b : dans le modèle à double impact simultané, la connaissance supplémentaire acquise par la partie p' en période 2 respecte la condition suivante : $(K^{p',2} = K^{p',1} + \vartheta'' K_i^{p',2})$ est tel que $(K_j^{p',2} \rightarrow C_j^{p',2}) \notin F^{p,2}$ et $(C_j^{p',2} \rightarrow K_k^{p',3}.)$ est vraie dans $K^{p'}$

Schématiquement, on obtient la Figure 43 suivante. Ces éléments nous permettent une observation : la connaissance $\vartheta'' K_4^{S,2}$ dans l'exemple, qui est absorbée par la partie I après la logique de disjonction / conjonction par la partie S , est une « nouvelle connaissance » pour I . Toutefois, elle provient de $\vartheta K^{I,0}$ issue de l'échange bidirectionnel de connaissances. C'est donc une connaissance initialement proposée au concepteur scientifique par le concepteur industriel qui lui revient, mais sous une forme différente : elle a des propriétés supplémentaires, elle a été « enrichie » lors de son traitement par le scientifique. Nous appellerons ce phénomène *l'indépendantisation de la connaissance*.

Indépendantisation de la connaissance : dans le modèle de couplage à double impact simultané, à l'issue du processus, la connaissance absorbée par p' et issue de la conjonction de p soit $(\vartheta'' K_i^{p',2})$ est la résultante d'une connaissance initiale de $K^{p',0}$, qui a été enrichie par la partie p dans le cadre de la relation. Cette connaissance absorbée a donc été rendue indépendante de la base de connaissance de p' .

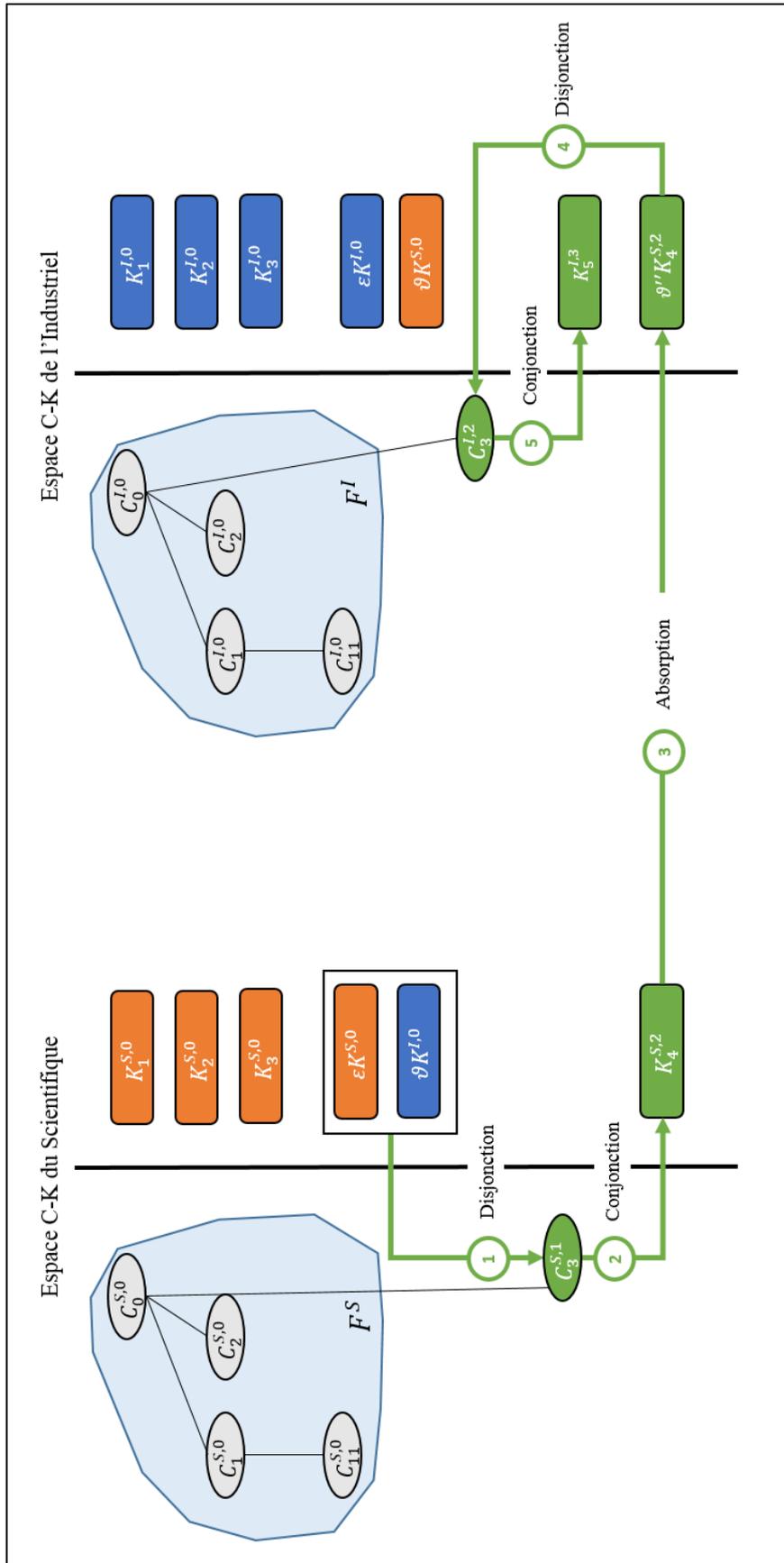


Figure 43 - Couplage à double impact simultané

Ainsi, nous achevons la présentation du modèle formel. Dans la sous-section suivante, nous discutons les trois types de couplages proposés : la *classe des couplages séquentiels*, la *classe des couplages hybridés* et le *couplage à double impact simultané*.

2.4. Discussion et implications du modèle formel :

Nous discutons ici successivement les trois types de couplages présentés dans le cadre du modèle formel.

2.4.1. Classe des couplages séquentiels

Nous débutons notre analyse par une discussion sur la classe des *couplages séquentiels*. Dans ce type de couplage, l'enjeu est d'obtenir une intersection sur les connaissances à acquérir. Soit elle est une donnée d'entrée (cas particulier M-1), soit cette intersection est construite (cas général B1-1). Ici, l'effort pour mener à bien la conjonction est lié principalement à l'effort d'absorption ϑ opéré par la partie p de telle sorte que $\Delta K^{p,0} = \vartheta K^{p',0}$. On considère ici qu'il y a double impact : la connaissance qui sera transférée est le résultat d'un travail industriel ou scientifique antérieur à la relation (ie. premier impact), et qui est réalisé sans aucun lien entre les parties. Le transfert conduira à générer le mécanisme de conjonction pour l'autre partie (ie. second impact).

- **Illustrations des couplages séquentiels :**

Nous pouvons illustrer le cas au travers de deux situations distinctes, selon que la partie p est un concepteur industriel ou scientifique.

- Concept industriel et connaissance scientifique transférée :

Dans un premier cas, le concept sur lequel on cherche à opérer une conjonction est industriel, et c'est une connaissance scientifique (préexistante) qui est transférée du scientifique vers l'industriel dans cet objectif.

Potentiellement, la connaissance transférée est particulièrement en rupture. Prenons par exemple le cas du graphène. Un concept innovant de produit pourrait par exemple être « *une chaussure de trail avec une semelle plus résistante* ». Ici, nous sommes bien dans un concept classique d'un industriel de la chaussure de sport : il ne s'agit pas d'un concept chimérique, l'innovation serait plutôt incrémentale sans sortie de la zone de fixation. Or, pour réaliser une conjonction, différents matériaux peuvent être utilisés et par exemple, le graphène. Ainsi, la

société inov-8 a proposé une nouvelle gamme de ses chaussures phares, la X-TALON G 235 (voir Figure 44), avec une semelle enrichie en graphène en s'appuyant sur une collaboration avec l'Université de Manchester, là même où a eu lieu la découverte scientifique de la synthèse de ce nouveau matériau aux propriétés de résistance particulièrement novatrices⁵⁹. On retrouve ici un écho fort au modèle linéaire traditionnel : dans un premier temps, la recherche fondamentale est réalisée sans lien avec l'industrie, dans le laboratoire de l'OPR. Dans un second temps seulement se pose la question de son transfert vers l'industrie. Soulignons que le modèle linéaire est enrichi ici par une approche cognitive, en tenant compte de l'exploration dans l'inconnu, ce qui nécessite le recours à un vocable spécifique, d'où la notion de couplage séquentiel.

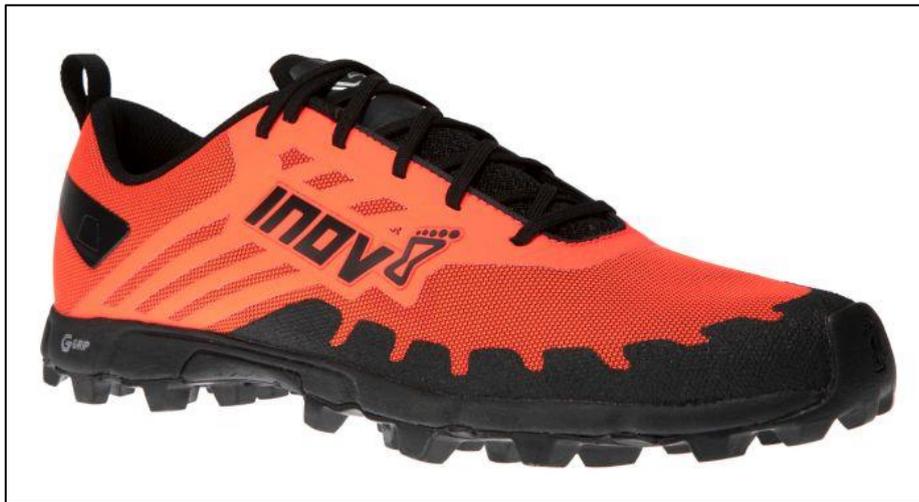


Figure 44 - Chaussure X-Talon G 235

○ Concept scientifique et connaissance industrielle transférée :

Dans un second cas, le concept sur lequel on cherche à opérer une conjonction est scientifique, et c'est une connaissance industrielle (préexistante) qui est transférée de l'industriel vers le scientifique dans cet objectif.

Ici, c'est une connaissance de l'industrie qui va permettre d'opérer une conjonction sur un modèle théorique. On peut par exemple discuter la découverte du Boson de Higgs : le concept théorique existe, mais il manque au scientifique la capacité de tester le modèle et d'obtenir des observations empiriques qui permettraient de valider l'hypothèse. Cet élément amène à discuter de la répartition des équipements d'observation entre OPR et industriels.

⁵⁹ <https://www.runnersworld.com>

- **Performances des couplages séquentiels :**

Pour discuter les performances de la classe des couplages séquentiels, pour simplifier notre approche, nous débutons notre analyse à partir du modèle simplifié M-1.

Dans le couplage M-1, la connaissance apportée « répond » à un concept préexistant dont on suppose qu'il est naturellement en zone de fixation (Axiome 2) : il n'y a aucun effet de sortie de la zone de fixation, donc des performances limitées. Dans le cas des chaussures par exemple, bien que l'innovation soit présentée comme innovante, il n'y a pas rupture de l'identité de l'objet : c'est une chaussure classique avec des performances améliorées, ce qui la rend comparable à une innovation incrémentale dans un régime de conception réglée (Le Masson, Weil et Hatchuel, 2014). Nous discutons ici plusieurs implications.

Premièrement, on remarquera que dans le couplage séquentiel M-1, il n'y a pas d'échanges de connaissances bidirectionnels. Au contraire, l'échange est unidirectionnel, vers la partie qui a un besoin de ΔK^P . Pour prendre le cas d'un scientifique qui répondrait à un besoin de ΔK^P industriel, cela signifie très peu d'exposition aux connaissances et expertises de l'industriel. À l'inverse, et au regard de la littérature sur l'absorption (voir Chapitre 2), il est probable qu'un effort du scientifique soit nécessaire pour transférer cette connaissance probablement tacite et permettre de favoriser son absorption par l'industriel. Cet effort du scientifique se fait alors à connaissance constante. Or, compte tenu des métriques de performance scientifiques (par exemple le « *publish or perish* »), il semble y avoir ici de très maigres incitations à ce que le scientifique souhaite s'engager dans un tel transfert. Sauf à supposer soit que le scientifique est capable de dériver de ce transfert une manne financière conséquente lui permettant de financer d'autres recherches pour produire ultérieurement de la connaissance originale ; soit que ce dernier est intéressé personnellement par l'utilisation de ses travaux (logique que l'on pourrait qualifier d'altruisme pour l'impact industriel).

Deuxièmement, on observe que la nouvelle connaissance produite par le scientifique, aussi radicale soit elle du point de vue scientifique, doit répondre à des « trous de connaissances » identifiés par l'industrie. Le cas du graphène est ici particulièrement illustratif : il s'agit d'une découverte fondamentale parmi les plus radicales du 21^{ème} siècle. Pourtant, son application dans le cas des chaussures de trail semble découler d'un régime de conception réglé de la chaussure. En termes d'organisation de la science, dans ces modèles de couplage, cela signifie qu'il est nécessaire de travailler à l'identification des « trous de connaissances » industriels auxquels pourraient répondre certaines connaissances scientifiques. Pourtant, sans accès privilégié aux

attentes de l'industrie et sans connaître auparavant la composition de son C-K, cette logique semble à première vue relever d'un appariement particulièrement chanceux.

Troisièmement, l'originalité du modèle tient ici dans l'inversion possible du sens de la relation : l'industrie peut répondre à des besoins théoriques de la science par la production, par exemple, de nouveaux moyens d'observation. Nous avons évoqué le Boson de Higgs, mais nous aurions aussi pu évoquer l'exemple plus ancien de l'invention de la lunette pour permettre à Galilée de montrer que la terre tourne, ou les exemples plus récents de fournisseurs d'instruments (DNA Script par exemple, fournisseur d'imprimantes 3D pour l'ADN⁶⁰). On notera que cette logique de couplage semble toutefois relativement absente des débats contemporains, bien qu'il puisse exister un intérêt à creuser cet effet.

On peut raffiner notre analyse, car M-1 est un cas particulier d'une situation plus générale (B1-1). Pour reprendre l'exemple ci-dessus, l'Université de Manchester a probablement dû échanger des connaissances en amont avec inov-8 et opérer un *k-reordering* (et donc produire $\varepsilon K^{p,0}$) afin d'identifier et d'adapter la brique de connaissance qui permettait de répondre au $\Delta K^{p'}$ de inov-8. Ainsi, outre le cas archétypal M-1, le couplage séquentiel ne se fait pas nécessairement à iso-connaissances pour la partie qui transfère une connaissance : elle peut accéder à des connaissances nouvelles liées à l'échange bidirectionnel et au *k-reordering*. La question qui se pose alors est de savoir si les connaissances supplémentaires acquises ($\varepsilon K^{p,0} + \vartheta K^{p',0}$) seraient suffisantes pour permettre, à la fin du projet, de générer une disjonction en dehors de la zone de fixation. En d'autres termes, est-ce que les connaissances nouvelles auxquelles a accès le scientifique dans le cadre d'un objectif de transfert sont suffisantes pour créer une théorie radicalement nouvelle ? Le cas ne semble pas impossible, mais peu plausible, tant l'objectif d'application est fort. Cela ne nécessite pas une profonde remise en question des connaissances acquises ni un échange bidirectionnel intense entre les parties. Par ailleurs, si cet effet était possible, cela suppose qu'il aurait lieu en dehors du projet collaboratif, dans un second temps et sans effet pour l'autre partie. Il y a dès lors très peu d'incitations des parties à favoriser des échanges bidirectionnels de connaissances clés ou en rupture.

Ainsi, dans la classe des couplages séquentiels, la possibilité que le scientifique par exemple, accède à des connaissances particulièrement novatrices de l'industriel, et que cet accès lui permette une sortie de zone de fixation pour ses futures recherches, existe. Pourtant, ce cas

⁶⁰ « DNA Script collabore avec GE Research », IndustriePharma, ed. 03/03/2021

semble rare et le modèle tend à se rapprocher de M-1. On peut également se questionner sur les leviers pour favoriser la performance des couplages séquentiels.

- **Leviers de performance dans les couplages séquentiels :**

Nous pouvons proposer ici des leviers pour renforcer la performance des couplages séquentiels.

Premièrement, il serait envisageable de promouvoir des outils dédiés aux scientifiques pour rechercher des concepts industriels (et réciproquement) auxquels leurs connaissances scientifiques nouvelles pourraient répondre. La mise en place de ces outils ne peut se faire qu'au coût d'un accroissement des incitations pour les chercheurs à s'engager dans de telles activités : potentiellement financières, mais aussi culturelles (ie. nature de la reconnaissance par les pairs).

Deuxièmement, les couplages séquentiels invitent à promouvoir une productivité scientifique massive, en supposant que statistiquement, le nombre d'intersections possibles avec des besoins industriels (ie. « trous de connaissances identifiés ») augmente, bien que les appariements deviennent alors plus coûteux. On peut sans doute faire ici un parallèle avec la logique de l'organisation de la recherche dans les années 1950-1960.

Troisièmement, les couplages séquentiels invitent à favoriser un travail de fond des scientifiques pour favoriser la génération de concepts en dehors de la zone de fixation dans l'industrie, et auxquels les connaissances scientifiques développées répondraient. D'ailleurs, l'Université de Manchester a une équipe de plus de 300 ingénieurs qui travaillent sur les potentielles applications du graphène pour favoriser in fine l'émergence de ces concepts dans l'industrie. On pourrait également citer ici les efforts menés par CEA Tech avec la mise en place dès 2011 d'un showroom de démonstrateurs technologiques (Figure 45) ou des Plateformes Régionales de Transfert Technologie CEA (PRTT) chargées d'être les relais régionaux de l'institut. L'enjeu de ces actions est de faire émerger les « trous de connaissances identifiés » par l'industriel.



Figure 45 - Showroom CEA Grenoble (source Cour des Comptes, 2018, p. 33)

Nous pouvons désormais discuter de la classe des couplages hybridés.

2.4.2. Classe des couplages hybridés

Nous poursuivons notre analyse en nous intéressant à la *classe des couplages hybridés*. Là encore, le modèle archétypal est caractérisé par M-2, avec un cas plus général B1-2. Ici, les parties p et p' vont collaborer ensemble afin de développer les connaissances $\Delta K^{p,0} = \Delta K^{p',0}$ qui permettront de favoriser la conjonction du concept $C_i^p \subset C^{p'}$. Dans notre modèle formel, l'espace C du scientifique est composé de théories potentielles nouvelles, tandis que l'espace C de l'industriel est composé de produits nouveaux potentiels. Ainsi, s'il y a une intersection des concepts, cela signifie qu'il y a hybridation de la nature même de l'espace de conception du scientifique et/ou de l'industriel (voir Axiome 1).

- **Illustration des couplages hybridés :**

La situation fait écho à de possibles projets de recherche entre OPR – Industriels, en particulier dans le cas de projets particulièrement appliqués. L'enjeu est de favoriser les conjonctions $C_i^{p,0} \rightarrow K_i^{p,2}$ et $C_j^{p',0} \rightarrow K_j^{p',2}$ qui sont in fine similaires. Nous pouvons tenter

d'illustrer ce type de couplage par un exemple, avec le cas du projet RAPACE⁶¹ entre le Centre de Recherche de l'École de l'Air, le CEA, l'armée de l'air et l'industriel Atechsys. L'objectif est ici de développer un drone à hydrogène à usage militaire 100% français. Ici, le concept est partagé par les acteurs. Par exemple, les chercheurs de l'École de l'Air indiquent :

*« Dans un contexte général de décarbonation de l'énergie, en particulier dans le milieu aéronautique, l'École de l'air a pour ambition **d'explorer les potentialités de l'usage de l'hydrogène dans les applications militaires.** »* Angel Scipioni, maître de conférences et chef du projet à l'École de l'air (source : web, site RAPACE)

Et les chercheurs du CEA :

*« Le CEA Liten est au cœur du développement de la filière « hydrogène décarboné » en France et dans le monde. [...] Nous sommes au cœur de nos missions de développement de nouvelles technologies clefs et de **soutien aux nouvelles filières françaises** pour maintenir la souveraineté nationale au sein d'environnements industriels et de recherche très concurrentiels ».* Francois Legalland, directeur du CEA-Liten (source : web, site RAPACE)

Les données du site de présentation de RAPACE permettent également de souligner le rôle de l'Armée de l'Air qui soutient fortement le projet en mettant à disposition des installations d'essais, et de l'industriel qui doit concevoir le drone et la plateforme de lancement. Ici, on constate que les chercheurs du CEA, de l'École de l'Air et les industriels (Armée de l'air et Atechsys) ont un concept commun : le drone à hydrogène pour l'usage militaire. Ici, on a bel et bien une volonté de mettre en commun des connaissances hétérogènes entre les acteurs pour favoriser la conjonction de ce concept en connaissance, qui doit se traduire en 2022 par le premier vol d'essai du RAPACE. On constatera ici que l'hybridation tient au fait que le concept relève d'une logique particulièrement appliquée, et est plus proche du développement de produit que de l'élaboration d'une nouvelle théorie, sans pour autant être dénué d'apport scientifique.

- **Performances des couplages hybridés :**

Nous pouvons sur la base du modèle formel discuter des performances, exprimées ici en capacité à dépasser les fixations. Comme précédemment, nous partons d'abord du cas archétypal M-2, puis discutons le cas plus général B1-2.

⁶¹ <https://www.cea-tech.fr/cea-tech/Pages/2021/RAPACE>

Dans le modèle M-2, il n’y a pas de dépassement des fixations : $(C_i^{p,0} = C_j^{p',0}) \subset F^{p,0}$ et $(C_i^{p,0} = C_j^{p',0}) \subset F^{p',0}$ mais au contraire, un risque de **renforcement croisé des fixations** à long terme lié au fait que $P((C_i^{p,1} \rightarrow C_{ik}^{p,2}) \notin F^{p',2})$ est faible. Les performances du modèle nous semblent donc limitées à trois titres. D’abord, la nature même de l’hybridation indique que le double impact est particulier : il n’y a pas à la fois découverte scientifique et innovation industrielle, mais une forme de mix au sein d’un même objet conceptuel qui tendrait à limiter son potentiel (voir propriété P-2). De plus, il n’y a pas de dépassement des fixations sur le concept qui fait l’objet de la conjonction (voir propriété P-1). Enfin, il y a renforcement des fixations à long terme. Nous pouvons ici en discuter les implications.

Premièrement, il apparaît que ce mode d’interaction peut favoriser l’une ou l’autre des activités uniquement. Cela signifie que pour favoriser le double impact à long terme, il faudrait par exemple que les échanges de connaissances soient assez significatifs dans le cadre du travail sur le concept industriel, pour permettre au scientifique de capitaliser ultérieurement sur ces dernières afin de les « recycler » dans un projet académique. Cela implique également que pendant la durée du projet, le scientifique n’acquière que des connaissances qu’il espère pouvoir réutiliser dans un autre projet postérieur sans contribuer directement à l’académie. C’est un pari risqué car formellement, cela signifie que pour $\Delta K^{I,0} = \Delta K^{S,0} = \mu K^{I,0} + \pi K^{S,0}$, le scientifique ait absorbé $\vartheta(\mu K^{I,0})$ de telle sorte que cela entraîne la conjonction $\vartheta(\mu K^{I,0}) \rightarrow C^{S,3}$ avec $C^{S,3} \notin F^{S,3}$. La probabilité d’obtenir une telle conjonction, en dehors de la zone de fixation, semble particulièrement faible puis que la collaboration consiste à partager uniquement sur les apports nécessaires au ΔK .

Deuxièmement, dans ce type de couplage, il n’y a pas de volonté des acteurs de sortir de la zone de fixation : nous sommes plutôt dans une recherche relativement résolutoire puisque le concept est pré-identifié : seule la connaissance est manquante ce qui ne pousse pas au développement de connaissances originales qui favoriseraient des conjonctions ultérieures en dehors des zones de fixations.

Là encore, on peut raffiner notre analyse à partir du modèle plus général B1-2. Dans les couplages hybridés, l’objectif des acteurs est d’identifier des concepts d’intérêts mutuels sur lesquels travailler ensemble⁶². Sauf un cas rare, la co-exploration conduit à un renforcement

⁶² On est ici au cœur des travaux de Gillier et al. (2010) et Gillier, Kazakçı et Piat (2012) : permettre à des acteurs de définir ensemble un concept d’intérêt mutuel sur lequel favoriser la co-exploration. Soulignons ici que les

croisé des fixations ou a minima, une « force de rappel » des fixations de l'autre partie. Pour reprendre le cas du projet RAPACE, il est plausible que le concept de « drone à hydrogène pour usage militaire » ait nécessité des échanges de connaissances bidirectionnelles avant d'être défini. Le cas rare serait donc celui où l'échange de connaissances et le *k-reordering* conduiraient simultanément les deux acteurs à générer une disjonction, toutes deux en dehors de leurs zones de fixations respectives, et similaires. On remarque que les conditions de réalisations ne sont pas impossibles, mais semblent particulièrement difficiles à mettre en place. On soulignera que pour cette classe de couplage, on tend également à retrouver la logique inhérente au modèle archétypal M-2, bien qu'il soit possible d'obtenir des succès s'il y a dépassement des zones de fixations (cas B-1.2.3).

- **Leviers de performance dans les couplages hybridés :**

On peut proposer quelques outils pour favoriser l'impact pour la classe des couplages hybridés. On soulignera d'abord que ce modèle permet d'illustrer des cas de science résolutoire, mais peut s'avérer particulièrement utile pour pallier les difficultés du modèle séquentiel M-1. En effet, dans le modèle M-1, on suppose que la connaissance est disponible et qu'il suffit de la transférer, par exemple à un industriel intéressé. Ici, on dépasse la contrainte en montrant qu'il peut exister des modèles où des connaissances nouvelles sont développées. Pourtant, ce dépassement se fait au prix de l'hybridation, du changement de la nature des concepts. Ainsi, le couplage favorisera nécessairement une activité aux dépens de l'autre : difficile dès lors de dériver des leviers de performance pour le double impact.

Il est probable que ce modèle permette de décrire certaines des collaborations avec des OPR des grands laboratoires industriels dans les années 1950-1960, qui ont investi très largement dans la recherche fondamentale (là le concept partagé est scientifique). Il faut ici remarquer que compte tenu des jeux de pouvoir et du manque de financement de certains laboratoires des OPR, il est probable que ces couplages se fassent désormais majoritairement aux dépens de la recherche scientifique (on fera écho ici aux travaux de Toole et Czarnitzki, 2010). Des outils intéressants pourraient donc être le développement de programmes qui favoriseraient des concepts à dominante « scientifique » plutôt « qu'industriel ». On notera également qu'un modèle où c'est le concept industriel qui dominerait pourrait être plébiscité par des chercheurs

travaux de ces auteurs constituent une avancée notable puisqu'ils démontrent les difficultés dans la coopération pour l'exploration. Mais l'élément novateur de notre modèle réside dans l'existence de natures de concepts différents : un concept de produit novateur et un concept de théorie scientifique novatrice.

qui souhaiteraient s'investir largement dans l'application industrielle d'une découverte scientifique⁶³.

2.4.3. Couplage à double impact simultané

Le couplage à double impact simultané est au cœur de ces travaux de recherche. Tout d'abord, soulignons l'originalité toute particulière de ce couplage. Généralement, le corollaire de la collaboration est de trouver un concept projecteur qui permet aux différentes parties de mutualiser leurs efforts. Ici, compte tenu de la nature différente des espaces C du scientifique et de l'industriel et pour éviter tout processus d'hybridation (Axiome 1), le couplage repose sur la volonté de défendre **l'indépendance** des espaces. La conséquence de cette indépendance des espaces, c'est de permettre une logique de *défixations croisées* : l'échange de connaissances et le *k-reordering* permettent une disjonction en dehors de la zone de fixation pour un acteur p (condition B-2.a) synonyme de performance (condition P-1). Or, la connaissance créée est supposée ici d'intérêt pour l'autre concepteur qui bénéficie d'un effet rétroactif avec une disjonction en dehors de sa propre zone de fixation (condition B-2.b), là encore synonyme de performance (condition P-1), d'autant que comme nous l'avons souligné, il n'y a pas d'hybridation des concepts (condition P-2).

- **Performances du couplage à double impact simultané :**

Ce qui est intéressant ici c'est que pour dépasser les fixations initiales, la partie p s'appuie sur son *k-reordering* et les connaissances absorbées de l'autre partie soit $\varepsilon K^{p,0} + \vartheta K^{p',0}$ et ce, sans être soumise aux fixations de l'autre partie. Cela signifie que pour favoriser une disjonction en dehors de la zone de fixation il faut que la partie p :

- accède à des $K^{p',0}$ indépendantes de $K^{p,0}$ et les plus originales possibles ;
- accède à un niveau suffisant de $K^{p',0}$ nécessitant un taux d'absorption ϑ élevé ;
- s'engage dans un *k-reordering* d'envergure afin d'avoir $\varepsilon K^{p,0}$ élevé (et significativement différent de $K^{p,0}$).

Néanmoins, soulignons qu'à ce stade, il n'y a pas de double impact, mais impact sur une seule dimension de la performance (scientifique ou industriel). On notera que, même si le modèle ne respectait que la condition B-2.a et pas la condition B-2.b, il pourrait être toutefois

⁶³ Voir ici la littérature sur l'entrepreneuriat académique.

d'intérêt. En effet, il permettrait une sortie de zone de fixation pour la partie p . Le problème ici c'est qu'il n'y a pas d'incitation pour l'autre partie à favoriser un transfert et une absorption importante de $K^{p',0}$ indépendante et originale, puisqu'il n'en retirerait pas les fruits. On notera également qu'il est tout à fait possible que $K^{p',0}$ ne soit pas suffisamment indépendante ou originale de $K^{p,0}$, que la part absorbée ne soit pas suffisamment importante ou que le k -reordering ne soit pas assez significatif ce qui entraînerait alors $C_i^{p,1} \subset F^{p,1}$. Pourtant, si la condition B-2.b est respectée, rétrospectivement, c'est que les parties avaient tout intérêt à s'engager dans un fort échange de connaissances. Nous pouvons retrouver ici une notion de sérendipité, ou de « heureux hasards », mais nous disposons ici d'un modèle explicatif des mécanismes à l'œuvre. Nous avons ainsi proposé la notion **d'indépendantisation de la connaissance**. En effet, il y a une logique « circulaire » dans le couplage à double impact simultané où la connaissance d'un acteur lui revient à l'issue du processus, mais avec des propriétés supplémentaires. Elle a été rendue « indépendante » de son propre espace K par l'autre acteur, et permettant ainsi une disjonction en dehors de la zone de fixation.

Mais qu'est-ce qui pousse à assurer le respect de la condition B-2.b ? D'une part, le résultat espéré de la conjonction réalisée par le concepteur p au temps 1 (et en dehors de la zone de fixation) doit bénéficier à l'autre partie p' . Ici, on peut faire l'hypothèse que si p et p' collaborent, c'est qu'ils ont un intérêt commun et que la connaissance dérivée par l'un peut être utile à l'autre acteur. D'autre part, on peut faire l'hypothèse que le taux d'absorption de la nouvelle connaissance par p' soit plus élevé dans ce type de couplage, car les acteurs ont davantage à y gagner.

Par exemple dans le cas où p serait le concepteur scientifique et p' le concepteur industriel, cela signifie que le concepteur industriel aurait accès à des connaissances particulièrement originales dans le cadre de l'échange bidirectionnel avec le scientifique.

- **Leviers de performance dans le couplage à double impact simultané :**

Le couplage à double impact simultané constitue le modèle le plus en rupture et une partie entière du présent manuscrit vise à discuter les conditions, notamment institutionnelles, de sa performance. Nous pouvons toutefois discuter quelques premiers leviers à l'aune du modèle formel.

Premièrement, pour favoriser la performance, il faudrait que le scientifique ait accès à des connaissances $K^{p',0}$ les plus originales possible au regard de $K^{p,0}$. Nous proposons que ces connaissances puissent être par exemple de *nouveaux objets de modélisation scientifique*

comme le transistor qui a été inventé dans les Bell Laboratories par un processus d’essais-erreurs, mais dont le mécanisme de fonctionnement nécessitait une nouvelle théorie scientifique. Ces connaissances peuvent également être constituées *d’anomalies scientifiques*. Il s’agit alors d’un phénomène industriel qui ne correspond pas à la prédiction théorique et nécessite de proposer une nouvelle théorie scientifique. On pourrait prendre l’exemple de Pasteur et des brasseurs de la région lilloise, quand celui-ci découvre la microbiologie, car la fermentation de la bière ne respecte pas les prédictions de Pasteur sur la cristallographie (Galvez-behar, 2018). Toutefois, un travail de fond sur ce qui fait connaissance originale pour le scientifique dans la relation avec l’industriel (et inversement) est nécessaire pour mieux comprendre ce phénomène. Il est fort probable que cette originalité soit contingente à l’espace K du scientifique, aux travaux de recherche envisagés.

Deuxièmement, il est nécessaire que le scientifique accède à une part suffisante de la connaissance originale de l’industriel, donc avec un taux de ϑ élevé. Ici, cela suppose que les interactions soient probablement longues et pérennes entre les acteurs pour permettre de faciliter l’accès du scientifique aux données industrielles. Il est également nécessaire que les enjeux de Propriété Industrielle aient été gérés en amont pour permettre un accès du scientifique aux connaissances de l’industriel. Il y a probablement un travail d’acculturation de long terme qui doit permettre à l’industriel d’identifier les connaissances internes qui pourraient être potentiellement des anomalies scientifiques qu’il pourrait transférer au scientifique (Créplet, Kern et Schaeffer, 2007).

Troisièmement, il est possible d’agir sur le *k-reordering* du scientifique soit $\varepsilon K^{p,0}$ élevé. On peut supposer par exemple que dans le cas d’anomalies scientifiques identifiées à partir des connaissances industrielles, la réorganisation des connaissances opérée par le scientifique soit relativement forte.

Ainsi, nous avons pu décrire formellement les mécanismes et conditions à l’œuvre, en particulier dans le cas du modèle de couplage à double impact simultané. S’il a été aisé pour les autres classes de couplage d’illustrer nos propos, le cas du couplage à double impact simultané apparaît davantage en rupture. Est-ce que ce modèle complexe peut véritablement exister ? Avant d’aller plus loin et de potentiellement tester à grande échelle les conditions d’existence du modèle, il nous faut le valider sur au moins un exemple, par un cas d’étude approfondi.

3. Cas d'étude du modèle à double impact simultané

Dans cette section, nous cherchons à tester la pertinence du modèle formel de couplage à double impact simultané. Pour cela, nous explorons un cas empirique particulier, choisi pour son caractère extrême et sa pertinence pour démontrer l'existence de ce couplage. Il s'agit de la découverte de CRISPR-Cas9 comme mécanisme de système immunitaire adaptatif des bactéries par DuPont-Danisco au milieu des années 2000, et ses applications successives dans cette organisation.

3.1. Présentation du contexte du cas CRISPR-Cas9

Nous nous intéressons ici à une percée scientifique fondamentale : la découverte de CRISPR-Cas9 comme système immunitaire adaptatif des bactéries. Cette découverte est extrêmement importante dans l'histoire de la chimie moderne. En effet, alors que le cas est exploré ici par l'auteur depuis début 2019, le Comité Nobel a décidé de décerner le Prix Nobel de Chimie fin 2020 à Jennifer Doudna et Emmanuelle Charpentier pour « *le développement d'une méthode d'édition du génome* » en 2012⁶⁴, basée sur CRISPR-Cas9 en tant que système immunitaire des bactéries. Jennifer Doudna et Emmanuelle Charpentier sont deux chercheuses qui travaillent dans des OPR : la première à l'Université de Californie et la seconde à l'Institut Max Planck, et leurs relations avant 2012 avec des industriels n'apparaissent pas comme un élément saillant dans leurs travaux. Ce n'est donc pas leur découverte des « ciseaux à ADN » qui nous intéresse ici, mais une découverte antérieure qui fut déterminante pour leur permettre de faire cette avancée majeure. En effet, ces deux chercheuses ont développé une technique permettant de « reprogrammer » le système immunitaire des bactéries (à partir de la molécule tracrRNA⁶⁵), et basée sur CRISPR-Cas9, afin de « couper » et « remplacer » n'importe quel brin d'ADN. Mais pour permettre cette prouesse, il fallait déjà identifier que CRISPR-Cas9 est un système immunitaire adaptatif des bactéries et comprendre son fonctionnement. Et c'est cette découverte scientifique essentielle qui nous intéresse ici, et qui date de 2007⁶⁶.

Nous nous intéressons à la découverte scientifique présentée dans l'article de Barrangou, R., et al., « *CRISPR provides acquired resistance against viruses in prokaryotes* » et publiée

⁶⁴ Jinek, M., et al., A programmable dual-RNA-guided DNA endonuclease in adaptive bacterial immunity. *Science*, 2012. 337(6096): p. 816-21.

⁶⁵ Deltcheva, E., et al., CRISPR RNA maturation by trans-encoded small RNA and host factor RNase III. *Nature*, 2011. 471(7340): p. 602-7.

⁶⁶ Barrangou, R., et al., CRISPR provides acquired resistance against viruses in prokaryotes. *Science*, 2007. 315(5819): p. 1709-12.

dans la revue *Science* en 2007 (voir Figure 46). Cet article constitue une avancée majeure : il restera pendant plus de 10 ans l'article le plus cité sur le champ de recherche CRISPR⁶⁷ et précède la création des « CRISPR meetings » annuels⁶⁸, conférence scientifique majeure sur le sujet qui contribuera à la structuration du champ scientifique. Dans cet article, les auteurs font la démonstration que le locus CRISPR (*Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*) – c'est-à-dire une zone particulière de l'ADN des bactéries constituées notamment de séquences d'environ 30 bases A, C, T, G – joue un rôle clé dans le système immunitaire des bactéries. En prenant l'exemple de la bactérie *Streptococcus thermophilus*, les auteurs montrent que le système de défense immunitaire des bactéries est adaptatif : les bactéries gardent en « mémoire » les phages (ie. virus) qui les ont attaquées par le passé, afin de réagir contre ces derniers. Revenons brièvement sur le contenu de cette avancée en évoquant rapidement l'histoire de CRISPR.

CRISPR Provides Acquired Resistance Against Viruses in Prokaryotes

Rodolphe Barrangou,¹ Christophe Fremaux,² Hélène Deveau,³ Melissa Richards,¹ Patrick Boyaval,² Sylvain Moineau,³ Dennis A. Romero,¹ Philippe Horvath^{2*}

Clustered regularly interspaced short palindromic repeats (CRISPR) are a distinctive feature of the genomes of most Bacteria and Archaea and are thought to be involved in resistance to bacteriophages. We found that, after viral challenge, bacteria integrated new spacers derived from phage genomic sequences. Removal or addition of particular spacers modified the phage-resistance phenotype of the cell. Thus, CRISPR, together with associated *cas* genes, provided resistance against phages, and resistance specificity is determined by spacer-phage sequence similarity.

Bacteriophages are arguably the most abundant biological entity on the planet (1). Their ubiquitous distribution and abundance have an important impact on microbial ecology and the evolution of bacterial genomes (2). Consequently, bacteria have developed a variety of natural defense mechanisms that target diverse steps of the phage life cycle, notably blocking adsorption, preventing DNA injection, restricting the incoming DNA, and abortive infection systems. These antiviral barriers can also be engineered and manipulated to better control phage populations (2, 3).

Numerous bacteria have been selected by humans and used extensively for fermentation and biotechnology processes. Unfortunately, domesticated bacteria used in industrial applications are often susceptible to phage attack, including

Figure 46 - En tête de l'article Barrangou & al. (2007) dans Science

⁶⁷ L'article compte au 01/03/2021 environ 3350 citations scientifiques, 270 citations dans des brevets.

⁶⁸ <https://www.crispr2021.conferences-pasteur.org/>

Ishino en 1987⁶⁹ et Mojica en 1993⁷⁰ identifient pour la première fois que des bactéries possèdent des séquences d'ADN courtes et répétées identiques appelées des « *repeats* », entrecoupées de séquences d'ADN courtes et variées et appelées des « *spacers* » (Lander, 2015, p. 19 ; Nobel Committee, 2020). On parle alors de « locus CRISPR » (le terme apparaît en 2002). Il est alors montré que le locus CRISPR est systématiquement adjacent à une protéine Cas qui semble jouer un rôle dans le métabolisme de l'ADN et de l'expression du génome⁷¹ : d'où le terme « CRISPR-Cas ». Pourtant, ces avancées restent relativement confidentielles jusqu'en 2005, en particulier parce que la fonction du locus CRISPR reste inconnue. En 2005 justement, pour la première fois, plusieurs chercheurs d'équipes différentes émettent l'hypothèse que le locus CRISPR pourrait jouer un rôle dans le mécanisme immunitaire des bactéries, puisque les *spacers* semblent composés d'éléments génétiques transmissibles par des phages (fragments d'ADN et plasmides)⁷². Comme l'indique le Comité Nobel : « *These correlative findings suggested a function for CRISPRs in prokaryotic defence against invading foreign DNA and the spacer sequences were described as a 'memory of past "genetic aggressions"'* » (Nobel Committee, 2020, p. 2). À ce stade pourtant, il ne s'agit que d'une hypothèse.

La force de l'article de Barrangou et al. (2007) c'est de faire la démonstration que le système CRISPR-Cas peut conférer de la résistance aux bactéries face à des éléments d'ADN étrangers, c'est-à-dire une infection par des phages. Dans cet article, les auteurs étudient la bactérie *Streptococcus thermophilus* qu'ils infectent avec un phage violent. Ils analysent ensuite le locus CRISPR des bactéries qui ont survécu à l'infection. Ils démontrent alors que la bactérie résistante a acquis de nouvelles séquences de *spacers*, qui sont similaires aux séquences ADN des phages inoculés. Les auteurs démontrent également que la suppression des *spacers* conduit à une perte de résistance, et que l'inactivation des gènes Cas conduit à une perte de résistance. Concrètement, cela signifie que le locus CRISPR associé aux gènes Cas constitue un système

⁶⁹ Ishino, Y., et al., Nucleotide sequence of the *iap* gene, responsible for alkaline phosphatase isozyme conversion in *Escherichia coli*, and identification of the gene product. *J Bacteriol*, 1987. 169(12): p. 5429-33.

⁷⁰ Mojica, F.J., G. Juez, and F. Rodriguez-Valera, Transcription at different salinities of *Haloflex mediterranei* sequences adjacent to partially modified PstI sites. *Mol Microbiol*, 1993. 9(3): p. 613-21.

⁷¹ Jansen, R., et al., Identification of genes that are associated with DNA repeats in prokaryotes. *Mol Microbiol*, 2002. 43(6): p. 1565-75.

⁷² Mojica, F.J., et al., Intervening sequences of regularly spaced prokaryotic repeats derive from foreign genetic elements. *J Mol Evol*, 2005. 60(2): p. 174-82. ; Pourcel, C., G. Salvignol, and G. Vergnaud, CRISPR elements in *Yersinia pestis* acquire new repeats by preferential uptake of bacteriophage DNA, and provide additional tools for evolutionary studies. *Microbiology (Reading)*, 2005. 151(Pt 3): p. 653-663. ; Bolotin, A., et al., Clustered regularly interspaced short palindrome repeats (CRISPRs) have spacers of extrachromosomal origin. *Microbiology (Reading)*, 2005. 151(Pt 8): p. 2551-2561.

immunitaire adaptatif dépendant des séquences de *spacers*, correspondant à de l'ADN de bactériophages (Nobel Committee, 2020). Pour simplifier, on peut considérer que les bactéries se « vaccinent » en intégrant comme *spacers* des séquences d'ADN des phages qui les attaquent. On notera que cette avancée joue un rôle clé pour la future découverte d'Emmanuelle Charpentier et Jennifer Doudna : l'article de Barrangou et al. (2007) est d'ailleurs cité dans l'article de Jinek et al. (2012) qui retrace l'histoire de CRISPR et dans le rapport du Comité Nobel sur le Prix Nobel de Chimie 2020.

Mais au-delà de cette avancée scientifique majeure, pourquoi ce cas nous intéresse-t-il ? La particularité de cet article réside dans l'affiliation des auteurs : Rodolphe Barrangou, Christophe Fremaux, Melissa Richards, Patrick Boyaval, Dennis A. Romero et Philippe Horvath sont tous les six affiliés à un industriel : Danisco (aux États-Unis et en France)⁷³. Ici, nous sommes donc dans un cas intéressant d'une découverte scientifique majeure, en lien avec l'industrie. Il nous faut alors discuter des activités de Danisco (voir présentation de l'entreprise Encadré 8 p. 160).

Ici, les activités qui nous intéressent sont celles de la production de ferments lactiques : des additifs qui comprennent des bactéries acides lactiques (par exemple *Streptococcus thermophilus*) qui, mélangées à du lait, permettent la fermentation et la production notamment de fromage et de yaourt. Cette activité nous intéresse, car c'est en travaillant sur *Streptococcus thermophilus* que l'équipe de DuPont-Danisco a pu faire la découverte fondamentale de CRISPR-Cas comme mécanisme adaptatif de défense immunitaire des bactéries. Concrètement, la gamme des produits proposés par DuPont-Danisco est composée de diverses associations de bactéries acides lactiques à destination de professionnels de l'industrie agroalimentaire. Ces associations de bactéries acides lactiques doivent être les plus résistantes possibles aux attaques de phages. La fermentation s'opère en effet dans des espaces non stériles : il peut y avoir des virus qui viennent attaquer les bactéries acides lactiques en empêchant la fermentation de se produire, ce qui résulte en une perte nette pour le client qui est conduit à jeter sa cuve entière de lait qui ne pourra plus fermenter. Pour prendre un exemple de produit, citons le YO-MIX PRIME®. DuPont précise les propriétés de ce produit :

« It's based on a formulation of high shear resistance cultures (Streptococcus thermophilus), giving the yogurt its high and incomparable texture. The Streptococcus thermophilus strains contained in the cultures are the subject of Intellectual Property rights owned by DuPont. [...] It can be seamlessly introduced

⁷³ Sylvain Moineau et Hélène Deveau sont affiliés à l'Université de Laval au Québec

into your production process, plus there are opportunities for cost optimization through working with our DuPont Application experts. » (Source: Site web DuPont⁷⁴)

Les produits de cette gamme sont proposés aux clients, principalement de grands groupes de l'industrie alimentaire sous la forme suivante (Figure 47, ici dans la version Danisco) :



Figure 47 - Exemple de produit Danisco

Toutefois ici, nous n'avons évoqué que la découverte scientifique : nous n'avons traité à ce stade que d'une partie seulement du modèle à double impact simultané. Il nous faut donc discuter de la partie développement de produits.

En termes de développement de produits, la particularité de DuPont-Danisco est qu'il s'agit de la première entreprise au monde à avoir déposé un brevet d'invention avec la mention de « CRISPR » (Figure 48). Ce brevet est d'ailleurs déposé 2 ans avant la publication scientifique : en 2005. L'objectif du brevet est décrit comme suit : *“There is described herein the use of CRISPR loci or a component thereof for modulating the resistance of a cell against a target nucleic acid or a transcription product thereof.* » (p. 3). Il s'agit donc de capitaliser sur les gènes Cas du mécanisme CRISPR pour moduler la résistance immunitaire de bactérie : une propriété qui semble intéressante pour lutter contre les phages, et donc optimiser le processus de production de Danisco.

⁷⁴ <https://www.dupontnutritionandbiosciences.com/products/yo-mix-prime-yogurt.html>

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)	
(19) World Intellectual Property Organization International Bureau	
 	
(43) International Publication Date 1 March 2007 (01.03.2007)	(10) International Publication Number WO 2007/025097 A2
<hr/>	
(51) International Patent Classification: A23C 9/12 (2006.01) C12Q 1/68 (2006.01) C12N 15/74 (2006.01)	(74) Agent: FOX, Harold, H. et al.; STEPTOE & JOHNSON LLP, 1330 Connecticut Avenue, NW, Washington, DC 20036 (US).
(21) International Application Number: PCT/US2006/033167	(81) Designated States (unless otherwise indicated, for every kind of national protection available): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW
(22) International Filing Date: 25 August 2006 (25.08.2006)	(84) Designated States (unless otherwise indicated, for every kind of regional protection available): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian (AM, AZ, BY, EG, KZ, MD, RU, TJ, TM), European (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
(25) Filing Language: English	
(26) Publication Language: English	
(30) Priority Data: 60/711,396 26 August 2005 (26.08.2005) US 60/747,683 19 May 2006 (19.05.2006) US	
(71) Applicant (for all designated States except US): DANISCO A/S [DK/DK]; Langebrogade 1, DK-1001 Copenhagen K (DK).	
(72) Inventors; and (75) Inventors/Applicants (for US only): HORVATH, Philippe [FR/FR]; 8, Rue Des Sablons, F-86140 Scorbe-Clairvaux (FR). BARRANGOU, Rodolphe [FR/US]; 4818 Valor Way, Madison, WI 53718 (US). FREMAUX, Christophe [FR/FR]; 19 Rue Des Loucs, F-86000 Poitiers (FR). BOYVAL, Patrick [FR/FR]; Les Ruisselees, F-35520 La Meziere (FR). ROMERO, Dennis [US/US]; 126 Amanda Court, Oregon, WI 53575 (US).	
	Published: — without international search report and to be republished upon receipt of that report
	For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.
<hr/>	
(54) Title: USE	
(57) Abstract: The present invention relates to the use of one or more cas genes for modulating resistance in a cell against a target nucleic acid or a transcription product thereof.	

Figure 48 - Brevet Danisco 2005

Ainsi, nous achevons notre brève présentation du cas. Nous pouvons constater que nous avons bien une logique de double impact simultané : une découverte scientifique majeure d'une part, et une application industrielle nouvelle de l'autre. L'enjeu est d'explorer plus en détail le cas pour tester les conditions de réalisation du modèle formel de couplage à double impact simultané tel que développé dans la section ci-dessus. Nous revenons brièvement sur la méthodologie employée.

3.2. Formalisation en C-K et démonstration du double impact simultané

Pour expliciter le cas d'étude, nous revenons d'abord sur notre interprétation de la situation initiale, avant d'évoquer les phases de *matching* et de *building*. **Pour les sources des données de cette section (codées sous la forme V1, V2, P1, etc.) se reporter au Tableau 10 p. 159 du Chapitre 3.**

3.2.1. Situation initiale

Débutons notre analyse en spécifiant les deux espaces C-K des concepteurs, soit un concepteur de produits nouveaux, et un concepteur de théories scientifiques nouvelles. Ici, ce qui est intéressant c'est de différencier les deux logiques, car l'organisation de rattachement des deux concepteurs (voire même de l'équipe) est la même : l'équipe de R&D de DuPont-Danisco. On a donc les deux espaces suivants :

- **Concepteur industriel :**

Il s'agit ici du concepteur en charge du développement de nouveaux composés de bactéries acides lactiques, les plus résistants possibles aux phages. *L'espace des connaissances* est composé de l'ensemble des connaissances acquises par l'entreprise sur les moyens de production, les difficultés rencontrées par les clients, les techniques de production. Par exemple, on pourrait évoquer la technique industrielle des *Bacteriophage Insensitive Mutant* (BIM) :

« Comment fait-on pour isoler des bactéries qui soient plus résistantes aux phages ? C'est une approche totalement naturelle qui consiste à mettre en contact une bactérie que l'on a isolée. Cette bactérie est sensible à un virus, et donc on la met en contact avec ce virus qui va infecter la bactérie, la détruire. Et donc toute la population bactérienne est décimée. Mais si l'on attend un petit peu plus longtemps, on peut voir apparaître une population bactérienne qui dérive de celle initialement utilisée, mais qui a survécu à l'infection phagique. On appelle dans le jargon de notre métier ces bactéries résistantes des BIM pour Bacteriophage Insensitive Mutant. » (P. Horvath, V4).

On pourrait encore évoquer l'historique des développements de bactéries et d'attaques phagiques, les bibliothèques de phages et des bactéries (2,500 échantillons différents, P. Horvath, V1) :

« *So this strain, the GCC7710 is one of our blockbuster, I would say. It's a strain that you have probably all eaten in yogurt. It's very common, it's a fast acidifying texturing strain, that we isolated in Dangé st Romain in 1985 and it took us four years to get to the market. [...] Very quickly after this strain was put on the market. [...] In 1990 we isolated the first phage active on this strain. This phage was named 858.* » (P. Horvath, V1)

De plus, l'entreprise a obtenu un séquençage ADN de leur principale bactérie acide lactique en 2002 dans le cadre d'un projet de partenariat à l'international avec le Département de l'Energie aux Etats-Unis :

« *We had the opportunity to have a strains sequenced by the JGI [Joint Genome Institute] at the US Department of Energy. It was a program to sequence different lactic acid bacteria and strept thermophilus strain was provided at that time by Danisco. Its name was lmd 9. This strain is used for your own production, it's an important strain.* » (P. Horvath, V1)

On pourrait aussi citer les outils de pointe pour faire du séquençage ADN :

« *Après le rachat par le géant danois des biotechnologies Danisco, le centre de recherche hérite, à l'hiver 2004, d'un séquenceur d'ADN.* » (P1)

En termes d'espace de concepts, on peut considérer que le C0 serait du type : « *un composé de bactéries acides lactiques qui résiste mieux aux attaques de phages* ». Il s'agit d'un enjeu industriel essentiel pour DuPont-Danisco car cela constitue leur véritable avantage compétitif sur le marché, qu'il est nécessaire de renouveler chaque année, comme l'indiquent les extraits suivants :

« *I can tell you that it's the major cause of failures in food fermentations. So on our side, the selection of bacteria that are resistant to those phages is very important. It's, I would say, a constant activity like with the flu, we also need to get the shot each year to be vaccinated.* » (P. Horvath, V1)

« *So DuPont is still putting lots of effort in order to select strains that are robust, resistant as possible against those infections* » (R. Barrangou, V3)

On peut désormais décrire l'espace C-K du concepteur scientifique.

- **Concepteur scientifique :**

Il s'agit ici des équipes de DuPont-Danisco en charge de comprendre le fonctionnement des bactéries acides lactiques face aux phages pour améliorer le processus de production.

L'espace des connaissances est composé en particulier de l'ensemble des connaissances théoriques acquises par l'équipe sur les bactéries acides lactiques, sur l'utilisation de moyens de séquençages ADN, les partenariats académiques. Pour illustrer ces éléments, par exemple nous pouvons préciser que P. Horvath a obtenu son doctorat en s'intéressant au processus de fermentation dans la choucroute (S1) :

« I did my PhD in Strasbourg working on a lactic acid bacteria named Lactobacillus Plantarum which has a local interest there, because it's used for the fermentation of cabbage into sauerkraut. So, I was working and so already, an interest for food, for the food industry. » (P. Horvath, V1)

Ou que R. Barrangou est spécialisé en biologie moléculaire :

« I was like a new a freshly minted PhD guy, right. That has expertise in doing molecular biology in lactic acid bacteria. One of my first Jobs was to assemble those genomes. » (R. Barrangou, V3)

On pourrait également citer la compréhension des différents moyens théoriques de lutte d'une bactérie (pré-CRISPR) face à une attaque phagique :

*« Naturellement, les bactéries sont dotées de divers niveaux de protection, divers mécanismes de protection vis-à-vis de cette prédation phagique. On peut les classer en quatre catégories. **Une première**, empêche le virus de reconnaître sa cible c'est ce qu'on appelle l'inhibition, la protection vis-à-vis de l'adsorption. [...] Si cette étape a lieu, il y a un **deuxième niveau** de protection qui consiste à inhiber l'injection du matériel génétique du phage. [...] Si ces deux étapes ont lieu, et que l'ADN du virus a pu être injecté dans la cellule, il existe un **troisième niveau** de résistance assez connu que l'on appelle des systèmes de « restriction-modification » [...] Enfin, un **quatrième niveau** de résistance peut être considéré comme un suicide bactérien suite à l'infection. » (P. Horvath, V4)*

L'espace des concepts est quant à lui composé de nouvelles théories scientifiques potentielles. Le C0 pourrait ainsi être du type : « *une meilleure explication de la survie des bactéries acides lactiques aux phages* ». Les éléments suivants extraits des documents consultés permettent de rendre compte de cet enjeu clé pour l'équipe scientifique de Danisco :

« De ce fait, DuPont, consacre des moyens importants en R&D pour étudier la robustesse des bactéries que constituent ces ferments. Et notamment, pour l'étude de la robustesse vis-à-vis des attaques par ces virus. » (P. Horvath, V2)

« So we wanted to understand what is in the genome of those bacteria that make great yogurt and great cheese, and how is it that they worked. » (R. Barrangou, V3)

Ainsi, alors que nous avons décrit les espaces C-K des deux concepteurs, nous pouvons commenter ces éléments vis-à-vis de notre modèle. Premièrement, nous pouvons indiquer que cette situation initiale respecte l’Axiome 1, c’est-à-dire que les concepts des deux concepteurs sont ici de natures différentes (un nouveau procédé innovant et une nouvelle théorie scientifique potentielle). Deuxièmement, nous avons indiqué dans l’Axiome 2 que les concepteurs sont soumis à des fixations. Nous invitons ici le lecteur à se référer au Tableau 18 qui détaille les possibles sources de fixations. Pour donner ici quelques exemples, on peut aisément imaginer que pour le concepteur industriel, les techniques de production et notamment le recours à la logique du BIM constitue une fixation forte (méthode utilisée depuis une longue période dans l’industrie). On peut également supposer que pour les concepteurs scientifiques, la connaissance des différents mécanismes classiques (pré-CRISPR) de protection des bactéries face aux phages est une fixation.

Nous concluons donc cette sous-section en indiquant que les Axiomes 1 et 2 sont donc respectés et qu’à $t = 0$, les acteurs vont démarrer des interactions. On obtient schématiquement la Figure 49 ci-dessous. D’après l’Axiome 3, on suppose qu’il y a d’abord une recherche d’intersection entre les espaces C et K des deux concepteurs, soit la phase de *matching*. Si cette phase de recherche d’intersection n’aboutit pas, il y a alors une phase de *building*.

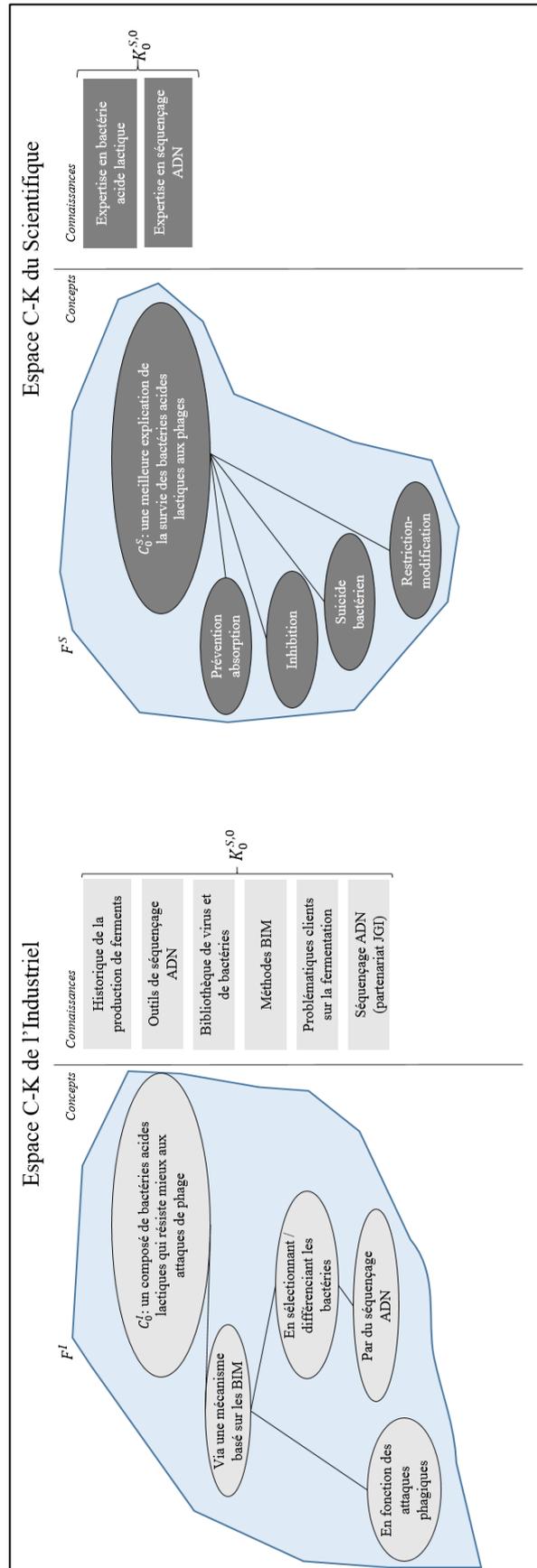


Figure 49 - Espaces C-K cas Danisco-DuPont (t=0)

3.2.2. Phase de Matching

Premièrement, il nous faut analyser s'il y a ou non des intersections de concepts et de connaissances dans les espaces C-K des deux concepteurs.

On notera d'abord qu'il n'y a pas d'intersection évidente dans l'espace des connaissances (et donc de logique séquentielle). En effet, il ne semble pas possible que l'un des acteurs puisse apporter à l'autre, une réponse évidente à un concept potentiel. Par exemple ici, il n'existe pas de solution évidente disponible chez le concepteur industriel pour permettre une conjonction sur un sous-concept de « *un composé de bactéries acides lactiques qui résiste mieux aux attaques de phages* ». Plus précisément, cela signifie que la condition M-1 relative au transfert n'est pas valide. La question que nous devons nous poser pour définir son statut est donc la suivante : dans quelle mesure l'équipe scientifique dispose-t-elle d'une connaissance « sur étagère » qui permettrait, par transfert de connaissance, d'apporter ΔK au concepteur industriel pour lui permettre d'opérer une conjonction sur un sous-concept de son C0 « *un composé de bactéries acides lactiques qui résiste mieux aux attaques de phages* » ? Ici, nous soulignons que l'industriel envisage une piste possible pour une meilleure sélection des bactéries, et qui passerait par le séquençage d'ADN, d'où le recours à une expertise sur le sujet (par exemple R. Barrangou, P. Horvath). Pourtant, ce qui est intéressant ici, c'est que malgré l'expertise de l'équipe scientifique, il ne peut y avoir conjonction immédiate. En effet il reste beaucoup d'éléments à concevoir pour développer le C0 au-delà d'un premier niveau de partition et le ΔK va bien au-delà du simple séquençage ADN des bactéries. D'ailleurs comme l'indique R. Barrangou :

« *One of my first Jobs was to assemble those genomes. Can we get the genome data? Can we put the puzzle together? And then, the issue is yes. About 98 to 99 percent of it. But when you come to the CRISPR it breaks down.* » (R. Barrangou, V3)

Ainsi, ces éléments nous amènent à rejeter la condition M-1 relative au transfert de connaissances et au couplage séquentiel. Nous soulignons toutefois ici les intérêts mutuels des parties dans la relation, qui constitue un élément bien sûr facilitant.

Deuxièmement, on observe qu'il n'y a pas d'intersection dans l'espace des concepts, c'est-à-dire que la condition M-2 n'est pas validée. Cette proposition est plus simple à vérifier puisque cela suppose que les concepts industriels et scientifiques sont bel et bien séparés. Compte tenu de la situation avec deux concepteurs dans une même organisation, cette

délimitation peut sembler toutefois paradoxale. Pourtant, l'extrait suivant montre bien cette délimitation forte où il est précisé que DuPont-Danisco cherche à expliquer le phénomène scientifiquement, en espérant pouvoir en dégager des applications futures potentielles :

« *The other thing that is interesting is that if you think right now of where we were at the time, we were trying, in a for-profit company selling starter culture for the dairy industry to address a very simple problem: how do bacteria withstand phage attacks when you turn milk into yogurt, or milk into cheese* » (R. Barrangou, V3)

Ainsi, on valide ici le fait que la condition M-2 n'est pas vérifiée et que nous ne sommes pas en présence d'un couplage hybride.

Comme M-1 et M-2 ne sont pas vérifiées, on peut analyser la phase de *Building*.

3.2.3. Phase de Building

D'après l'Axiome 3, la phase de *building* implique à la fois un échange bilatéral de connaissances et un *k-reordering*. Si ces étapes ont bien lieu, nous pouvons discuter des conditions suivantes au regard du modèle à double impact simultané, ou de modèle relevant davantage du *matching*.

- **Échanges de connaissances et k-reordering :**

Concernant l'échange bilatéral de connaissances entre les deux concepteurs, on notera par exemple que du fait de leur embauche, P. Horvath ou R. Barrangou mettent à disposition du concepteur industriel une partie de leurs connaissances sur les bactéries acides lactiques et sur le séquençage ADN. Réciproquement, l'équipe de R&D a accès à certaines ressources de l'industriel et en particulier des séries de bactéries acides lactiques qui ont fait l'objet de BIM et un grand nombre de phages collectés par l'organisation :

“*This screening is done from as much as possible from natural samples, with the objective of isolation of biodiversity. [...] So we have built a large collection of strains and one of the interests of the company when I was hired was to be able to differentiate those strains in order to avoid working on clones. So my interest was to develop some genotyping method for the species.*” (P. Horvath, V1)

« *En 2000, le jeune docteur de l'université de Strasbourg débarque ainsi à Dangé-Saint-Romain avec pour mission d'utiliser les outils de la biologie moléculaire pour classer les quelque 13 000 souches bactériennes maison. La tâche est vaste, il tâtonne.* » (P1)

En parallèle dans notre modèle, les concepteurs devraient opérer un *k-reordering*. Compte tenu des données disponibles, il nous semble difficile de valider l'existence ou non de ce *k-reordering*. Toutefois, cet élément n'est pas fondamental dans la démonstration. Nous pouvons à ce stade valider l'Axiome 3, bien qu'il doive faire l'objet d'investigations ultérieures concernant la logique de *k-reordering*. On obtient la Figure 50 ci-dessous.

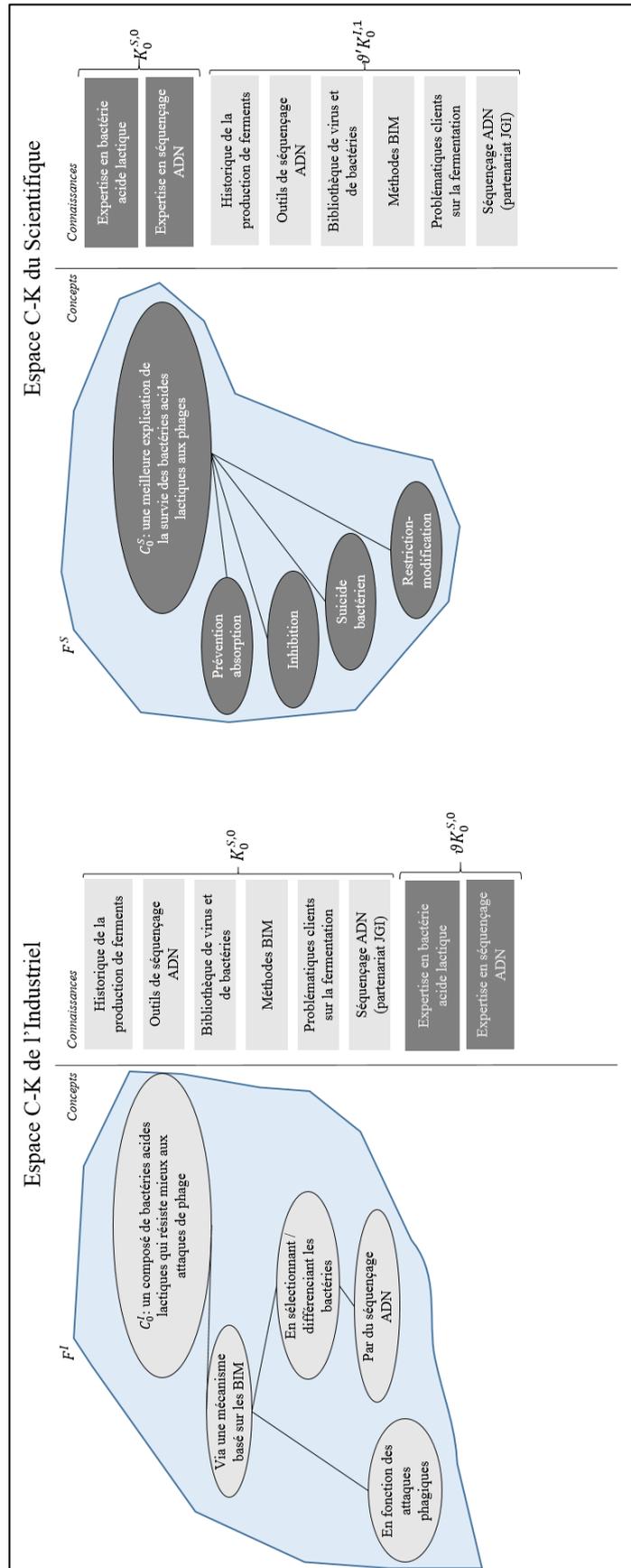


Figure 50 - Espaces C-K cas Danisco-DuPont (t=1)

- **Effets de l'échange de connaissances et du *k-reordering* :**

Suite à la première étape de *building*, il nous faut désormais déterminer si les conditions B-1 ou B-2 liées à la préservation de l'indépendance des espaces C-K sont vérifiées. Pour procéder, dans cette partie, nous allons numéroter les étapes telles que représentées graphiquement en Figure 51.

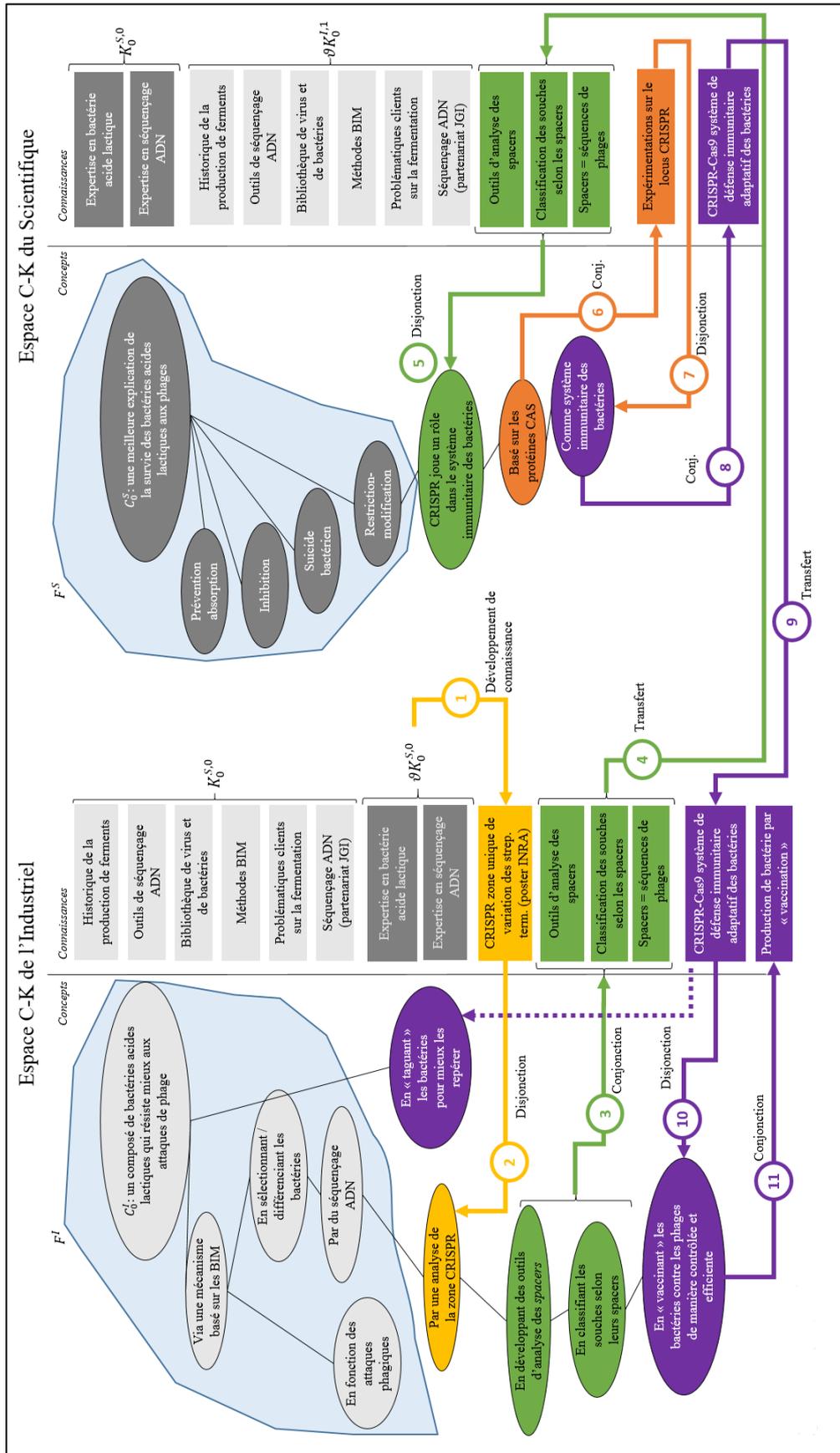


Figure 51 - Espaces C-K cas Danisco-DuPont (phase building)

Ainsi, le concepteur industriel cherche à différencier par séquençage ADN les différentes souches de bactéries acides lactiques. À cette époque, le séquençage ADN reste une tâche complexe et l'équipe doit accéder à de nouvelles connaissances pour pouvoir le réaliser. En particulier, en septembre 2002, P. Horvath est présent à la principale conférence scientifique sur les bactéries acides lactiques aux Pays-Bas (7th *symposium on Lactic Acid Bacteria*, 1-5 sept – source V1). Il assiste à une présentation de chercheurs de l'INRA⁷⁵ qui ont développé un test PCR du locus CRISPR (appelée à l'époque SPIDR) sur *Streptococcus thermophilus*. Or, en multipliant le test PCR sur plusieurs souches de cette même bactérie, ils observent que seul le locus CRISPR varie dans les différents séquençages, ce qui intéresse particulièrement l'équipe de recherche de Danisco. En effet, si le locus CRISPR est le seul élément du génome d'une bactérie acide lactique qui varie entre les différentes souches, alors il faut probablement creuser cet élément pour différencier les souches (étape N°1) :

« So I took those pictures [of the INRA poster] in 2002 and used this information in order to develop also some tools. But the issue was that the genome sequenced by INRA was not publicly available at that time. And this is also why, we get into genome sequencing. » (P. Horvath, V1)

On observe ici une première disjonction dans le C-K du concepteur industriel (étape N°2) : pour différencier et sélectionner les souches de bactéries par du séquençage ADN, il faut observer le locus CRISPR. Pour faire un focus sur le locus CRISPR, l'équipe développe un test PCR (étape N°3) qui permet de « zoomer » uniquement sur cette zone, à partir du séquençage global fourni par le partenariat avec le JGI (voir ci-dessus) :

« So based on this available genome we designed a PCR primer and we started to genotype strains from our collection, the Danisco collection at that time. We had several hundreds, if not thousands of strains to analyze. And by doing this sequencing we obtained an outstanding dataset. » (P. Horvath, V3).

Le locus CRISPR est composé de *repeats* (ie. les suites de bases identiques) et des *spacers* (ie. suites de bases entre les *repeats* et différentes). Pour différencier les souches, l'équipe développe un outil Excel afin de supprimer les *repeats* et visualiser uniquement les *spacers* (étape N°3):

⁷⁵ Bolotin & al. (2002), Multilocus characterization of different strains of *step. Thermophilus*, *step. Vestibularis*, *step. Salivarius*.

“So the first one is obviously the genotyping that we can do while amplifying and sequencing CRISPR regions. We had the pleasure to develop some excel based tools that helped us a lot to do this analysis. And this typing was successfully applied to a large number of species. Not only food bacteria but also bacteria of medical importance such as *e.coli*, *salmonella* and lot of others.” (P. Horvath, V3)

Ici, il faut souligner que la bactérie *Streptococcus thermophilus* est particulièrement intéressante pour l'étude de CRISPR. Une bactérie peut contenir plusieurs locus CRISPR. Or, *Streptococcus thermophilus* est d'un type bien particulier et contient quatre locus différents, ce qui garantit une plus grande variété de données que si l'étude avait été menée sur d'autres types de bactéries. Le concepteur industriel collecte alors plusieurs séquençages de régions CRISPR et cherche, pour répondre au C0 industriel, à les différencier et les classifier. Grâce aux outils d'analyses développés, on obtient ce type de visualisation (Figure 52): chaque ligne correspond ici à une souche de *Streptococcus thermophilus* différente, avec une suite donnée de *spacers* parfois identique, parfois différente.



Figure 52 - Représentation et classification des *spacers* sur un séquençage (source: présentation V3)

Or, rappelons ici que l'objectif du concepteur industriel est bien de concevoir des combinaisons de bactéries acides lactiques plus résistantes aux phages. Donc le concepteur industriel classe les souches en fonction des *spacers* et les groupe en fonction de leur résistance connue au phage (ie. historique des phases de BIM). Or, compte tenu

des échanges de connaissances, le concepteur scientifique accède à ces données (étape N°4). En observant les différences de *spacers*, le concepteur scientifique est en mesure de proposer un nouveau concept théorique : les *spacers* pourraient avoir un rôle dans la résistance aux phages (étape N°5) :

*This is when the group [...] has **the “EUREKA” moment**. It is when they make the realization that those genotyping groups, those various groups of strains are resistant or sensitive to different group of bacteriophages. And that is when we had the opportunity to realize that there are maybe a link, hypothetically, there may be a link between CRISPR genotype on one hand and the phage sensitivity genotype on the other hand. **This is where our story switches here** to try to look at if there is a link or not. (R. Barrangou, V3)*

Or, ici on rebascule véritablement dans le C-K du concepteur scientifique. L'équipe cherche à comprendre à quoi correspondent les *spacers* et a par ailleurs accès à la base de données des virus identifiés. Ils observent alors que les *spacers* constituent en fait des séquences ADN de phages (ou plasmides) :

*“And we had this beautiful visually, intriguing and mysterious array of repeats, back to back to back to back to back 32 times in his chromosome and it looked interesting. But we didn't have any clue as to what it did, and what the functionalities may be. So we just looked at it. It looked cool, and then we looked away. And that was it. [...] Back in the day, people focus primarily on the repeat part because it was the conserved part. **And ironically, people used to think that, the spacer part are like jump. It was random gibberish that was inconvenient. But by random chance, we saw homology to viral sequences. And we saw them repeatedly over and over and over and over again.**” (R. Barrangou, V6)*

Ainsi, on observe ici une partition expansive en dehors de la zone de fixation : le locus CRISPR serait un système immunitaire adaptatif où les *spacers* seraient des fragments d'ADN ou de plasmides de phages. Il faut maintenant opérer une conjonction, prouver que cette théorie potentielle est vraie :

*“Now, it suggests, **it doesn't prove anything**. That there may be a correlation between the crisper content and the ability of the strain to be resistant to the virus. And that prompted us to do a series of three experiments to try to investigate whether there is or not, a link between CRISPR and cell resistance.” (R. Barrangou, V6).*

Plus précisément, pour tenter de comprendre le fonctionnement du locus CRISPR (étape N°6), le concepteur scientifique va mener une série d'expérimentations. L'équipe scientifique

utilise alors le modèle de *Streptococcus thermophilus* DGCC7710 qui a été mis en production en 1989 (source V1, V4). En avril, 1990, la souche avait fait l'objet d'une attaque phagique virulente par un virus appelé 858 que l'équipe scientifique séquence en 2006. Un BIM avait alors été créé DGCC7778, lui-même attaqué par un autre phage en 1999, nommé 2972 et séquencé par l'équipe scientifique en 2004 (source V1, V4). En possédant les séquences ADN du virus, l'équipe scientifique comprend que les *spacers* du locus CRISPR correspondent à l'ADN du virus :

« Et la chance que nous avons à l'époque lorsqu'on a réalisé ce fait était que nous disposions également du génome du virus, donc la séquence ADN du virus dans laquelle on a pu constater que les spacers S1 et S2 dérivait directement de l'ADN du virus. » (P. Horvath, V4)

« We do the experiment five different times, and consistently, the bacteria acquired a spacer that contains a sequence from the virus and became resistant. So what if I take it away? You lose the resistance » (R. Barrangou, V5)

Afin de réaliser ces expérimentations, l'équipe fait également appel à des ressources externes, à leurs partenaires de l'Université de Laval au Québec :

« So based on this observations about DGCC7710, we decided to reproduce those experiments so that we called our friends and collaborator Sylvain Moinneau at University Laval in Quebec in order to help us on this topic and to do experiments independently from what we already did » (P. Horvath, V4)

Ces expérimentations conduisent à démontrer que les bactéries ont un système immunitaire adaptatif basé sur le locus CRISPR et où les protéines Cas jouent un rôle clé. Ces éléments vont conduire à la rédaction du papier scientifique qui sera publié dans *Science* (S2).

Ces éléments ont des retombées pour le concepteur industriel : il y a à nouveau échange de connaissances (étape N°9). En effet, cette connaissance supplémentaire suggère qu'il est possible de piloter plus efficacement les BIM en menant cette opération uniquement face à des phages pour lesquels l'industriel sait par avance que l'immunité n'est pas acquise (étape N°10). C'est à cette étape qu'il y a indépendantisation des connaissances, puisque c'est une connaissance initiale de l'industriel qui lui revient enrichi. Soulignons d'ailleurs que sans la connaissance scientifique supplémentaire « les bactéries ont un système immunitaire adaptatif basé sur CRISPR-Cas9 », l'étape 10 n'est pas possible. Il est donc possible d'optimiser le processus de BIM, c'est ce qui sera proposé dans le brevet de 2005 (étape N°11) : la « CRISPérisation », donc basée sur un système totalement naturel :

« C'est un processus que l'on a qualifié de « CRISPérisation » et qu'on peut rapprocher d'une vaccination. Nous vaccinons nos bactéries contre les virus, et ça ne fait pas intervenir d'ingénierie génétique. [...] Nous partons d'une souche qui est sensible à un phage, nous ajoutons le phage, nous obtenons des BIM, des variants résistants. Et au lieu de prendre n'importe lequel, nous regardons au niveau de leur ADN, parmi la population survivante, lesquelles ont intégré de nouveaux spacers dans un ou plusieurs loci CRISPR. Et cette acquisition de nouveaux spacers, au sein même de CRISPR, est corrélée au gain de résistance vis-à-vis du phage qui a été utilisé dans le challenge. Et à condition que l'on dispose toujours d'autres virus qui sont toujours actifs, virulents, contre le variant, nous pouvons faire des itérations. » (P. Horvath, V2)

Cette innovation industrielle est essentielle comme l'indique R. Barrangou :

« This natural process of crisperization of dairy cultures, that is natural, has been implemented in the industry for 5 years ». (R. Barrangou, V4)

La découverte conduira à générer de nouveaux concepts en rupture chez le concepteur industriel. Par exemple le marquage génétique naturel qui consiste à effectuer plusieurs opérations de BIM successives de façon contrôlée, ce qui va conduire la souche à avoir une sorte de « code barre » lié à l'ordre dans laquelle elle a été exposée aux phages :

« Et au final, nous pouvons isoler des bactéries qui dérivent toutes du même ancêtre et qui ont un contenu en nouveau spacer différent. Et plus on procède à ce genre d'itération [...] plus l'ensemble des séquences de spacer nouveaux est unique dans le monde vivant. [...] C'est une application de marquage génétique naturelle. Elle a une grande importance dans l'industrie alimentaire puisque ces bactéries peuvent être revendiquées comme ayant été générées dans nos laboratoires. » (P. Horvath, V2)

Cette découverte constitue une invention innovante déposée en mai 2006 par l'équipe (B2, voir Figure 53).

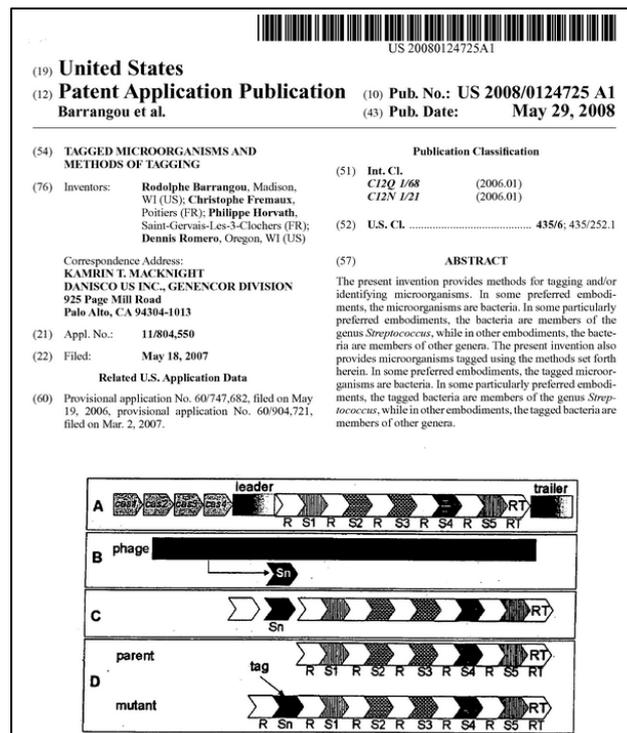


Figure 53 - Brevet sur le marque génétique naturel 2006

D'autres applications ont été ensuite déterminées par DuPont-Danisco (R2), ainsi que de nombreuses autres découvertes scientifiques subséquentes sur CRISPR-cas9 et son fonctionnement, en particulier via des collaborations académiques après la publication de l'article de 2007 (P3, P4, P5, R1).

En termes de modélisation en C-K, on remarque qu'il y a une constante indépendance des deux espaces des concepts : il n'y a, à aucun moment, hybridation des concepts, mais bien des échanges de connaissances bidirectionnels à partir d'avancées industrielles et d'avancées scientifiques. Le cas respecte donc la condition B-2 et on ne rebascule pas dans une logique de *matching*. Toutefois, pour valider la présence du modèle à double impact simultané, il faut en valider les conditions B-2.a et B-2.b. sur le déroulé du modèle.

Premièrement, la condition B-2.a. suppose que la connaissance supplémentaire acquise en période 1 par l'un des concepteurs permet d'opérer une conjonction en dehors de la zone de fixation. Dans le cas DuPont-Danisco, on notera que le procédé s'opère en deux temps. Les connaissances scientifiques transférées au concepteur industriel (expertise sur le génotypage d'ADN, bactéries acides lactiques) poussent à une expansion de connaissances (K → K). En effet, P. Horvath participe à la conférence sur les bactéries acides lactiques et apprend que la zone du locus CRISPR est la seule qui varie dans les génotypes ADN de différentes souches

d'une même bactérie. Or, c'est bien cette première étape qui génère la première disjonction en dehors de la zone de fixation (étape N°2). En effet, on peut ici indiquer qu'analyser la zone CRISPR pour la différenciation des souches bactériennes est un concept particulièrement en rupture au début des années 2000. Ainsi, on va considérer la condition B-2.a. respectée : l'échange de connaissances génère une disjonction en dehors de la zone de fixation, puis une conjonction.

Deuxièmement, pour être dans un modèle à double impact simultané, il faut également respecter la condition B-2.b, c'est-à-dire que la connaissance résultante de conjonction d'un des concepteurs doit être transférée à l'autre acteur et générer une nouvelle disjonction. Dans notre cas, ce sont à la fois les outils développés pour différencier les souches, mais aussi l'observation industrielle que le nombre et le type de *spacers* varient selon les souches, dont on sait qu'elles résistent différemment aux phages, soit la connaissance transférée au concepteur scientifique (étape N°4). Or c'est bien en réinterprétant cette « anomalie » scientifique que le concepteur scientifique va faire l'hypothèse que le locus CRISPR joue un rôle dans le système immunitaire des bactéries, soit un concept que l'on peut sans difficulté considérer comme en dehors de la zone de fixation scientifique (le rôle du locus CRISPR étant alors inconnu). Comme l'indique J. Banfield (chercheuse et collègue de J. Doudna) ou F. Mojica :

« What an idea, a piece of the genome of your predator now stuck in your genome so you can recognize it in the future. » (J. Banfield, V5)

« Bacteria have memories. They are able to remember invaders. Recognize them, and kill them. That was really fantastic. » (F. Mojica, V5)

Ainsi, cette disjonction va permettre d'aboutir à valider la connaissance « les bactéries ont un système immunitaire adaptatif basé sur CRISPR-Cas9 » (étape N°8). On a donc bien validé la condition B-2.a.

Troisièmement, on constate ici qu'il y a un cercle vertueux qui se met en place puisqu'on obtient encore un nouveau transfert (étape N°9) qui va conduire le concepteur industriel à développer les méthodes de « CRISPRisation » ou de « tagging naturel » (étape N°10 -11). On pourrait d'ailleurs encore discuter des découvertes scientifiques suivantes du concepteur scientifique (par exemple, le rôle des protospacers).

Dans la section suivante, nous revenons brièvement sur les apprentissages et les limites de ce cas d'étude.

3.3. Synthèse des apprentissages du cas et de la modélisation C-K

L'objectif de ce cas était de mettre en lumière les mécanismes sous-jacents au modèle de couplage dit à double impact simultané présenté dans la section ci-dessous. En effet, comme notre démarche est basée sur la proposition d'un modèle formel, il nous fallait tout d'abord tester empiriquement la validité du modèle. Pour cela, nous avons choisi un cas particulièrement original : la découverte de CRISPR-Cas9 comme mécanisme de défense immunitaire adaptatif des bactéries, et ses applications dans un contexte industriel particulier.

Nous avons pu montrer que le cas respectait l'ensemble des conditions, pourtant restrictives, du couplage à double impact simultané, à l'exception de l'effet du *k-reordering* qui n'a pas été démontré, mais qui ne constitue pas un point bloquant dans la démonstration.

Premièrement, nous avons pu mettre en lumière la pertinence des trois axiomes : l'Axiome 1 relatif à la nature particulière des concepts du concepteur industriel et du concepteur scientifique, l'Axiome 2 concernant la présence de fixations et l'Axiome 3 concernant la logique de *matching – building*. Nous noterons que l'Axiome 1 se valide au prix d'une séparation artificielle des C-K : dans notre cas, l'équipe de R&D de DuPont-Danisco s'implique à la fois dans le C-K de l'industriel et dans le C-K du scientifique. Pourtant, il est intéressant de noter que cette séparation permet d'explicitier les relations entre ces deux espaces de conception. Cela suggère également que pour obtenir une logique de couplage à double impact simultané dans un laboratoire de R&D industriel, sans relation avec un OPR, il est nécessaire d'avoir un engagement scientifique fort. Notons à ce titre que le slogan de DuPont est « *the miracles of scienceTM* ».

Deuxièmement, nous avons montré que les conditions qui permettent de passer en phase de *building* (M-1 et M-2) étaient respectées, c'est-à-dire qu'il n'y avait pas de possibilité de transfert évident de connaissances de l'un des acteurs vers l'autre pour favoriser une conjonction immédiate (M-1), et qu'il n'y a pas d'hybridation des concepts (M-2). Concernant la première proposition, on notera que l'état des connaissances scientifiques et industrielles ne permettait pas une telle approche, notamment car au début des années 2000, le séquençage ADN est une activité coûteuse et nouvelle (même si nous pouvons la considérer en fixation, car il y a un fort engouement pour ces méthodes). Nous avons également montré qu'il n'y avait pas d'hybridation des concepts : les espaces de conception sont bien délimités.

Troisièmement, nous avons pu montrer que le cas respectait dans la phase de *building* les conditions associées au couplage à double impact simultané. En effet, l'amorce par le partage de connaissance paraît ici relativement artificielle, car il s'agit d'une même équipe de R&D.

Toutefois, il y a bien une logique de *défixations croisées* : la disjonction dans l'un des espaces C permet la disjonction de l'autre. Ici, on a bien une disjonction dans l'espace du concepteur industriel sur l'analyse de CRISPR et l'obtention de données particulières sur le classement des souches par résistance phagique, qui va conduire le concepteur scientifique à envisager CRISPR comme un mécanisme de défense immunitaire des bactéries. Ici, on peut considérer que cette donnée, qui est réinterprétée par le concepteur scientifique comme une anomalie scientifique, est particulièrement originale. En effet, il est peu probable qu'une telle découverte puisse avoir lieu dans un autre environnement que l'industrie : la découverte scientifique est notamment permise par la richesse de la base de données sur l'historique des BIM et des attaques phagiques. Il y a donc bien eu un phénomène *d'indépendantisation de la connaissance*. Ce sont les connaissances de « l'industriel » sur les spacers et les outils d'analyses CRISPR-Cas0 qui sont enrichies d'une théorie scientifique sur les systèmes immunitaires des bactéries par le scientifique, puis réintégrées par l'industriel pour provoquer la disjonction – conjonction de la « Crisperisation ». On retrouve donc bien cette notion de circulation des connaissances dans le processus. Nous pouvons donc conclure sur la pertinence du modèle pour décrire les différentes étapes cognitives du raisonnement.

Enfin, explorons les écarts au modèle formel, au-delà de la limite du *k-reordering* évoquée ci-dessus. Premièrement, on notera qu'il y a davantage d'étapes d'expansions de connaissances et de partitions expansives que ce qui était prédit dans notre modèle (voir les étapes 5, 6 et 7 par exemple). Cela signifie que le modèle n'est pas « automatique », mais nécessite une forte volonté d'exploration des acteurs afin de générer des partitions et des connaissances radicalement nouvelles. Deuxièmement, on soulignera le cercle vertueux de ces défixations croisées : il y a des allers-retours constants entre les disjonctions-conjonctions dans chacun des espaces. Nous n'en avons documenté ici que quelques-uns, mais si nous explorions le cas post-2007, il semblerait que ces mouvements vertueux se poursuivent. Or, ces deux éléments nous conduisent à supposer que la logique double-impact simultané nécessite des échanges de connaissances très fréquents et intenses entre les concepteurs, ici facilités par le fait qu'il s'agissait d'une même équipe de R&D. Il est probable que cet enjeu soit plus fort pour des relations OPR – industrie par exemple.

Ainsi, après avoir présenté un cas d'étude approfondi du modèle de couplage entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits, processus et services pour le couplage à double impact simultané, nous revenons sur les conclusions du modèle formel des couplages et nos apprentissages au regard de nos questions de recherche.

4. Retour sur le modèle formel et effets sur les questions de recherche

Dans cette section, nous revenons sur les résultats de ce Chapitre en les mettant en exergue avec les paradoxes développés au Chapitre 1 et l'analyse de la littérature du Chapitre 2. Nous discutons ensuite des effets de cette analyse sur les autres questions de recherche.

4.1. Apports du modèle formel des couplages

Dans cette section, nous avons développé un modèle formel qui tentait de répondre à notre première question de recherche : *comment modéliser un couplage à double impact simultané entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits, procédés ou services* ? L'enjeu était d'établir théoriquement la possibilité d'un couplage à double impact simultané, dans un cadre qui permettrait de décrire les cas plus traditionnels que nous avons discutés dans les Chapitres 1 et 2 (couplages dérivés d'une logique linéaire, et couplages relevant de la science résolutoire). Nous nous sommes appuyés pour cela sur les théories de la conception, dont nous avons démontré la pertinence pour répondre à ces enjeux. À l'issue de notre modélisation, quels sont nos apprentissages ?

Notre modélisation nous a conduits à considérer qu'un couplage constitue une interaction entre un *concepteur scientifique* et un *concepteur industriel*, qui disposent de leurs propres espaces de conception et qui opèrent chacun une démarche d'exploration dans l'inconnu pour concevoir (1) une *théorie scientifique nouvelle*, et (2) un *produit, un procédé ou un service innovant*. L'intérêt de notre modèle est qu'il n'est pas essentialisant : le concepteur scientifique peut être issu d'un OPR ou d'une entreprise, tout comme le concepteur industriel. Nous avons également proposé une nouvelle typologie des couplages possibles entre concepteurs industriels et concepteurs scientifiques pour la science et l'innovation (Tableau 19).

Couplage	Logique de fonctionnement	Performances sur les fixations (cas archétypal)	Performances sur l'hybridation (cas archétypal)	Leviers managériaux
Classe des couplages séquentiels	Il existe, ou sont conçues, des intersections entre des connaissances « demandées » par l'un des concepteurs, disponibles et transférables par l'autre concepteur (à l'origine ou à l'issue d'une phase de <i>building</i>). Ces couplages engendrent peu ou pas d'échanges bidirectionnels entre les parties.	- Pas de sortie des zones de fixations*	+ Pas d'hybridation des concepts	Capacité à repérer ou concevoir des « trous de connaissances » chez l'autre partie auxquels les connaissances « répondent », capacité d'absorption de la connaissance transférée.
Classe des couplages hybridés	Il existe, où sont conçues, des intersections entre les concepts des deux concepteurs qui recherchent un concept générique sur lequel mener ensemble, une co-exploration. Ces couplages engendrent un échange bidirectionnel, limité par l'objet même de la co-exploration.	- Renforcement* croisé des fixations	- Hybridation des concepts	Capacité à déterminer un objectif commun et à favoriser l'absorption croisée de connaissances originales
Couplage à double impact simultané	Il n'y a pas d'intersections évidentes entre les concepts et connaissances des parties, et les parties s'engagent dans des échanges de connaissances bidirectionnels tout en préservant l'autonomie de leurs espaces de conception. On suppose que les connaissances supplémentaires conduisent à un mécanisme de disjonction-conjonction pour une partie, dont la connaissance résultante est transférée à l'autre partie, engendrant pour cette dernière également, un processus de disjonction-conjonction.	+ Défixations croisées	+ Pas d'hybridation des concepts	Capacité des parties à préserver leurs espaces de conception, à favoriser l'absorption croisée de connaissances, les plus originales et indépendantes possibles entre les parties.

*les cas présentés ici sont archétypaux. Dans le modèle, il est possible d'obtenir des situations avec défixations, ou d'éviter le renforcement croisé des fixations.

Tableau 19 - Synthèse des types de couplages

Dans cette approche, les couplages séquentiels font écho au modèle linéaire, et les couplages hybridés à la science résolutoire, sans pour autant s'y substituer. En effet, nous apportons une dimension nouvelle par une approche cognitive et la logique d'exploration dans l'inconnu qui a nécessité la proposition de nouvelles notions : couplages séquentiels, couplages hybridés.

Premièrement, la classe des couplages séquentiels peut notamment illustrer les démarches issues du modèle linéaire en illustrant par exemple le cas d'une découverte scientifique réalisée dans un OPR (notamment fondamentale), et pour laquelle les scientifiques cherchent des terrains d'application dans l'industrie (voir le cas de la chaussure de trail avec le

graphène). Cette classe de couplage semble n'avoir que très peu de retombées scientifiques (ie. le savoir scientifique est déjà conçu) et entraîne peu de sorties de zones de fixations pour les deux acteurs. D'une part, ces éléments font écho au Paradoxe 1 (voir Chapitre 1) concernant les résultats jugés en dessous des attentes des modèles de transfert (ie. voir ici le non-effet sur les zones de fixations) malgré les efforts conséquents des pouvoirs publics. D'autre part, ils font également échos aux éléments issus de la littérature en sciences de gestion (voir Chapitre 2). En effet, concernant le cas des industriels, la littérature souligne les difficultés à absorber les connaissances scientifiques et à les intégrer dans les processus d'innovation. Ici, le modèle prédit qu'il faut d'abord un concept préexistant pour que la connaissance nouvelle fasse « sens » dans l'organisation. Le modèle rend également compte des difficultés du management de l'expertise : comment piloter l'expertise pour générer des concepts qui permettraient de voir le jour à partir d'un transfert futur de connaissances scientifiques ? Concernant les scientifiques, le modèle permet de rendre compte du fait que beaucoup de chercheurs puissent se considérer comme engagés auprès de l'industrie, mais qu'ils sont très peu nombreux à dériver de cet engagement des outputs tangibles (co-publications, brevets, par exemple). En effet, comme nous l'avons montré, le couplage de transfert ne conduit pas à des retombées scientifiques significatives (ie. la production de connaissance est antérieure à l'interaction), sauf rares exceptions.

Deuxièmement, la classe des modèles hybridés illustre le cas de travaux de science résolutoire où scientifiques et industriels s'efforcent de définir des objectifs communs dans le cadre d'un projet conjoint. Or, compte tenu des jeux de pouvoir, cette relation va conduire soit à travailler sur des concepts particulièrement orientés sur la découverte scientifique (forme de mécénat par l'industrie), soit orientés sur le développement de produits (forme de résolution de problèmes industriels locaux). Ces éléments mettent en lumière les phénomènes d'insatisfaction, de frustration potentielle des acteurs – on peut y voir en creux les difficultés de contractualisation par exemple – tant les acteurs sont censés avoir, à l'origine, des objectifs conceptuels distincts (théories scientifiques nouvelles d'une part, nouveaux produits, procédés, services d'autre part). Or, nous avons postulé que l'hybridation nuit aux performances de double impact. De plus, le phénomène de renforcement croisé des fixations peut être porteur des dérives conscientes ou inconscientes (voir Paradoxe 2), ou de risques de prédation par l'industrie de la recherche partenariale (voir Paradoxe 3). Enfin, le modèle formel fait également écho à la littérature. D'une part, il permet d'illustrer les cas où les activités de développement apparaissent comme une interférence néfaste au regard du bon déroulement de la science, ici par le phénomène de renforcement croisé des fixations. D'autre part, il permet de

rendre compte (comme déjà évoqué dans le couplage précédent) que bien que beaucoup de chercheurs soient engagés avec l'industrie, très peu d'entre eux dégagent de cette relation des éléments tangibles (co-publications, co-brevets), ce qui s'explique dans le modèle notamment par l'hybridation (ie. cas de concepts relevant plutôt du concepteur industriel dans le mix).

Troisièmement, le modèle formel permet d'envisager le cas du couplage à double impact simultané en décrivant ses conditions d'existence et son fonctionnement. Si le modèle peut conduire à une logique de défixation croisée et d'indépendantisation des connaissances porteuse de performances scientifiques et industrielles prometteuses, il faut souligner le haut niveau de sophistication de ses conditions d'existence : pas de *matching*, préservation des espaces de conception, échanges bidirectionnels de connaissances constants, originalité et indépendance des connaissances partagées. Les conditions paraissent difficiles à mettre en œuvre. Pourtant nous avons pu illustrer pertinemment le modèle à partir du cas d'étude sur la découverte de CRISPR-Cas9 comme système immunitaire adaptatif des bactéries chez DuPont-Danisco, et ses applications subséquentes pour l'industriel. Le modèle permet également de considérer ces conditions comme des leviers managériaux à promouvoir pour faciliter ce couplage qui semble prometteur. D'une part, le modèle vient compléter l'analyse de Goldstein et Narayanamurti (2018) et Narayanamurti et Odumosu (2016), à la fois en présentant des conditions détaillées de cette logique de double impact simultané, mais aussi en apportant une démonstration empirique précise, sur un cas en dehors d'une institution publique. Rappelons que les travaux de Narayanamurti et Odumosu (2016) constituent davantage une proposition d'organisation de la science à partir de cas empiriques illustratifs, et que les travaux de Goldstein et Narayanamurti (2018) démontrent empiriquement la logique de double impact simultané dans une institution publique très spécifique. Ici, nous dépassons ces résultats en proposant un modèle explicatif de ces phénomènes. De plus, le modèle formel répond en partie à une limite de la littérature concernant les apports industriels pour favoriser des découvertes scientifiques : le modèle prédit qu'il faut maximiser l'originalité et l'indépendance des connaissances transférées.

4.2. La modélisation comme levier d'exploration des relations science

– industrie :

Au regard de nos questions de recherche, que reste-t-il à explorer ? Comment le modèle formel permet-il d'affiner nos analyses ?

Tout d'abord, nous pouvons conclure ce Chapitre en indiquant que nous avons répondu ici à notre première question de recherche. Nous avons alors indiqué que si nous étions capables de démontrer l'existence, formellement et empiriquement, du modèle à double impact simultané, cela ouvrirait de nouvelles perspectives de recherche.

Notre prochain objectif est donc de nous intéresser à la représentativité de ce couplage à double impact simultané. En effet, nous avons mis à jour une nouvelle catégorie de couplage : mais est-elle pertinente au-delà de quelques cas isolés comme ARPA-E au DoE ou CRISPR-Cas9 chez DuPont-Danisco ? Constitue-t-elle une catégorie assez représentative pour apporter un regard neuf sur certaines situations qui étaient parfois considérées comme relevant plutôt du modèle linéaire, ou plutôt de la science résolutoire ? Compte tenu des conditions de réalisation particulièrement exigeantes du couplage à double impact simultané, l'hypothèse d'observer un grand nombre de cas semble peu robuste. Toutefois, peut-être qu'il existe des cadres institutionnels qui pourraient favoriser ces conditions ? Et si oui, quelle serait la dynamique dans le temps de ce type de couplage ?

Afin de capitaliser sur les éléments de ce Chapitre 4, nous proposons d'étudier la possibilité de couplages à double impact simultané dans des situations qui sont traditionnellement présentées comme relevant de la classe des couplages séquentiels et d'autres relevant davantage de la classe des couplages hybridés. Pour le premier cas, nous pouvons nous intéresser à la recherche dite « fondamentale », réalisée dans des OPR et transférée à l'industrie. Dans un second cas, nous nous intéresserons à la recherche dite « appliquée », c'est-à-dire des collaborations de recherche entre OPR – Industrie sur des sujets d'intérêt commun. En effet, si nous arrivons à réinterpréter certaines situations archétypales de ces deux types de couplages à l'aune du couplage à double impact simultané, c'est que cette nouvelle catégorie serait d'intérêt pour l'analyse des relations science – industrie. Il sera donc important de développer des méthodes pour observer ce couplage, et étudier sa dynamique historique, sa représentativité, et ses performances en termes scientifique et industriel par comparaison avec les autres types de couplage.

Soulignons que, dans le modèle formel, nous avons utilisé, pour étudier les performances de chaque type de couplage, les notions de sorties de zones de fixations et d'hybridation des concepts. Comme nous l'avons montré avec le cas d'étude, seule une analyse particulièrement fine par la logique du cas d'étude permet de décrire les fixations des concepteurs, et la possibilité d'obtenir un concept qui sort ou non de la zone de fixation conduit nécessairement à débat. Or, comme indiqué dans le Chapitre 2, pour étudier les performances scientifiques et industrielles, la littérature en sciences de gestion a développé des méthodes

particulièrement avancées par l'analyse des publications et des dépôts de brevet. Si nous souhaitons étudier la pertinence à grande échelle du couplage à double impact simultané, nous proposons dans les Chapitres suivants de capitaliser sur ces méthodes pour étudier les performances des différents couplages. Il faudra toutefois développer des méthodes ingénieuses pour réussir à démontrer l'existence du double impact simultané, à partir de ces proxys classiques. La performance scientifique sera approchée par les publications scientifiques, et la performance d'innovation industrielle par le biais de l'invention, et donc des brevets.

Ainsi, la question de recherche N°2 est la suivante : *quelle dynamique historique et quelles performances pour le modèle de couplage à double impact simultané dans les couplages relevant traditionnellement de la « recherche fondamentale » et de la « recherche appliquée »* ? Elle sera couverte par les essais N°1 & N°2 présentés au Chapitre 5.

Soulignons également que nous avons envisagé une troisième question de recherche si nous arrivions à démontrer la possibilité d'un couplage à double impact simultané. Celle-ci devait porter sur les conditions et cadres institutionnels pour favoriser les performances du couplage à double impact simultané, notamment en comparaison de couplages plus classiques. Soulignons que le modèle formel a permis de mettre en exergue de nombreuses conditions relatives à chacun des cas de couplages, et qui ont pu être testées sur un cas isolé par l'étude sur CRISPR-Cas9. Mais, à plus grande échelle, et toujours en capitalisant sur les méthodes éprouvées dans la littérature basée sur les brevets et les publications scientifiques, peut-on discuter de la validité de ces conditions ? Les raffiner ? En envisager de nouvelles ? En particulier, deux axes principaux semblent intéressants à creuser.

Premièrement, nous avons évoqué qu'une limite notable de la littérature est la difficulté à comprendre les interactions entre production de connaissances scientifiques dans l'industrie et applications dans des produits, procédés ou services innovants (Zahra, Kaul et Bolívar-Ramos, 2018), une problématique qui fait aussi le lien avec la question du management de l'expertise. Face à ces enjeux, il nous semble intéressant d'étudier plus en profondeur les notions d'indépendance et d'originalité des connaissances, condition essentielle du couplage à double impact simultané et mis en exergue dans le modèle formel. Une étude dans l'industrie pourrait donc s'avérer intéressante, d'autant que nous avons montré que le modèle formel permet d'engager la réflexion sur le cas d'interactions fécondes science – industrie chez un industriel (voir le cas DuPont-Danisco).

Deuxièmement, nous avons indiqué au Chapitre 1 qu'un des éléments importants qui nous amenait à réfléchir au double impact simultané est l'occurrence de différentes crises ou

transitions qui nécessitent de produire à la fois des découvertes scientifiques en rupture, et des produits, procédés ou services innovants, et ce dans un temps record. On peut citer par exemple les crises environnementales, mais la survenue de la crise du covid-19 pendant cette thèse nous pousse à creuser ce cas particulier. Dans cette dernière crise, il faut comprendre comment fonctionne le virus, mais aussi développer des médicaments ou des vaccins pour y faire face. Or, le modèle formel démontre que le couplage à double impact simultané pourrait permettre des performances supérieures aux autres modèles tout en permettant ces doubles avancées scientifiques et industrielles au cours d'un même projet. Il est donc intéressant de se demander si les crises conduisent de façon endogène à favoriser des couplages à double impact simultané, et quels sont les conditions et cadres institutionnels qui devraient être mis en place pour le soutenir.

Ainsi, la question de recherche N°3 est la suivante : *quels cadres institutionnels et conditions pour favoriser les performances du modèle de couplage à double impact simultané ?* Cette question est traitée à partir des essais N°3 & N°4 présentés au Chapitre 5.

Nous souhaitons apporter ici une précision au lecteur. Le modèle formel présenté dans ce Chapitre 4 est le résultat d'une construction théorique tout au long du parcours de thèse. Or, le couplage à double impact simultané est plutôt un concept que nous avons pu induire des débats science - industrie (voir Chapitre 1) et auquel nous avons donné scientifiquement corps, à travers la mise en lumière de ses conditions d'existence, de son fonctionnement (Chapitre 4). Le seul modèle qui s'en rapproche a trait aux travaux de Goldstein et Narayanamurti (2018) et Narayanamurti et Odumosu (2016) et l'introduction de la notion de « découverte-invention simultanée ». Ainsi, pour la rédaction des quatre essais qui constituent cette thèse, bien que des réflexions aient été conduites sur le couplage à double impact simultané en parallèle (voir Annexe 2), nous ne pouvions nous y référer in extenso. La stratégie privilégiée a donc été de s'appuyer sur les construits préexistants pour mener nos analyses empiriques, sans reprendre directement le vocable utilisé dans ce présent Chapitre. Dans le Chapitre 5 par exemple, nous présentons le couplage à double impact simultané en nous référant au modèle de « découverte-invention simultanée ».

Notre objectif est donc désormais de contextualiser les quatre essais qui composent la thèse au regard des apports de ce présent Chapitre 4.

Synthèse du Chapitre 4

Ce chapitre visait à répondre à notre première question de recherche qui portait sur le développement d'un modèle formel de couplage à double impact simultané.

Pour cela, nous avons d'abord décrit nos objectifs de modélisation en les mettant en exergue avec les éléments issus des paradoxes modernes des relations science – industrie (Chapitre 1) et les apports de la littérature (Chapitre 2). Nous proposons alors de s'appuyer sur une approche cognitive novatrice, en se basant sur les théories de la conception et plus précisément la théorie C-K (Hatchuel et Weil, 2003, 2009). Ce choix s'appuie sur des avancées récentes de ce champ recherche : modélisation des interactions entre deux concepteurs pour la co-exploration dans l'inconnu (Gillier *et al.*, 2010), modélisation du raisonnement scientifique (Hatchuel *et al.*, 2013), etc.

Nous avons proposé un cadre formel pour modéliser les couplages science – industrie. Nous caractérisons ici les interactions entre *l'espace des concepts*, et *l'espace des connaissances* de deux concepteurs, l'un scientifique et l'autre industriel. Pour tenir compte des spécificités de cette relation, nous proposons la notion de *préservation ou d'hybridation des espaces de conception* : nous postulons que scientifiques et industriels cherchent à produire des concepts de natures distinctes. Un concept partagé constituerait ainsi un mix des deux approches qui nuirait in fine aux performances respectives des acteurs. Par ailleurs, lesdites performances sont également envisagées par le prisme des fixations.

Ces éléments nous amènent à proposer trois modèles de couplage. Premièrement, *la classe des couplages séquentiels*, où une connaissance pré-existante est transférée d'un acteur à l'autre afin de répondre à un « trou de connaissance ». Deuxièmement, *la classe des couplages hybridés*, où les acteurs co-explorent malgré un risque de voir leurs fixations se transférer ou se renforcer. Enfin, un troisième cas se détache : le *couplage à double impact simultané* où les acteurs s'engagent dans un processus d'échanges bidirectionnels de connaissances qui les conduit à un phénomène de *défixations croisées* et *d'indépendantisation des connaissances*. La relation permet alors d'enrichir les connaissances échangées de nouvelles propriétés, en favorisant les sorties de zone de fixation.

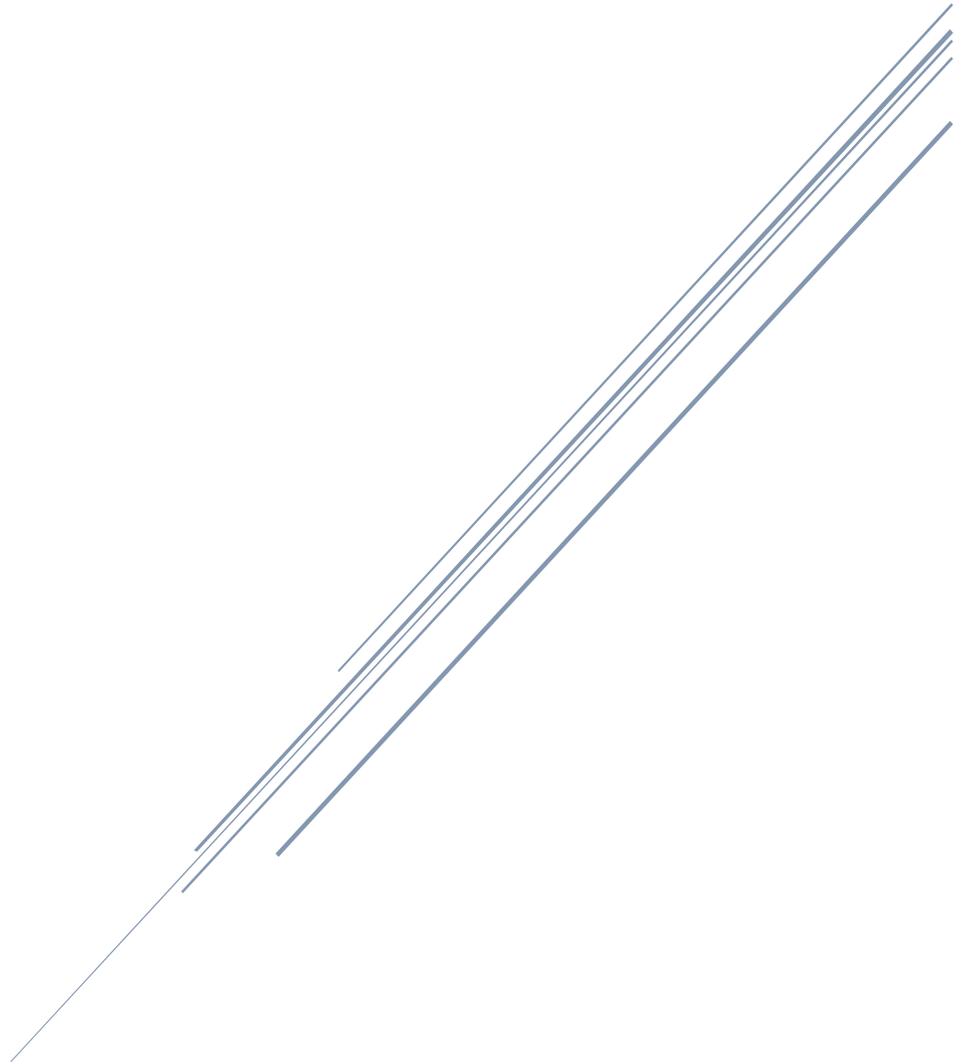
Soulignons que *la classe des couplages séquentiels* et *la classe des couplages hybridés* sont respectivement héritées du modèle linéaire et de la science résolutoire, mais sans s'y substituer : nous ajoutons ainsi une perspective nouvelle par le recours à une approche cognitive.

Par ailleurs, nous avons démontré la pertinence du modèle pour le cas le plus en rupture, le *couplage à double impact simultané*. En recourant à un cas d'étude approfondi sur la découverte du mécanisme de défense immunitaire adaptatif des bactéries chez DuPont-Danisco, et ses applications chez cet industriel, nous avons pu démontrer la validité des différentes conditions du modèle.

Nous pouvons désormais étudier la pertinence à grande échelle de cette nouvelle catégorie de couplage et ses conditions, notamment institutionnelles.

CHAPITRE 5 :

TESTS EMPIRIQUES ET CADRES INSTITUTIONNELS POUR LE DOUBLE IMPACT SIMULTANE



Ce chapitre vise à répondre aux questions de recherche N°2 et N°3 et s'appuie sur les quatre essais qui composent la thèse. Nous proposons une mise en contexte des différents essais présentés en partie 2, à partir de tableaux de synthèse et d'une discussion sur la façon dont ils viennent éclairer nos questions de recherche.

CHAPITRE 5 :

TESTS EMPIRIQUES ET CADRES INSTITUTIONNELS POUR LE DOUBLE IMPACT SIMULTANE

1.	<i>Tests empiriques du modèle de couplage à double impact simultané</i>	281
1.1.	Dynamique historique et performances des couplages à double impact dans la « recherche fondamentale » (Essai N°1).....	282
1.2.	Performances des couplages à double impact dans la « recherche appliquée » (Essai N°2).....	284
1.3.	Le double impact simultané : une nouvelle catégorie théorique d'intérêt pour la compréhension des relations science – industrie.....	286
2.	<i>Conditions et cadres institutionnels pour le couplage à double impact simultané</i>	290
2.1.	Double impact simultané et régimes de dynamique de l'expertise dans l'industrie : le cas des entreprises du pétrole et du gaz (Essai N°3).....	292
2.2.	Conditions et cadres institutionnels pour le double impact simultané en période de crise (Essai N°4) ..	293
2.3.	Régimes d'actions et cadres institutionnels pour promouvoir le double impact simultané.....	296
	<i>Synthèse du Chapitre 5</i>	300

Ce Chapitre 5 a pour objectif de présenter successivement nos résultats relatifs aux Questions de Recherche N°2 et N°3. La première porte sur la dynamique historique et les performances du couplage à double impact simultané. La seconde traite des conditions et cadres institutionnels pour promouvoir et renforcer ce type de couplages. Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que ce Chapitre vise à contextualiser les quatre essais qui composent cette thèse et qui sont présentés en Partie 2.

1. Tests empiriques du modèle de couplage à double impact simultané

Au Chapitre précédent, nous avons proposé, à partir du modèle formel, une conceptualisation détaillée du couplage à double impact simultané, au regard d'autres, plus traditionnels (couplages séquentiels, couplages hybridés). L'objectif de cette section est de conduire une réflexion sur la dynamique historique et les performances des couplages à double impact simultané, en référence à la deuxième Question de Recherche (QR2) : *Quelle dynamique historique et quelles performances pour le modèle de couplage à double impact simultané dans les couplages relevant traditionnellement de la « recherche fondamentale » et de la « recherche appliquée » ?*

Afin de répondre à cette question de recherche, nous avons sélectionné deux situations empiriques archétypales des relations science - industrie. La première se focalise sur la recherche dite « fondamentale », par une étude approfondie des lauréats du Prix Nobel dans les domaines de la médecine, de la physique et de la chimie. À première vue, cette situation semble relever des couplages séquentiels. En effet, la connaissance initiale, ici scientifique, serait d'abord développée sans liens particuliers avec l'industrie, puis transférée dans un second temps à un concepteur industriel pour lui permettre de réaliser un concept pré-existant. Pourtant, nous chercherons à déceler des cas de couplages à double impact simultané, et à en étudier la dynamique historique sur longue période. La seconde situation se focalise davantage sur la recherche dite « appliquée » par une analyse détaillée des doctorats collaboratifs OPR – industrie à travers le dispositif des Conventions Industrielles de Formation à la Recherche (CIFRE). Là encore, à première vue, cette situation semble archétypale, mais cette fois des cas de couplages hybridés : des sujets de recherche d'intérêts communs entre scientifique et industriels. Dans cette situation, nous chercherons là encore à déceler des cas de couplages à double impact simultané, et nous en étudierons les performances scientifiques et industrielles.

1.1. Dynamique historique et performances des couplages à double impact dans la « recherche fondamentale » (Essai N°1)

Dans cette section, nous proposons d'introduire l'essai N°1 qui vise à analyser la dynamique historique des différents modèles de couplage science – industrie, dans le cadre des découvertes les plus fondamentales de l'histoire des sciences.

Ici, notre stratégie d'analyse empirique des différents couplages est basée sur une sélection de cas dont l'impact scientifique majeur est réputé connu. En effet, nous analysons les carrières de lauréats du Prix Nobel de Chimie, de Médecine et de Physique. Comme annoncé, nous pouvons considérer que ces cas relèvent majoritairement des couplages séquentiels : un scientifique qui fait une découverte dans le laboratoire de son OPR et qui va la transférer à un industriel post-découverte. On pourrait évoquer ici le cas discuté plus haut de la synthèse du graphène qui a permis à Geim et Novoselov de recevoir en 2010 le Prix Nobel. Pourtant, nous cherchons ici à développer une méthode qui nous permettrait de déceler d'éventuels cas de couplages à double impact simultané parmi les découvertes associées à des lauréats du Prix Nobel. Plus précisément, nous testons la possibilité d'un mécanisme de disjonction – conjonction hors de la zone de fixation du scientifique, lié aux interactions de ce dernier avec un ou plusieurs industriels : une forme « d'inspiration par l'industrie ».

Dans cet essai, nous analysons la dynamique dans le temps des couplages à double impact simultané, et l'effet sur la carrière du lauréat en fonction du couplage dans lequel il s'inscrit. En effet, ce dernier élément nous permet de tester l'hypothèse de la préservation des espaces de conception : les lauréats ont-ils tendance à réorienter leurs travaux de recherche vers des enjeux plus appliqués (ie. donc hybridés) lorsqu'ils s'inscrivaient dans un couplage de type double impact simultané ?

Une synthèse de l'essai est proposée dans le Tableau 20 ci-dessous.

Thème	Détail
Nom de l'article	• <i>Another way to get the Nobel Prize: The role of the industry in the emergence of new scientific breakthroughs</i>
Auteurs	• Quentin Plantec, Pascal Le Masson, Benoît Weil
Présentations conférences	• V1 : Conférence <i>R&D Management 2020</i> , Dublin (soumis mais annulée Covid-19) • V2 : Conférence <i>DRUID 2020</i> , Copenhague (soumis mais annulée Covid-19) • V3 : Conférence <i>R&D Management 2021</i> , Dublin
Langue	• Anglais
Ce qui est connu	• Depuis les années 1980s, l'organisation de la science a connu de profondes transformations et les industriels se sont désengagés de la recherche scientifique interne (Arora, Belenzon et Patacconi, 2018 ; Pisano, 2010) • L'engagement académique est largement pratiqué et conduit en moyenne à une augmentation de la productivité scientifique (Bikard, Vakili et Teodoridis, 2019 ; Perkmann <i>et al.</i> , 2021) • Les collaborations OPR – industrie peuvent conduire à une réorientation de travaux fondamentaux vers des objectifs plus appliqués (Czarnitzki, Grimpe et Toole, 2015 ; Toole et Czarnitzki, 2010)

Ce qui reste à découvrir	<ul style="list-style-type: none"> • Le lien entre engagement académique et potentiel de découverte scientifique majeure n'est pas documenté (Perkmann <i>et al.</i>, 2021) • L'effet sur la carrière des « scientifiques stars » (Zucker, Darby et Armstrong, 2002) de l'engagement académique (ie. réorientation vers l'appliqué) n'est pas connu.
Questions de recherche	<ul style="list-style-type: none"> • Dans quelles mesures les découvertes scientifiques fondamentales majeures sont réalisées par des chercheurs engagés avec l'industrie ? • Quels sont les effets sur la diffusion des connaissances dans l'industrie et l'académie que ces découvertes aient été réalisées par des chercheurs engagés plutôt que par des chercheurs non-engagés ?
Cadre théorique	<ul style="list-style-type: none"> • Engagement académique
Hypothèses	<ul style="list-style-type: none"> • H1. Un nombre significatif de découvertes scientifiques majeures sont réalisées par des chercheurs engagés avec l'industrie • H2.a/b. L'engagement préalable à la découverte scientifique majeure a un impact négatif (b. ou positif) sur les performances post-publication majeure (en nombre et en qualité) • H3. a/b. L'engagement préalable à la découverte scientifique majeure conduit (b. ou non) à une réorientation vers des travaux appliqués
Données	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse des affiliations de 84 423 publications académiques dans des revues à comité de lecture, et de 5 207 familles de brevets d'invention, publiées et déposés par la cohorte quasi-complète des Prix Nobel de Physique, Chimie et Médecine (jusqu'en 2016). • Identification de la publication qui permet au lauréat d'obtenir son Prix (ie. « papier Nobel »).
Méthode	<ul style="list-style-type: none"> • Développement d'une méthode pour identifier « l'inspiration par l'industrie » • Analyse en statistique descriptive de l'engagement avec l'industrie prépublication (test de H1) • Analyse par un modèle de régression <i>difference-in-difference</i> (test de H2 et H3)
Principaux résultats empiriques	<ul style="list-style-type: none"> • Au total, env. 1/5 des Prix Nobel ont été « inspirés par l'industrie » pour leur découverte fondamentale qui leur permet d'obtenir le Prix Nobel, et la part des lauréats inspirés par l'industrie augmente (plus d'un lauréat sur deux sur la période des Prix 2010-2016 ; 28 lauréats sur 50) • Les Prix Nobel inspirés ont un premium de productivité scientifique post-découverte majeure en comparaison des lauréats non inspirés par l'industrie (validation H2.b) • Les Prix Nobel inspirés n'opèrent pas de réorientation de leurs travaux vers des projets plus appliqués post-découverte majeure, en comparaison des lauréats non inspirés par l'industrie (validation H3.b)
Implications théoriques	<ul style="list-style-type: none"> • L'engagement académique peut contribuer aux découvertes fondamentales les plus radicales du champ scientifique, sans conduire à une capture complète de la valeur par l'industrie et en favorisant la productivité ex-post.
Implications managériales	<ul style="list-style-type: none"> • Si on regrette parfois dans la Presse « l'âge d'or » des laboratoires de R&D industriels tels que ceux de IBM ou des Bell Laboratories et leurs larges cohortes de Prix Nobel, il n'y a pourtant jamais eu autant de Prix Nobel inspirés par l'industrie. Il est nécessaire de se questionner sur les apports industriels liés à ces succès scientifiques majeurs.

Tableau 20 - Synthèse de l'article N°1

Ainsi, ces éléments nous permettent de démontrer que le mécanisme de disjonction-conjonction en dehors de la zone de fixation lié à l'échange bidirectionnel de connaissances et au *k-reordering* dans les relations science – industrie, n'est pas un cas rare, et ce même dans les recherches les plus fondamentales. En effet, nous avons montré que 1/5 des Prix Nobel sont « inspirés par l'industrie » et s'inscrivent dans un couplage à double impact simultané. Nous attestons donc que ce type de couplage n'est pas marginal. De plus, il est en forte augmentation, notamment sur les derniers lauréats à recevoir le Prix, avec des différences notables par discipline. Le phénomène semble notamment plus ancien en physique, alors que nous observons un fort rattrapage de la médecine sur la période récente. Par ailleurs, les éléments sur la performance nous permettent d'indiquer qu'il n'y a pas de réorientation des travaux des lauréats inspirés par l'industrie vers des objectifs appliqués (relativement à leurs pairs) : il n'y a pas

hybridation, mais bien préservation des espaces de conception de chacun des concepteurs, ce qui confirme l'inscription de ces lauréats dans un couplage à double impact simultané.

Ces éléments sont prometteurs pour discuter de l'importance du couplage à double impact simultané. Mais nous devons revenir plus précisément ici sur les effets sur les performances : l'enjeu principal du second essai qui compose ce Chapitre, et qui se focalise sur une tout autre situation relevant davantage des couplages hybridés.

1.2. Performances des couplages à double impact dans la « recherche appliquée » (Essai N°2)

L'enjeu de cette seconde section est d'introduire l'essai N°2, qui vise à étudier les performances de différents modèles de couplage dans le cadre d'une situation classique de recherche partenariale : les doctorats collaboratifs OPR – industrie, ici en s'intéressant au dispositif des thèses CIFRE. En effet, dans la section précédente, nous avons indiqué que les cas de couplage à double impact simultané n'étaient pas marginaux pour les découvertes fondamentales les plus majeures. Mais qu'en est-il dans des cas plus « appliqués », où le risque d'hybridation des espaces de conception apparaît fort ? Est-ce que des couplages à double impact simultané existent et sont performants en termes d'impact scientifique et industriel ? Comme nous l'avons indiqué dans le Chapitre 4 précédent, les performances des différents modèles de couplage avaient été envisagées au regard des effets de sorties de zone de fixation, un élément difficile à repérer à grande échelle. Il nous faut donc revenir sur les performances de chacun des types de couplages, en utilisant une méthode plus classique d'analyse des brevets déposés et des publications scientifiques produites dans le cadre de recherche partenariale. Toutefois, il est nécessaire de développer une méthode nouvelle pour qualifier les différents types de couplages, et repérer ainsi les cas de double impact simultané.

Dans l'essai présenté dans cette section, le vocable est modifié pour se rapprocher des construits de la littérature sur l'engagement académique : les modèles dits « research-push » sont proches des couplages séquentiels, les modèles dits « market-pull » sont proches des couplages hybridés et les modèles de « découverte-invention simultanée » sont proches des couplages à double impact simultané. Nous avons ainsi développé une méthode permettant d'extraire le modèle de couplage dominant dans 635 thèses CIFRE lancées en 2015 et nous analysons les performances scientifiques et industrielles de ces différents types de couplage. Une synthèse de l'essai est proposée dans le Tableau 21.

Thème	Détail
Nom de l'article	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Market-pull or research push? Effects of research orientations on university-industry collaborative Ph.D. projects' performances.</i>
Auteurs	<ul style="list-style-type: none"> • Quentin Plantec, Benjamin Cabanes, Pascal Le Masson, Benoît Weil
Présentations conférences	<ul style="list-style-type: none"> • V1 : Conférence <i>R&D Management 2019</i>, Paris • V2 : Conférence <i>Academy of Management 2021</i>, Philadelphia
Langue	<ul style="list-style-type: none"> • Anglais
Ce qui est connu	<ul style="list-style-type: none"> • L'engagement académique favorise en moyenne la productivité scientifique (ex., Bikard, Vakili et Teodoridis, 2019 ; Perkmann <i>et al.</i>, 2021) • Il y a une très forte hétérogénéité des performances au niveau individuel (Van Looy, Callaert et Debackere, 2006) qui semblent contingentes aux caractéristiques des projets de recherche (Callaert <i>et al.</i>, 2015 ; Rentocchini <i>et al.</i>, 2014) • Il existe plusieurs grands types d'orientation des travaux de recherche : orientation tirée par le marché (ie. <i>market-pull</i>), poussée par la science (ie. <i>research-push</i>), ou découverte-invention simultanée • Les doctorants peuvent collaborer avec des industriels pendant leur thèse et générer dans ce cadre des inventions en rupture (Buenstorf et Heinisch, 2020)
Ce qui reste à découvrir	<ul style="list-style-type: none"> • Les collaborations OPR – industrie restent contentieuses et leurs effets devraient être creusés dans différents contextes (Murray, 2010) • Les effets de l'orientation des recherches dans le cadre de l'engagement académique sur les performances commerciales (ie. brevets) et scientifiques (ie. publications) devraient être creusés dans divers contextes disciplinaires, organisations et au niveau des projets de recherche (Callaert <i>et al.</i>, 2015 ; Tijssen, 2018) • Le rôle des doctorants dans la production de connaissances scientifiques et d'innovations reste largement inexploré (Salimi, Bekkers et Frenken, 2015a ; Shibayama, 2019)
Question de recherche	<ul style="list-style-type: none"> • Quel est l'effet du choix d'orientation des recherches (ie. <i>market-pull</i>, <i>research-push</i>, découverte-invention simultanée) <i>ex ante</i>, sur les performances industrielles et scientifiques <i>ex post</i> dans les doctorats collaboratifs OPR – industrie ?
Cadre théorique	<ul style="list-style-type: none"> • Engagement académique
Hypothèses	<ul style="list-style-type: none"> • H1. L'orientation <i>research-push ex ante</i> conduit à des performances scientifiques <i>ex post</i> accrues dans les doctorats collaboratifs OPR – industrie, par rapport à l'orientation <i>market-pull</i> • H2. L'orientation <i>market-pull ex ante</i> conduit à des performances commerciales <i>ex post</i> accrues dans les doctorats collaboratifs OPR – industrie, par rapport à l'orientation <i>research-push</i> • H3. L'orientation <i>découverte-invention simultanée ex ante</i> conduit à des performances de double impact <i>ex post</i> accrues dans les doctorats collaboratifs OPR – industrie, par rapport à l'orientation <i>research-push</i> et l'orientation <i>market-pull</i>
Données	<ul style="list-style-type: none"> • 635 projets de thèse CIFRE de 2015, avec pour chaque thèse le contrat de collaboration (clauses contractuelles, résumé du projet de thèse, montants financiers engagés), 3 questionnaires de fin de CIFRE complétés par le doctorant, le directeur de thèse et le responsable industriel, et le formulaire de demande de CIFRE
Méthode	<ul style="list-style-type: none"> • Développement d'une méthode pour coder les 635 projets en fonction de l'orientation des recherches en double-aveugle • Analyse de la performance par un modèle de régression logistique avec 25 variables de contrôle par projet (modèle similaire à Goldstein et Narayanamurti, 2018)
Principaux résultats empiriques	<ul style="list-style-type: none"> • Les projets avec orientation <i>ex ante research-push</i> conduisent à des performances scientifiques <i>ex-post</i> similaires aux projets à orientation <i>market-pull</i> (invalidation de H1) • Les projets avec orientation <i>ex ante market-pull</i> conduisent à des performances commerciales <i>ex-post</i> supérieures aux projets à orientation <i>research-push</i> (validation de H2) • Les projets avec orientation <i>ex ante</i> de découverte-invention simultanée conduisent à des performances commerciales <i>ex-post</i> similaires aux projets à orientation <i>market-pull</i> mais des performances scientifiques <i>ex-post</i> supérieures aux deux autres orientations (validation partielle de H3)
Implications théoriques	<ul style="list-style-type: none"> • Les performances scientifiques et commerciales des doctorats collaboratifs OPR – industrie sont contingentes à l'orientation des recherches.
Implications managériales	<ul style="list-style-type: none"> • Les résultats enjoignent les partenaires des OPR et les industriels à chercher davantage à s'investir dans des projets à découverte-invention simultanée qui sont les plus performants en matière d'impact commercial et scientifique. • Les résultats invitent à considérer les connaissances originales de l'industrie qui permettent de défixer le scientifique (notamment dans le cas <i>market-pull</i> qui était réputé peu fécond en termes d'impact scientifique).

Tableau 21 - Synthèse de l'article N°2

Ainsi, ces éléments nous permettent de montrer que le couplage à double impact simultané, bien que plutôt rare par rapport aux autres modèles dans le panorama des thèses du dispositif CIFRE, est pourtant le type de couplage le plus performant sur le plan de l'impact scientifique et industriel. L'intérêt de cette étude est qu'elle adresse plusieurs types de disciplines et un grand nombre de situations, ce qui permet d'obtenir des résultats pertinents à grande échelle.

L'autre résultat intéressant de cet essai a trait à l'analyse des couplages hybridés, qui obtiennent des niveaux de performances scientifiques similaires aux couplages séquentiels, où la recherche initiale est réalisée sans interaction avec l'industrie. Ce résultat pourrait signifier que par rapport à notre modèle, même dans des cas hybridés, on pourrait imaginer que l'hybridation ne se fasse pas systématiquement aux dépens du scientifique, voire que les sorties de zones de fixations soient des cas moins rares qu'initialement envisagé. On retrouve ici l'idée qu'en partant d'un concept commun particulièrement appliqué, et en lien avec les produits de l'organisation, le concepteur scientifique arriverait à générer un mécanisme de disjonction-conjonction pour sortir de sa zone de fixation. Cela signifie, au regard du modèle formel, que les connaissances échangées sont assez originales pour dépasser le renforcement des fixations. Ces éléments incitent à aller plus loin et à mener des investigations complémentaires sur les conditions, notamment institutionnelles, inhérentes à ces relations.

1.3. Le double impact simultané : une nouvelle catégorie théorique d'intérêt pour la compréhension des relations science – industrie

Ainsi, cette première partie du Chapitre 5 visait à répondre à la Question de Recherche N°2 : *quelle dynamique historique et quelles performances pour le modèle de couplage à double impact simultané dans les couplages relevant traditionnellement de la « recherche fondamentale » et de la « recherche appliquée » ?*

Pour répondre à cette question de recherche, nous avons cherché à étudier plus précisément la dynamique du couplage à double impact simultané dans des situations archétypales majoritairement présentées comme relevant soit des classes de couplages séquentiels (« recherche fondamentale »), soit des classes de couplages hybridés (« recherche appliquée »). D'abord, nous avons conduit une analyse de la dynamique historique du double impact simultané dans les découvertes fondamentales des Prix Nobel. Ici, nous avons exploré des situations qui relèvent traditionnellement des couplages séquentiels, où la recherche serait effectuée d'abord sans liens avec l'industrie. Or, nous avons pu démontrer une forme

« d'anomalie » par rapport à ce modèle dominant : certains lauréats du prix Nobel ont eu des échanges avec l'industrie avant leur découverte majeure. Nous pouvons supposer que ces chercheurs se sont engagés dans des échanges bidirectionnels de connaissances avec l'industrie, qui ont pu favoriser une logique de disjonction-conjonction en dehors de leurs zones de fixations afin de leur permettre de proposer des concepts en rupture, c'est-à-dire de nouvelles théories scientifiques. Nous n'avons pas testé dans cette analyse l'effet rétroactif direct de la découverte sur l'industrie, que nous supposons ici existant. Mais nous avons pu aller plus loin en testant les possibilités d'hybridation des concepts à partir d'une analyse de la diffusion dans l'industrie des travaux. Il apparaît que les lauréats du Prix Nobel « inspirés par l'industrie » ne basculent pas davantage que les lauréats non-inspirés par l'industrie, dans une recherche qui serait considérée appliquée post-découverte. Cela signifie que sur le long terme, ces chercheurs ont réussi à conserver l'indépendance de leurs espaces de conception dans leurs liens avec l'industrie.

De plus, cette étude nous renseigne sur l'ordre de grandeur des couplages à double impact simultané dans la recherche fondamentale. Nous montrons qu'environ 20% des lauréats de la cohorte quasi-complète des lauréats du Prix Nobel étaient engagés dans ce type de couplage pour leur découverte fondamentale. Mieux encore, on observe un renforcement de ce couplage sur longue période puisque 50% des lauréats sur la dernière période (2010 – 2016) étaient impliqués dans des couplages à double impact simultané (voir Figure 54). Enfin, on observe également des dynamiques différentes par discipline : il semble y avoir une tendance historique sur longue période de couplages à double impact simultané en physique, tandis que ce type de couplage est très récent (mais très dynamique) en médecine. Dans le cas des thèses CIFRE étudiées, le modèle à double impact simultané est moins représentatif : seuls 13% des cas étudiés relèvent de ce couplage. Toutefois, ces deux études tendent à montrer que la catégorie couplage à double impact simultané n'est pas négligeable et son étude s'avère nécessaire.

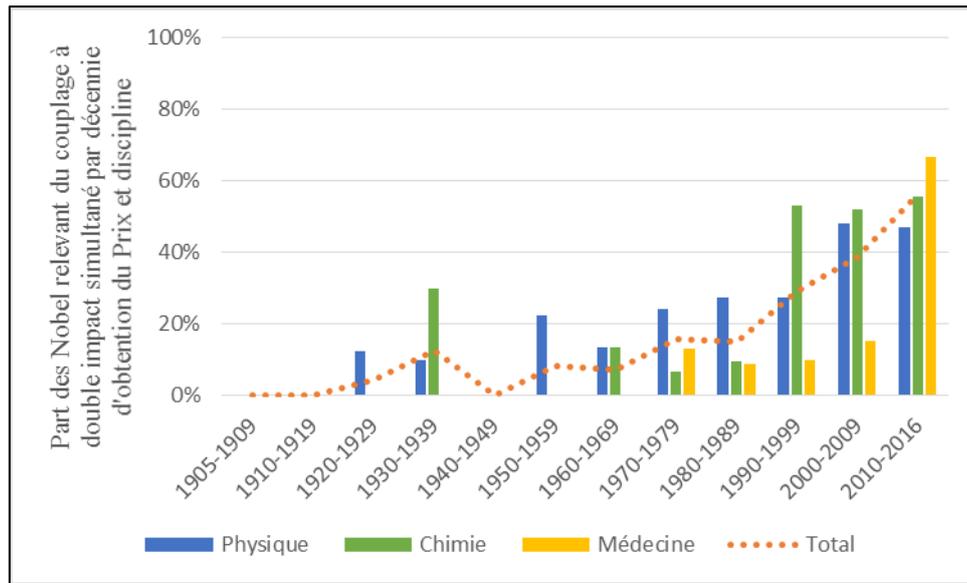


Figure 54 - Évolution de la part des Prix Nobel inspirés par l'industrie par décennie d'obtention du Prix et discipline

On peut légitimement s'interroger sur la généralisation de ces résultats car notre étude porte sur une cohorte très spécifique, « l'élite scientifique » (Zuckerman, 1977). Nous pourrions par exemple nous demander si ces lauréats ont des compétences particulières leur permettant de s'inscrire dans des couplages à double impact simultané et ainsi d'en tirer des bénéfices importants pour leurs travaux scientifiques. Etudier cette question sur une cohorte plus importante de scientifique, intégrant des non-stars, s'avèrerait une piste post-thèse intéressante.

Deuxièmement, nous nous sommes également intéressés aux performances des différents modèles de couplage. Les éléments de l'essai N°1 étaient prometteurs en termes de performances académiques post-découvertes des lauréats inspirés par l'industrie. Mais dans cette seconde partie, nous avons sélectionné un cas plutôt dans la recherche appliquée, en nous intéressant aux thèses CIFRE. L'intérêt de notre démarche est d'avoir mis au point une méthode permettant de repérer les différents couplages à partir des résumés des travaux de recherche. Nous avons mesuré, en lien avec la littérature, les performances scientifiques en nous intéressant au nombre de publications dans chaque projet ou en prenant par exemple les prix de thèse. Nous avons approché les performances industrielles à partir des brevets déposés par l'entreprise en lien avec la thèse. Schématiquement, nous pouvons représenter les performances (et les hypothèses initiales) des différents types de couplages comme suit (Figure 55) :

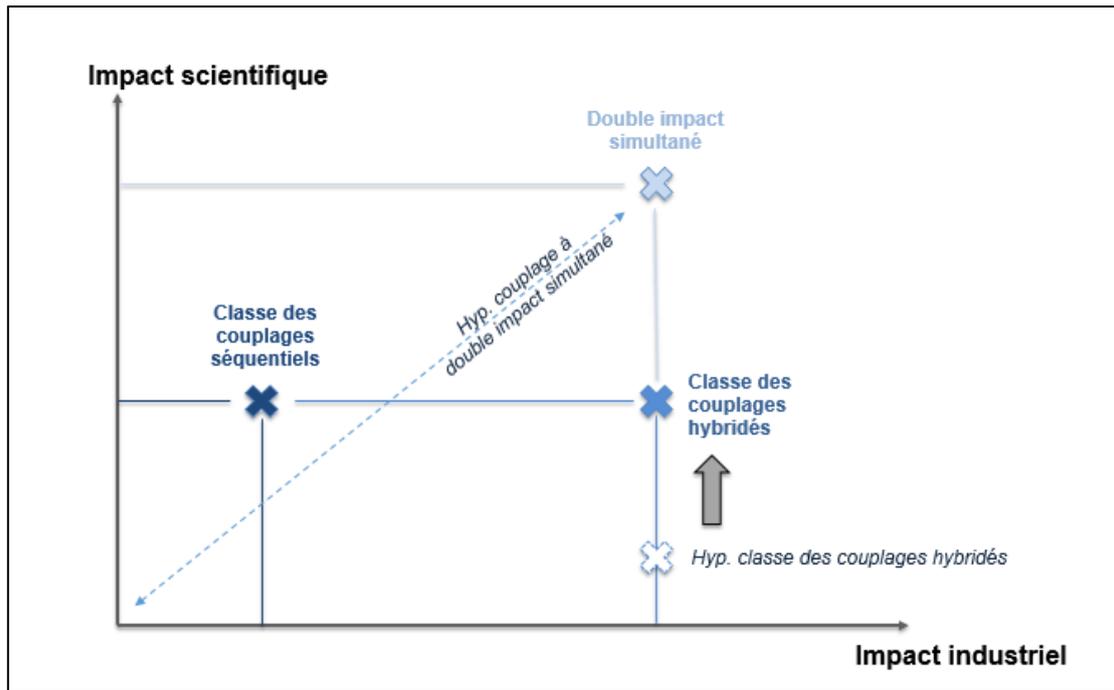


Figure 55 - Synthèse des performances des couplages dans la recherche "appliquée"

Ici, comme prédit par le modèle formel au Chapitre 4, le couplage à double impact simultané est celui qui maximise les performances sur le plan du double impact, bien que, comme il s'agit d'une nouvelle catégorie, ses performances restaient à démontrer. En effet, ce couplage domine les deux autres classes de modèle en termes scientifiques, et a des performances industrielles similaires à la classe des couplages hybridés, la classe des couplages avec l'impact industriel le plus élevé.

L'étude amène un second résultat étonnant qui a trait aux performances scientifiques de la classe des couplages hybridés. En effet, nous avons évoqué le risque d'un phénomène de renforcement croisé des fixations dans notre modèle formel, bien qu'il fût possible si les connaissances échangées en phase de *building* étaient suffisamment originales, de sortir de la zone de fixation. Toutefois, il fallait que l'originalité des connaissances soit supérieure à la fixation de l'autre partie qui pouvait alors agir comme une force de rappel. Or, ici, il semble que le cadre institutionnel du dispositif CIFRE favorise un échange bidirectionnel de connaissances fécond qui permet de favoriser la défixation scientifique, ce qui expliquerait les performances scientifiques supérieures à l'hypothèse de départ.

Ainsi, cette section constitue un tournant dans nos réflexions sur les couplages à double impact. En effet, nous avons mis en exergue l'importance théorique potentielle du couplage à double impact simultané dans le Chapitre 4. Mais, dans cette section, nous apportons la démonstration empirique à la fois que ce modèle est d'une importance non négligeable dans bon nombre de situations pourtant considérées comme « classiques », mais aussi qu'il permet un très haut niveau de performances de double impact, scientifique et industriel, en comparaison des autres types de couplages. Ce dernier élément nous encourage donc à plébisciter ce couplage. Nous pouvons désormais nous intéresser aux conditions et cadres institutionnels qui permettraient de stimuler ce modèle. Ces éléments font l'objet de la Question de Recherche N°3 et de la section suivante.

2. Conditions et cadres institutionnels pour le couplage à double impact simultané

L'objectif de cette section est de répondre à la troisième Question de Recherche (QR3) : *Quels cadres institutionnels et conditions pour favoriser les performances du modèle de couplage à double impact simultané ?* Dans la section précédente, nous avons montré que le couplage à double impact simultané était un modèle d'intérêt. D'une part, il permet de décrire finement et de façon adéquate un nombre non négligeable de situations empiriques particulières (et dont la part est en augmentation). D'autre part, nous avons pu démontrer que ce couplage permettait des performances scientifiques et industrielles accrues, comme prédit par le modèle formel. Pour prolonger la réflexion, nous souhaitons désormais tenter de mieux comprendre les conditions de performances associées au couplage à double impact simultané, les façons de le privilégier au travers de cadres institutionnels particuliers. Par exemple dans le cas des thèses CIFRE, il est tout à fait envisageable que le cadre mis en place par l'ANRT favorise des échanges de connaissances bidirectionnels féconds, et des phénomènes de défixations des acteurs. On peut évoquer ici, le temps long de ces projets de recherche (trois ans), ou encore l'importance pour les parties de s'accorder sur un projet suffisamment orienté vers la recherche scientifique pour permettre à la fois une soutenance de thèse par le doctorant à l'issue des trois ans, et une validation du projet par l'ANRT (environ 10% des projets sont écartés pour non-conformité avec les attentes).

Pour étudier ces phénomènes plus en profondeur, dans un premier temps, nous nous intéressons à des cas de couplage à double impact simultané dans l'industrie avec l'essai N°3.

En effet, l'un des intérêts majeurs du modèle formel est que nous pouvons discuter de relations entre OPR et industrie, mais aussi mieux comprendre la dynamique découverte scientifique – développement de produits, procédés ou services, uniquement chez l'un des acteurs institutionnels. Nous avons abondamment discuté le cas DuPont-Danisco au Chapitre 4, mais nous aurions aussi pu discuter le cas des Bell Laboratories par exemple, avec le système de découvertes-invention du transistor. Mais ici, nous souhaitons adopter une approche plus globale pour comprendre les leviers de performance à l'œuvre en considérant une industrie dans son ensemble, nous permettant alors l'adoption d'une approche plus quantitative.

Nous avons montré dans le Chapitre 2 que la gestion des compétences et de l'expertise est essentielle pour comprendre, dans l'industrie, les couplages entre activités scientifiques et activités de développement de produits, procédés et services. C'est donc précisément la thématique que nous souhaitons creuser ici : quel régime de dynamique de l'expertise favoriserait les couplages à double impact simultané ? Pour cela nous allons mener un cas d'étude dans l'industrie du pétrole et du gaz. Cette industrie a été choisie, car il s'agit d'une industrie pour laquelle les efforts de R&D se sont particulièrement accentués sur les trois dernières décennies du fait de changements structurels (Perrons, 2014). Ainsi nous proposons une méthode qui permet de repérer des cas de couplage à double impact simultané et de spécifier différents régimes de dynamique de l'expertise associés.

Dans un second temps, nous cherchons à engager une réflexion quant aux conditions et cadres institutionnels qui favorisent le double impact simultané en période de crise, des éléments présentés dans l'essai N°4. En effet, nous avons évoqué au Chapitre 1 qu'un modèle à double impact simultané serait d'intérêt face aux crises environnementales ou sanitaires par exemple, qui nécessitent à la fois des avancées en matière de développement de produits, procédés ou services nouveaux (par exemple des vaccins et des médicaments), mais aussi des découvertes scientifiques (compréhension du mode d'action des pathogènes, études épidémiologiques). La crise du Covid-19 qui est survenue au cours de cette thèse nous a poussés à creuser davantage ce sujet. Nous cherchons donc ici à comprendre quels cadres institutionnels et quelles conditions permettraient de favoriser le couplage à double impact simultané en période de crise. Nous discuterons plus précisément le cas d'industriels, impliqués dans la science notamment par le biais de la publication scientifique. Le cas choisi porte ici sur la recherche académique sur longue période sur les coronavirus.

2.1. Double impact simultané et régimes de dynamique de l'expertise dans l'industrie : le cas des entreprises du pétrole et du gaz (Essai N°3)

Dans cette section, nous cherchons à comprendre le rôle des régimes de dynamique de l'expertise dans les couplages à double impact simultané.

Dans le Chapitre précédent, nous avons par exemple étudié des cas où l'impact scientifique était certain en prenant le cas des lauréats du Prix Nobel. Ici nous allons procéder d'une manière relativement similaire en nous plaçant dans des cas où l'impact industriel est certain. Nous utilisons pour cela des brevets déposés dans l'industrie du pétrole et du gaz. Ici, nous développons une méthode qui permet de mesurer le degré de rupture par rapport à l'histoire des sciences et des techniques de chaque invention (et appelée dans l'article « originalité technologique »). Or, obtenir une invention avec un haut degré de rupture scientifique et technique signifie que nous sommes dans un cas de couplage à double impact simultané : il y a à la fois impact industriel et impact scientifique. Dès lors, ce qui nous intéresse c'est d'étudier les régimes de dynamique de l'expertise qui peuvent permettre de maximiser cette rupture scientifique. Pour cela, nous allons reprendre la littérature classique de l'analyse de l'invention combinatoire, et ce en nous intéressant plus spécifiquement à la structure de la base de connaissances du concepteur. Comme nous traitons de données de brevets, nous allons utiliser les classifications technologiques comme proxy de l'expertise ce qui va nous permettre de mettre en exergue différents régimes possibles de combinaisons des expertises pour concevoir une invention. Nous analyserons ensuite lesquels de ces régimes permettent de favoriser le double impact simultané. Une synthèse de l'essai N°3 est proposée dans le Tableau 22.

Thème	Détail
Nom de l'article	• <i>Impact of knowledge search practices on the originality of inventions: a study in the oil & gas industry through dynamic patent analysis</i>
Auteurs	• Quentin Plantec, Pascal Le Masson, Benoît Weil
Présentation conférence	• V1 : Conférence <i>Academy of Management 2020</i> , Vancouver (en ligne)
Publication	• <i>Technological Forecasting & Social Change</i>
Langue	• Anglais
Ce qui est connu	<ul style="list-style-type: none"> • Les firmes doivent développer leurs compétences internes et des compétences externes pour innover (ex., Helfat, 1994) • La base de connaissances d'une organisation a une structure particulière (ex., Yayavaram et Ahuja, 2008 ; Yayavaram et Chen, 2015) • Les nouvelles connaissances favorisent l'originalité technologique, à l'inverse des stratégies d'exploration (ex., Arts et Fleming, 2018)
Ce qui reste à découvrir	<ul style="list-style-type: none"> • La littérature considère les connaissances « locales » ou « distantes » de façon binaire, alors qu'il y a un continuum en fonction de la structure de la base de connaissances (Le Masson, Weil et Hatchuel, 2010a ; Yayavaram et Chen, 2015) • Il n'existe pas de modèle formel qui fait le lien entre la conception d'une invention, et la base de connaissances de l'organisation.

Questions de recherche	<ul style="list-style-type: none"> • Comment les entreprises accèdent-elles à des connaissances pour concevoir de nouvelles inventions, en fonction du contenu et de la structure de leurs bases de connaissances, et du ressourcement de connaissances externes ? • Quelles pratiques d'accès à des connaissances favorisent l'originalité technologique des inventions ?
Cadre théorique	<ul style="list-style-type: none"> • Innovation combinatoire
Données	<ul style="list-style-type: none"> • 50 776 brevets d'invention déposés par les 16 firmes déposant le plus de brevets dans les secteurs du pétrole et du gaz.
Méthode	<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation des manières de concevoir de nouvelles inventions à partir de la base de connaissances d'une organisation par l'utilisation de la théorie des graphes. • Application de méthodes d'analyses de réseaux à partir de codes technologiques des brevets
Principal résultat théorique	<ul style="list-style-type: none"> • Nouvelle typologie des différentes façons de concevoir des inventions en fonction du contenu et de la structure des bases de connaissances de l'organisation : raffinement, clusterisation, absorption et recomposition.
Principaux résultats empiriques	<ul style="list-style-type: none"> • Les organisations du secteur pétrole et gaz sont hétérogènes dans la manière dont elles recourent à différents modes de combinaisons de connaissances pour inventer. • Le mode recomposition maximise l'originalité technologique des inventions, tandis que les modes absorption et raffinement minimisent l'originalité technologique.
Implications managériales	<ul style="list-style-type: none"> • Les performances des différents modes de combinaisons de connaissances invitent les organisations à envisager des façons différentes de manager des projets d'innovation ouverte (absorption de nouvelles connaissances) et de recourir à l'expertise interne pour briser les silos.

Tableau 22 - Synthèse de l'article N°3

Ainsi, dans cet essai N°3, nous avons pu mettre en exergue quatre types de régime de dynamique des expertises : raffinement, clusterisation, absorption et recomposition. Ces régimes ont été établis en fonction de la structure de la base de connaissances du concepteur. Or, nous avons montré que le régime qui favorisait le plus le couplage à double impact simultané était celui de recomposition qui consiste à dépasser les silos existants de l'organisation (et notamment fortement présents chez les industriels du pétrole et du gaz), et ce éventuellement en ajoutant des expertises qui sont externes à l'organisation.

Ainsi, ces éléments nous renseignent sur les régimes de dynamique de l'expertise à mettre en oeuvre pour favoriser le couplage à double impact simultané en nous invitant à réfléchir à des modèles de ressourcement externe qui permettent à l'organisation de capitaliser sur ses propres expertises indépendantes, plutôt qu'une simple logique d'absorption externe.

2.2. Conditions et cadres institutionnels pour le double impact simultané en période de crise (Essai N°4)

Dans cette section, nous présentons l'essai N°4 qui constitue une réflexion sur les cadres institutionnels et les conditions nécessaires au double impact simultané en période de crise.

Comme nous l'avons montré au Chapitre précédent, les couplages à double impact simultané permettent des performances de double impact supérieures aux autres régimes. Cela semble particulièrement intéressant en période de crise : ces couplages semblent pouvoir permettre de produire les savoirs scientifiques et de développer des produits, procédés et services qui vont permettre une sortie de crise rapide (ie. intérêt de la simultanéité). Nous

prenons ici l'exemple des coronavirus, un choix dicté par la crise du Covid-19 qui est survenue pendant ces travaux de thèse.

Pour obtenir un couplage à double impact simultané, cela signifie qu'un industriel est en mesure de capitaliser sur ses savoirs et ses compétences issus de la pratique du développement de produits, procédés et services, pour contribuer (potentiellement avec l'appui d'un OPR) à la recherche scientifique, et ce avec un impact fort. Il y a ensuite possibilité d'une boucle de rétroaction sur le développement de produit. C'est le cas que nous étudierons ici plus en profondeur en analysant les contributions à la science par l'étude des publications académiques des industriels sur les coronavirus. Nos analyses sont complétées par l'étude des brevets et des projets de vaccin. Ce qui nous intéresse ici, c'est de mieux comprendre les conditions et les cadres institutionnels qui favorisent l'impact scientifique pour ces industriels, une situation que nous interprétons ici comme un mécanisme de disjonction-conjonction en dehors de l'espace de fixation d'un concepteur scientifique.

Une synthèse de l'article N°4 est présentée dans le Tableau 23.

Thème	Détail
Nom de l'article	• Crises sanitaires et contributions industrielles à la recherche scientifique : le cas des coronavirus
Auteurs	• Quentin Plantec, Clément Sternberger, Pascal Le Masson, Benoît Weil
Présentation conférence	• VI : <i>Summer school on data & algorithms for science, technology and innovation studies</i> (KU Leuven, OEB), Louvain, Belgique (en ligne)
Soumission	• <i>La Revue Française de Gestion</i> (acceptée – en cours de publication)
Langue	• Français
Ce qui est connu	<ul style="list-style-type: none"> • Le modèle linéaire avec une division séquentielle des activités de recherche et de développement de produit est prévalent dans l'industrie pharmaceutique (Hamdouch et Perrochon, 2000). • L'industrie s'est désengagée massivement de la publication académique depuis les années 1980 (ex., Arora, Belenzon et Pataconi, 2018) • Il existe des arguments théoriques qui montrent que les relations OPR – industrie peuvent favoriser les découvertes scientifiques (ex., Bikard, Vakili et Teodoridis, 2019)
Ce qui reste à découvrir	• Effet des crises sur l'implication des industriels dans la recherche scientifique (ie. publications scientifiques), une question animée par les débats sur la crise actuelle du Covid-19.
Questions de recherche	<ul style="list-style-type: none"> • Quel est l'effet des crises sur les contributions des industriels à la recherche scientifique et les régimes d'actions qu'ils adoptent ? • Quels régimes d'actions sont les plus propices pour générer des percées scientifiques, et de nouveaux vaccins ou médicaments ?
Cadre théorique	• Littérature sur les relations OPR – Industrie pour la recherche scientifique (ex., Murray, 2010)
Données	<ul style="list-style-type: none"> • 18 954 articles scientifiques publiés dans des revues scientifiques entre 2000 et 2020 et portant sur le thème des coronavirus • 1 622 brevets portant sur les coronavirus déposés et publiés entre 2000 et 2020 • 267 projets de vaccins contre la covid-19
Méthode	• Analyses statistiques descriptives et comparaisons des régimes d'actions des acteurs en période de crise (SARS-Cov1, MERS-Cov, Covid-19) et hors crise
Principaux résultats empiriques	<ul style="list-style-type: none"> • Les industriels contribuent davantage à la recherche scientifique en période de crise (même si leur place reste marginale vis-à-vis de l'hôpital et des OPR), principalement par l'arrivée de nouveaux acteurs et la mise en place de nouvelles collaborations. • Les crises ne semblent pas bouleverser les régimes d'actions de l'industrie (ie. prévalence du modèle linéaire) • Il existe deux leviers pour renforcer la performance de la R&D : <ul style="list-style-type: none"> ○ Une expertise préalable sur les coronavirus avant crise (mais la plupart des acteurs en crise sont de nouveaux entrants) ○ Des collaborations avec des OPR, préexistantes avant crise (mais la plupart des collaborations sont nouvelles)
Implications théoriques	• La crise seule n'est pas le catalyseur d'une logique de double impact simultané : une réflexion doit être menée sur les outils de gestion qui peuvent favoriser les leviers de performances.
Implications managériales	• Il faut renforcer l'implication des industriels dans le champ scientifique sur les thématiques des crises futures, en amont des crises pour favoriser des contributions qui bénéficient à la communauté académique

Tableau 23 - Synthèse de l'article N°4

Ainsi, dans l'essai N°4, nous avons pu mettre en exergue l'implication des industriels dans la recherche scientifique sur les coronavirus, en période de crise et hors crise. L'enjeu ici était d'explorer les cas où les connaissances des industriels sur le développement de produits, procédés ou services, leur permettraient de favoriser des avancées scientifiques majeures.

Nos analyses permettent de mettre en exergue quelques conditions qui permettent de favoriser les couplages à double impact simultané. Nous pouvons les réinterpréter ici comme des conditions qui favorisent la défixation : la collaboration, de long terme, avec des OPR et des hôpitaux, et l'expertise préalable hors crise. Nous avons également discuté quelques pistes pour créer des cadres institutionnels favorables au double impact simultané en période de crise, notamment en favorisant la création de liens entre OPR, hôpitaux et industriels avant crise.

Nous proposons dans la section suivante une synthèse des principaux apports de cette section.

2.3. Régimes d’actions et cadres institutionnels pour promouvoir le double impact simultané

Ainsi, cette seconde partie du Chapitre 5 visait à répondre à la troisième Question de Recherche de cette thèse : *Quels cadres institutionnels et conditions pour favoriser les performances du modèle de couplage à double impact simultané ?*

Il faut d’abord souligner que les performances élevées en matière d’impact scientifique et d’impact industriel du couplage à double impact simultané, et son importance dans les relations science industrie moderne, ont ouvert une large palette d’explorations possibles. Nous avons dû faire des choix. Nous nous sommes concentrés d’abord sur le pilotage de l’expertise dans l’industrie pour favoriser les couplages à double impact simultané, un choix dicté par l’importance récente de cette question dans la littérature (Zahra, Kaul et Bolívar-Ramos, 2018). Nous avons ensuite exploré les cadres institutionnels et les conditions qui pourraient favoriser les couplages à double impact simultané en période de crise, un choix dicté par la volonté d’éclairer la crise actuelle du Covid-19 avec nos travaux.

Premièrement, concernant les régimes de pilotage de l’expertise, nous avons conçu un cadre méthodologique dans lequel nous pouvions (1) nous assurer de l’impact industriel (par les brevets), (2) mesurer l’impact scientifique par le degré de rupture par rapport à l’histoire des sciences et des techniques, et où (3) nous pouvions modéliser différents régimes de dynamique des expertises. Cette méthodologie sophistiquée qui s’appuie sur la structure de la base de connaissances de l’entreprise nous a permis de distinguer quatre principaux régimes de dynamique de l’expertise : raffinement, clusterisation, absorption et recomposition. Les éléments de cette typologie sont synthétisés dans la Figure 56 ci-dessous.

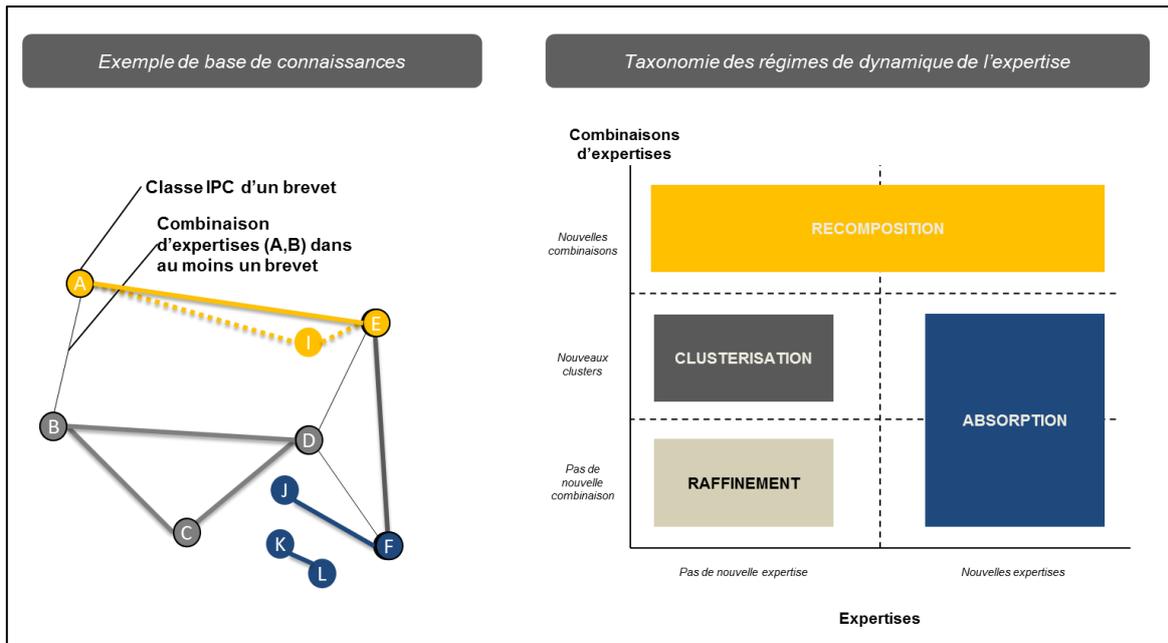


Figure 56 - Taxonomie des régimes de dynamique de l'expertise

Nous avons testé la méthodologie dans le secteur du pétrole et du gaz et avons remarqué que le régime de recombposition était le plus favorable aux couplages à double impact simultané (Figure 57). Ici ce qui est intéressant, c'est que l'apport de connaissances externes comme dans le cas de l'absorption ne suffit pas à générer un mécanisme de disjonction-conjonction en dehors de la zone de fixation du concepteur. Il faut que la connaissance fasse « sens » dans l'espace de connaissances de l'organisation. On peut penser que le modèle de recombposition soit une forme de mise en pratique du *k-reordering*, condition nécessaire du couplage à double impact simultané. On retrouve également en creux la nécessité d'une forte originalité et de l'indépendance des connaissances qui sont combinées pour générer des disjonctions en dehors des zones de fixations des concepteurs. Dans le mode recombposition, les compétences qui sont combinées entre elles sont éloignées ou externes, c'est-à-dire indépendantes des connaissances connues du concepteur. Toutefois, si cette analyse nous renseigne sur les régimes de dynamique de l'expertise, il est aussi nécessaire de creuser les conditions et les cadres institutionnels qui favorisent le couplage à double impact simultané.

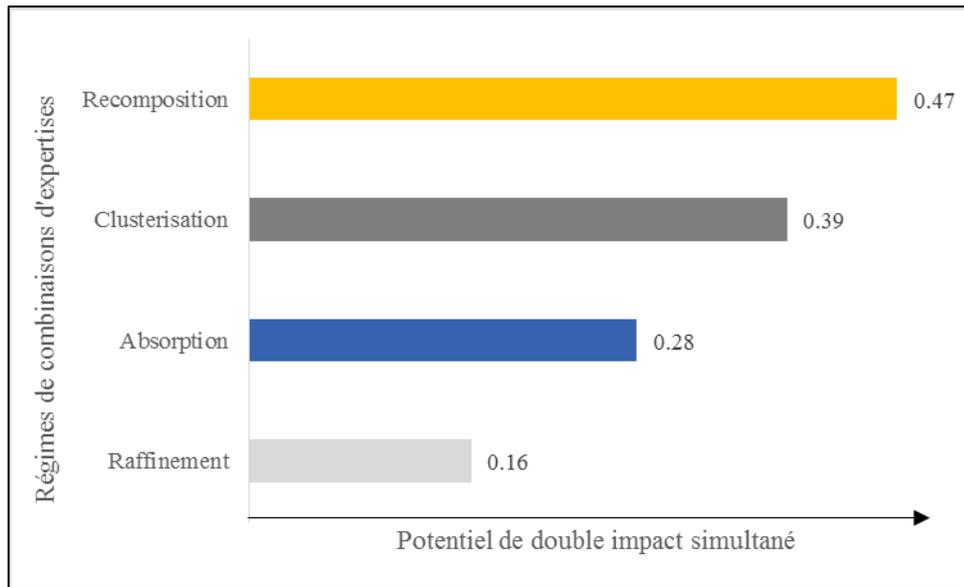


Figure 57 - Régimes de dynamique d'expertises et couplage à double impact simultané

Dans une seconde sous-partie, nous avons pu remarquer qu'en période de crise, des conditions spécifiques peuvent être mises en place pour favoriser les couplages à double impact simultané. En effet, la crise en elle-même n'est que marginalement le catalyseur de ce couplage. D'une part, la collaboration avec des OPR (ou des hôpitaux pour les crises sanitaires) est à privilégier, mais encore faut-il que ces relations aient émergé avant crise. Au regard de notre modèle formel, cela suppose qu'un processus de disjonction-conjonction en dehors de la zone de fixation semble difficile dans la précipitation ou sur un temps court. De plus, nous avons pu remarquer que les industriels peuvent favoriser des découvertes scientifiques, c'est-à-dire que ces industriels pilotent leurs propres espaces de conception scientifiques. Mais pour cela, il faut qu'ils aient déjà investi le champ scientifique auparavant. On retrouve ici en creux l'idée de préservation des espaces de conception : le temps long et l'expérience semblent pouvoir permettre cette préservation et la non-hybridation, et il est ainsi probable qu'il puisse s'agir d'une compétence à part entière à développer dans les organisations. Ces éléments sont synthétisés dans la Figure 58 dans le cas des projets de vaccins contre la covid-19. Nous pouvons conclure cette section en indiquant que des cadres institutionnels devraient être développés pour favoriser les couplages à double impact simultané, notamment en créant des relations science-industrie avant-crise.

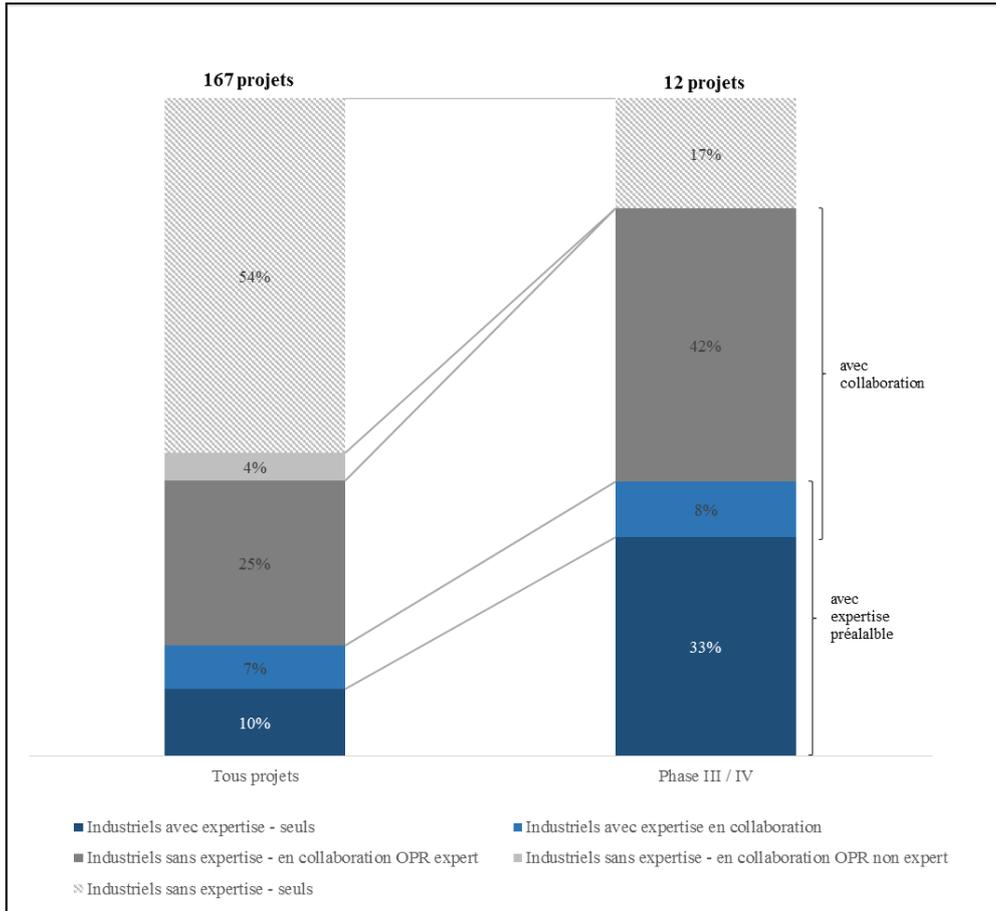


Figure 58 - Rôle des collaborations et de l'expertise dans les projets de vaccin Covid-19

Synthèse du Chapitre 5

Dans ce Chapitre, nous avons présenté les résultats relatifs aux Questions de Recherche N°2 et N°3 en contextualisant et synthétisant les quatre essais qui composent cette thèse.

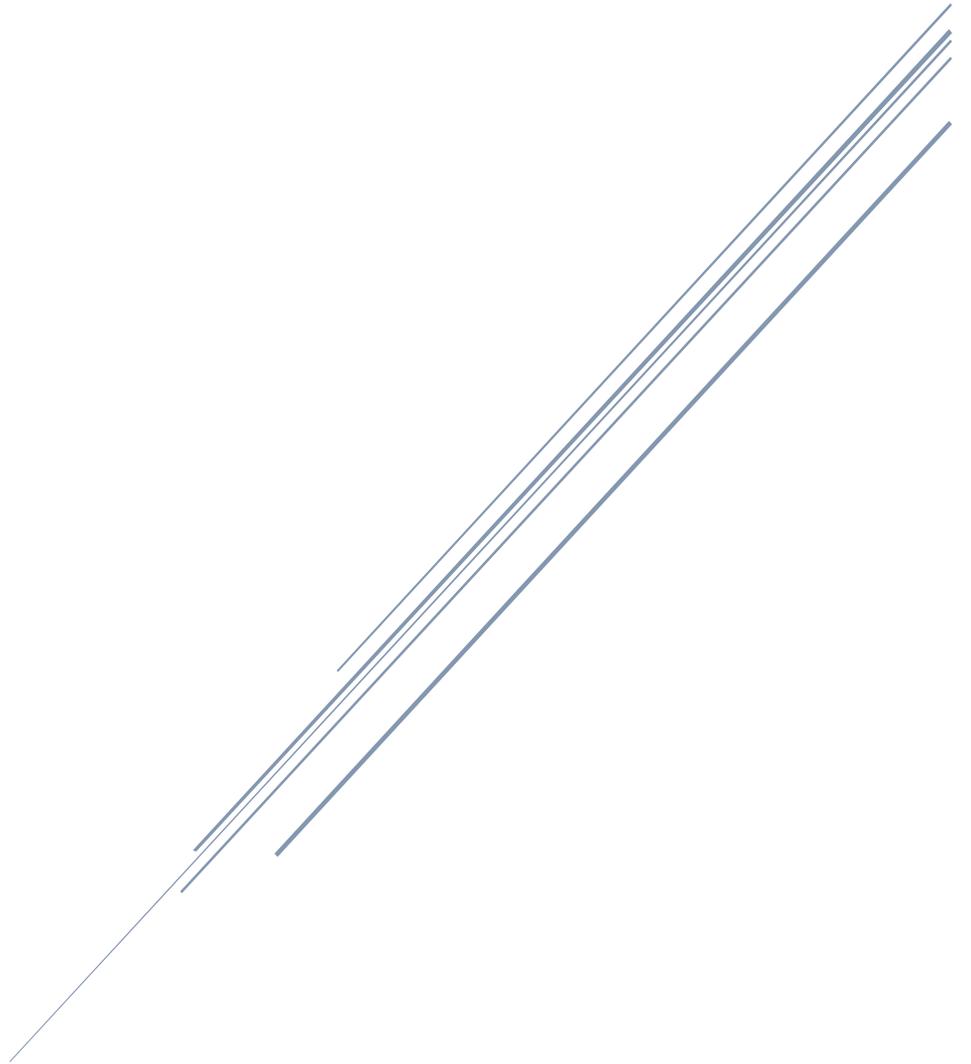
Premièrement, les essais N°1 et N°2 avaient pour objectif de répondre à la seconde question de recherche qui portait sur la dynamique historique et les performances du couplage à double impact simultané dans la recherche dite « fondamentale » ou « appliquée ». En utilisant comme matériau empirique les découvertes réalisées par des lauréats du Prix Nobel en physique, chimie et médecine, nous sommes d'abord revenus sur la recherche « fondamentale », généralement présentée comme relevant de la classe des couplages séquentiels. Pourtant, nous avons montré que le couplage à double impact simultané était historiquement persistant, et en forte augmentation sur les dernières périodes étudiées, avec des différences structurelles par disciplines. Dans un second temps, nous avons exploré les performances du couplage à double impact simultané dans le cas de la recherche dite appliquée, par l'étude des thèses CIFRE. Nous avons pu montrer que les performances scientifiques et industrielles pour ce couplage sont particulièrement élevées : strictement supérieures en termes scientifiques aux autres classes de couplages, et avec des performances similaires aux couplages hybridés en termes industriel (classe de couplage avec les performances industrielles la plus élevée). Ces deux études conduisent à valider les hypothèses du Chapitre 4 sur l'intérêt du couplage à double impact simultané. Nous pouvons désormais explorer quels sont les cadres institutionnels et les régimes qui permettent de le promouvoir.

Ainsi, deuxièmement, les essais N°3 & N°4 avaient pour objectif de répondre à la troisième question de recherche qui portait sur les conditions et cadres institutionnels propices au double impact simultané. D'abord, nous nous sommes intéressés à la dynamique de l'expertise dans la R&D industrielle. Nous avons pu catégoriser quatre régimes de dynamique de l'expertise (recomposition, absorption, clusterisation et raffinement) et avons pu tester, en prenant l'exemple de l'industrie du pétrole et du gaz, lesquels favorisaient le potentiel de couplage à double impact simultané. Nous avons ainsi montré que c'est le régime de recomposition, qui capitalise sur les combinaisons d'expertises indépendantes et éloignées dans l'organisation, avec potentiellement des expertises nouvelles, qui favorise dans ce contexte, le couplage à double impact simultané. Par ailleurs, et à l'aune de la crise du Covid-19, nous avons montré qu'il existe des leviers qui favorisent les couplages à double impact simultané dans la R&D industrielle pour produire les connaissances scientifiques et développer les produits, procédés ou services qui permettent la sortie de crise. En effet, la crise n'est que marginalement un catalyseur de ce type de couplage. En particulier, nous avons souligné l'importance de créer un écosystème propice au double impact simultané en amont des crises, notamment en renforçant les liens OPR – industriels.

Ainsi, nous pouvons dans une dernière partie, discuter les contributions théoriques et pratiques de ces résultats, et proposer quelques perspectives de recherche : l'objet du Chapitre 6 de cette thèse.

CHAPITRE 6 :

DISCUSSION



Ce chapitre vise à conclure cette thèse en revenant sur les principaux résultats. Nous spécifions nos contributions aux quatre champs de littérature principaux : l'engagement académique, la R&D industrielle, les théories de la conception et l'invention combinatoire. Nous détaillons nos apports pour les praticiens et proposons quelques perspectives de recherche pour ces travaux.

CHAPITRE 6 :

DISCUSSION

1.	<i>Rappel des résultats de la thèse</i>	305
2.	<i>Contributions théoriques</i>	310
2.1.	Contribution à la littérature sur l'engagement académique.....	310
2.1.1.	Richesse des formes d'engagement académique et couplage à double impact simultané.....	310
2.1.2.	Engagement académique, types de couplages science – industrie et performances scientifiques et industrielles	314
2.2.	Contributions à la littérature sur la R&D industrielle	317
2.3.	Contribution à la littérature en sciences de la conception	321
2.4.	Contribution à la littérature sur l'analyse combinatoire de l'invention	322
3.	<i>Apports pour les praticiens</i>	323
3.1.1.	Apports pour les relations OPR – entreprises	323
3.1.2.	Apports pour la R&D industrielle.....	325
4.	<i>Perspectives de recherche</i>	326
	<i>Synthèse du Chapitre 6</i>	329

Après avoir présenté au Chapitre 4 le modèle formel qui nous a permis d'établir un cadre d'analyse renouvelé pour discuter des relations science – industrie, nous avons pu mener quatre explorations distinctes au travers des quatre essais qui composent cette thèse, et présentés au Chapitre 5. Ce dernier Chapitre vient clore nos travaux. Nous revenons ici d'abord sur nos principaux résultats, afin d'explicitier nos principales contributions : les avancées théoriques que nous proposons dans cette thèse. Nous détaillons également les implications managériales, pour les praticiens et les décideurs publics. Enfin, nous revenons sur quelques perspectives de recherche qui fondent les prémices du programme de recherche post-thèse du chercheur.

1. Rappel des résultats de la thèse

Les résultats de cette thèse sont proposés respectivement dans le Chapitre 4 pour la première question de recherche, et dans le Chapitre 5 pour les deuxième et troisième questions de recherche. Soulignons que le Chapitre 5 étant basé sur la synthèse des quatre essais qui composent la thèse, nous ne proposons ici qu'un bref rappel de nos résultats, question de recherche par question de recherche, afin de faciliter la lecture de nos contributions (section suivante).

➤ *QR1 : Comment modéliser un couplage à double impact simultané entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits, procédés ou services ?*

Pour répondre à cette question de recherche, nous avons proposé un modèle formel (Chapitre 4) des couplages science – industrie qui s'appuie sur les théories de la conception, et plus particulièrement la théorie C-K (Hatchuel et Weil, 2003, 2009). Nous avons en effet démontré que les avancées récentes de ce champ de recherche – telles que modélisation des découvertes scientifiques (Hatchuel *et al.*, 2013) ou la modélisation des interactions entre deux concepteurs (Gillier *et al.*, 2010) – nous permettaient de capitaliser sur ce cadre théorique pour nos efforts de modélisation des relations science - industrie, en adoptant une perspective nouvelle par une approche cognitive d'exploration dans l'inconnu.

Ainsi, nous avons proposé de modéliser les couplages comme les relations entre deux concepteurs, l'un de découvertes scientifiques potentielles (ie. le « scientifique »), l'autre de produits, procédés ou services nouveaux potentiels (ie. « l'industriel »). Chaque concepteur dispose de son propre *espace des concepts* (ie. propositions indécidables) et *espace de*

connaissances (ie. propositions dont on sait si elles sont vraies ou fausses, du point de vue du concepteur). Pour tenir compte des spécificités des relations science – industrie, nous avons postulé que les concepts des deux acteurs sont de *natures* différentes. Concepts de théories scientifiques nouvelles et de produits, procédés ou services potentiels sont distincts. Cela implique que tout concept partagé entre les deux acteurs constitue une *hybridation*, entre un concept scientifique et un concept industriel, notion nouvellement introduite pour cette thèse. Par ailleurs, notre modèle devait également permettre de décrire les performances des couplages. Ici, la performance est modélisée en deux axes : (1) la capacité des acteurs à préserver leurs espaces de conception (ie. pas d’hybridation), et (2) la capacité des acteurs à proposer des concepts en dehors de leurs zones de fixations, notion usuelle du formalisme C-K.

En nous appuyant sur ce cadre formel, nous avons modélisé différents couplages.

Premièrement, nous avons été en mesure de modéliser un *couplage à double impact simultané* avec des performances scientifiques et industrielles élevées. Celui-ci s’appuie sur la notion que nous avons proposée de *défixations croisées* : par l’échange bidirectionnel de connaissances indépendantes, les acteurs sont en mesure de proposer des concepts en dehors de leurs zones de fixations respectives. Il s’appuie également sur la notion également proposée de *indépendantisation des connaissances* : les connaissances de l’un des acteurs sont enrichies de propriétés nouvelles par l’autre acteur dans le cadre du couplage, et qui lui reviennent en fin de processus, et sont alors indépendantes de ses connaissances initiales. En termes de performances, le couplage à double impact simultané permet donc la production de concepts originaux (ie. en dehors des zones de fixations), et ce tout en préservant la nature des espaces de conception de chaque acteur. Il faut toutefois souligner que ce couplage, qui semble attractif car particulièrement performant, repose sur des conditions bien particulières et restrictives : échange bidirectionnel de connaissances, *k-reordering*, non-hybridation, etc.

Deuxièmement, nous avons été en mesure de proposer un résultat additionnel au regard de cette question de recherche. Pour modéliser le couplage à double impact simultané, il a été nécessaire de repartir de nos apprentissages des paradoxes science – industrie et de la littérature (modèle linéaire, science résolutoire). Ainsi, notre approche a permis de modéliser deux classes de couplages additionnelles. D’une part, la *classe des couplages séquentiels*, où les deux concepteurs visent à se transférer des connaissances nécessaires à la réalisation d’un concept pré-identifié. Nous avons spécifié les conditions de succès, et les limites d’un tel modèle : en particulier, dans le cas archétypal, il n’y a pas de sortie de zone de fixation, mais bien préservation des espaces conceptuels des acteurs. D’autre part, la *classe des couplages*

hybridés, où les deux concepteurs co-explorent un concept partagé. Nous avons, là aussi, spécifié les conditions de succès et les limites de ce type de couplage. En particulier, dans le cas archétypal, un risque de renforcement croisé des fixations (ou de transfert de fixations), ainsi qu'une hybridation des concepts. Ces deux classes de couplages, et les discussions que nous avons proposées sur leurs limites et leviers de performances, viennent enrichir la compréhension du modèle linéaire et de la science résolutoire, sans s'y substituer totalement, car ils incluent une dimension cognitive nouvelle.

Troisièmement, pour confirmer la pertinence du modèle formel pour le cas le plus en rupture, de couplage à double impact simultané, nous avons mené un cas d'étude approfondi. Nous avons analysé la découverte du mécanisme de défense immunitaire adaptatif des bactéries basé sur CRISPR-Cas9, et ses applications successives chez DuPont-Danisco. Par une étude détaillée de chacune des conditions du modèle formel pour ce type de couplage (préservation des espaces de conception, indépendantisation des connaissances, etc.), nous avons démontré qu'il permet d'explicitier les conditions du succès du cas étudié. Nous en avons discuté également les implications.

Ces éléments nous ont conduits à étudier plus précisément, à grande échelle, la pertinence du couplage à double impact simultané.

➤ ***QR2 : Quelle dynamique historique et quelles performances pour le modèle de couplage à double impact simultané dans les couplages relevant traditionnellement de la « recherche fondamentale » et de la « recherche appliquée » ?***

Dans cette seconde question de recherche, après avoir proposé un modèle explicatif formel des conditions d'existence et de performance du couplage à double impact simultané, nous avons cherché à déterminer la pertinence de cette nouvelle catégorie dans des cas archétypaux dits de « recherche fondamentale » ou de « recherche appliquée » par des tests empiriques.

Premièrement, nous avons étudié la dynamique historique du couplage à double impact simultané dans des situations relevant traditionnellement de la « recherche fondamentale ». En reprenant notre modèle formel, nous nous inscrivons plutôt dans le contexte des couplages séquentiels : des découvertes scientifiques réalisées par des scientifiques d'OPR, puis transférées à des industriels pour le développement de produits, procédés ou services innovants. Pour réaliser une étude empirique dans ce contexte, nous avons analysé sur longue période les lauréats du Prix Nobel, réputés pour s'engager dans ce type de couplage et récompensés pour leurs découvertes fondamentales sur la compréhension des lois de la nature. Après avoir

développé une méthode originale pour déterminer des cas de double impact simultané chez les lauréats du Prix Nobel, nous avons montré qu'environ un lauréat sur cinq de la cohorte quasi-complète des lauréats du Prix Nobel de Physique, de Chimie et de Médecine s'inscrit dans ce type de couplages. De plus, nous avons démontré que la part des lauréats qui s'inscrivent dans des couplages à double impact simultané est en forte augmentation, avec plus d'un lauréat sur deux concerné dans la dernière période d'analyse (2010 – 2016). Nous avons également démontré des différences structurelles par discipline : un phénomène plus ancien en physique, récent et très dynamique en médecine. Enfin, nous avons également discuté les performances et les relations avec l'industrie post-découvertes de ces lauréats, en les comparant avec ceux qui s'inscrivent dans des couplages séquentiels. Les lauréats qui s'inscrivent dans le couplage à double impact simultané semblent à même de maintenir leur inscription dans ce type de couplage sur longue période.

Deuxièmement, nous avons étudié les performances du couplage à double impact simultané relativement aux autres types de couplages, dans le contexte de la recherche dite « appliquée ». Le modèle formel prédit des performances scientifiques et industrielles supérieures pour le couplage à double impact simultané, qu'il faut démontrer par une étude empirique plus approfondie. Pour étudier ce contexte particulier, nous avons sélectionné un cas archétypal : celui des thèses en collaboration OPR – industrie, via le dispositif français des CIFRE. Après avoir là encore développé une méthode originale pour spécifier le type de couplage sélectionné *ex ante* dans chaque thèse CIFRE étudiée, et mesuré les performances scientifiques et industrielles *ex post*, nous avons tout d'abord montré que le couplage à double impact simultané est le plus performant, relativement aux autres types de couplages. En effet, il permet des performances scientifiques supérieures à celles des deux autres types de couplages, et permet des performances industrielles égales à celle des couplages hybridés (couplage avec le plus haut niveau de performance industrielle). Un résultat additionnel dans cette partie consiste à montrer que dans le contexte des thèses CIFRE, les couplages hybridés, dont nous pouvions faire l'hypothèse qu'ils conduiraient à des performances scientifiques inférieures à celles des couplages séquentiels (cf. débat sur la science résolutoire au Chapitre 1 notamment), permettent des performances scientifiques similaires aux couplages séquentiels. Cet élément indique que dans ce contexte particulier, les parties prenantes sont capables de dépasser les transferts de fixations inhérents à l'hybridation de leurs espaces conceptuels.

Ainsi, ces résultats nous ont enjoint à étudier plus précisément les conditions et les cadres institutionnels propices au double impact simultané.

➤ *QR3 : Quels cadres institutionnels et conditions pour favoriser les performances du modèle de couplage à double impact simultané*

Dans cette troisième question de recherche, après avoir démontré l'intérêt du couplage à double impact simultané, nous avons cherché à mieux comprendre les cadres institutionnels et les conditions pour favoriser sa mise en place et ses performances. Si les résultats encourageants des questions de recherche précédentes permettent un large champ des possibles pour de telles analyses, nous avons choisi de nous concentrer sur deux cas : le double impact simultané dans la recherche industrielle, puis en période de crise.

Premièrement, nous avons montré à partir de la littérature et des débats sur la recherche industrielle que le pilotage de l'expertise était un sujet clé pour favoriser les découvertes scientifiques et le développement de produits, procédés ou services. Ici, nous avons adopté un positionnement macro en cherchant à identifier des régimes de dynamique de l'expertise dans la R&D industrielle qui seraient les mieux à même d'encourager des couplages à double impact simultané. Pour cela, nous proposons une méthodologie novatrice qui permet de définir, pour une invention donnée (à partir d'une analyse des brevets), le régime de dynamique de l'expertise qui lui est associé. Après avoir distingué trois types de régimes (absorption, clusterisation, raffinement, recomposition), nous avons montré à partir d'une analyse dans le secteur du pétrole et du gaz, que le régime de recomposition est le plus à même de favoriser les couplages à double impact simultané. Dans ce régime, l'organisation combine des expertises internes, mais éloignées entre elles, avec potentiellement des expertises externes à l'organisation. En particulier, ce régime est plus propice au couplage à double impact simultané que celui dit d'absorption, qui vise à importer des expertises externes à l'organisation, sans rediscussion des liens pré-existants entre les expertises.

Deuxièmement, nous avons choisi de nous intéresser au cas des crises. Nous avons évoqué l'intérêt d'un couplage à double impact simultané pour faire face aux grandes transitions qui nécessitent avancées scientifiques et innovation (Chapitre 1). Face à la survenue de la crise du covid-19 pendant cette thèse, nous avons choisi de nous y intéresser plus spécifiquement. À partir d'une analyse des publications scientifiques et des brevets portant sur les coronavirus sur longue période, nous avons exploré les régimes d'actions adoptés par les entreprises industrielles qui contribuent à la recherche scientifique sur ce sujet, en spécifiant des périodes de crise (SARS-Cov1, MERS-Cov, Cov-19) et de non-crise. Nous avons complété nos analyses par des données sur les projets de vaccin contre la Covid-19. Nous avons montré qu'en période

de crise, davantage d'industriels se mobilisent dans la recherche scientifique. Toutefois ce sont surtout de nouveaux entrants dans le champ de recherche, ou de nouvelles collaborations avec des OPR. De plus, cette mobilisation supplémentaire de l'industrie est relativement marginale (en comparaison des efforts supplémentaires consentis par les OPR ou les hôpitaux). Ainsi, la crise est un catalyseur marginal du couplage à double impact simultané. Toutefois, nous avons montré que pour favoriser le couplage à double impact simultané, des conditions spécifiques doivent être mises en place. Il est préférable que les entreprises industrielles qui s'engagent dans ce couplage aient une expertise scientifique préalable sur la thématique de la crise (ici sur les coronavirus), ou s'associent avec un OPR mais que cette relation soit pérenne et ait débuté avant crise. Nous montrons ici que l'anticipation et le temps long entre les deux concepteurs sont nécessaires pour favoriser l'échange bidirectionnel de connaissances originales et la préservation des espaces de conception. Nous avons également discuté les cadres institutionnels et les moyens d'action pour favoriser ces conditions afin de promouvoir le couplage à double impact simultané.

Ainsi, après avoir rappelé nos principaux résultats, nous explicitons nos contributions théoriques.

2. Contributions théoriques

Dans cette section, nous revenons sur nos principales contributions théoriques que nous mettons en exergue avec la littérature sur l'engagement académique, sur la R&D industrielle, sur les sciences de la conception et sur l'invention dans la perspective combinatoire.

2.1. Contribution à la littérature sur l'engagement académique

Cette thèse contribue sur deux volets distincts à la littérature sur l'engagement académique, à la fois en mettant en valeur la richesse des formes d'engagement, mais aussi en faisant le lien entre forme d'engagement et performances.

2.1.1. Richesse des formes d'engagement académique et couplage à double impact simultané

Notre première contribution à la littérature sur l'engagement académique concerne le raffinement des formes de relations entretenues entre académiques et industriels.

La littérature sur l'engagement académique s'est principalement focalisée sur un recensement des mécanismes possibles d'interaction entre un scientifique engagé et un

industriel (voir par exemple, Cohen, Nelson et Walsh, 2002). Ce recensement a pris principalement appui sur les formes contractuelles d'interaction. C'est ce qui avait par exemple amené à écarter de la littérature sur l'engagement académique le « consulting académique » (Perkmann *et al.*, 2013) puisque la dimension recherche n'y était pas centrale. L'intérêt de notre modèle formel est donc de proposer un recensement générique des formes d'interaction possibles entre concepteurs scientifiques et concepteurs industriels, qui se fonde ni sur les formes contractuelles, ni sur une vision déterministe du rôle des acteurs (ie. OPR qui serait responsable de la science, et industriel des produits, procédés ou services), mais sur les mécanismes cognitifs d'interaction à l'œuvre entre les parties.

Ainsi, le modèle formel permet de dépasser les notions floues de « bonne distance » entre industrie et académie, ou de « surface de frottement ». Il permet également de dépasser la logique binaire entre un modèle de transfert hérité du modèle linéaire, et un modèle de science résolutoire où l'impact scientifique se ferait au détriment de l'impact industriel et vice versa. Nous revenons brièvement sur les principales contributions théoriques de ce raffinement des formes d'engagement académique.

Premièrement, l'analyse de la dynamique cognitive des acteurs nous a permis d'introduire la notion de *classe des couplages séquentiels*, des couplages qui permettent notamment de recouvrir les modèles de transfert (sans pour autant s'y substituer) et où la recherche scientifique est réalisée en amont et ses résultats transférés à l'autre partie. Nos travaux nous ont également permis d'introduire la notion de *classe des couplages hybridés*, des couplages qui peuvent recouvrir certains aspects de la science résolutoire (sans pour autant s'y substituer), où les acteurs co-explorent dans l'inconnu un concept d'intérêt commun. L'intérêt de ces classes de couplages est double. D'abord, elles permettent d'explicitier les mécanismes cognitifs d'interactions entre science et industrie qui favorisent performances scientifiques et industrielles, tout en exposant leurs limites. Nous avons détaillé comment le modèle formel permet d'illustrer les tensions, mais aussi les succès de différents modèles classiques (voir Chapitre 1, Paradoxe 1). Par exemple, les difficultés du transfert s'illustrent dans la classe des couplages séquentiels : une condition préalable est l'existence d'un concept industriel auquel « répond » la connaissance apportée par le scientifique, condition qui apparaît comme difficile à mettre en œuvre. Autre exemple, les difficultés de la science résolutoire (voir Chapitre 1, Paradoxe 3) s'illustrent au travers du *renforcement croisé des fixations* dans les classes de couplages hybridés. Pourtant, et c'est le paradoxe des modèles de couplages traditionnels, il semble toujours qu'il soit possible de trouver des exceptions fécondes en termes de double impact dans les modèles dits de science résolutoire ou linéaire, même si elles sont rares. Or,

notre modèle formel permet aussi d'expliquer ces succès. Par exemple, nous avons montré qu'il est possible dans la classe des couplages hybridés de dépasser le renforcement croisé des fixations si la connaissance du partenaire industriel est assez originale pour engendrer une disjonction en dehors de la zone de fixation, et si la fixation importée du partenaire est également dépassée. D'autre part, la généralité du modèle permet une multitude d'interactions possibles dans ces deux classes de couplages (modèle de couplages séquentiels *post-building*, couplage hybridé avec défixation d'une des parties et force de rappel), sachant que les activités scientifiques et les activités de développement de produits, procédés et services peuvent être menées par chacun des acteurs. Ainsi, le modèle formel permet de traduire différentes situations qui pouvaient être particulièrement difficiles à interpréter. Par exemple, on voit rapidement que les modèles de transfert et de science résolutoire pourraient difficilement rendre compte du cas d'une université comme RWTH Aachen qui développe des camions de livraison basés sur des technologies de mobilité électrique à la pointe⁷⁶. Or, dans notre modèle, il suffit de considérer que le concepteur de produits nouveaux est ici l'OPR.

Deuxièmement, nos travaux nous ont permis d'introduire la notion *d'hybridation des concepts*, une contribution théorique importante de ces travaux de thèses. Cette notion nous permet d'explicitier une condition inhérente aux relations science-industrie : il existe des concepts scientifiques ou industriels qui ne se substituent pas l'un à l'autre. Toute tentative de recherche conjointe sur un concept similaire implique un asservissement de l'un des concepteurs à l'autre. Nous mettons ici en exergue la richesse et les paradoxes des relations science – industrie : des travaux d'exploration dans l'inconnu sur des thématiques proches, dans lesquels les synergies sont évidentes, mais qui n'ont pas les mêmes objectifs et critères de performances. Il est donc possible d'envisager la *préservation des espaces de conception*. Cette notion apparaît comme étonnante : alors que la recherche partenariale semble reposer sur la définition d'un objectif commun, d'intérêt mutuel pour les acteurs (Gillier *et al.*, 2010), nous proposons la notion inverse : de préserver la séparation des espaces de conception. On comprend qu'en termes de management, cette logique est difficile à mettre en œuvre : comment trouver un intérêt mutuel dans une relation partenariale sur un objectif qui ne semble pas partagé ? Mais c'est dans ce paradoxe que se trouve l'un des principaux axes de performance des couplages science – industrie. La préservation des espaces de conception ne signifie pas qu'il n'y a pas de synergies possibles entre les connaissances mutuelles des acteurs, bien au

⁷⁶ Pour plus d'informations, voir : <https://www.pem.rwth-aachen.de/cms/PEM/Der-Lehrstuhl/Aktuelle-Meldungen/~scmi/Elektro-LKW-sollen-leistungsstaerker-und/lidx/1/>

contraire. C'est cette préservation des espaces de conception qui permet de favoriser des phénomènes de défixations croisées grâce aux connaissances échangées entre les acteurs. On peut y voir également en creux la notion de division du travail en OPR et industriels proposée par Bikard, Vakili et Teodoridis (2019). La préservation des espaces de conception semble même apparaître comme une compétence à part entière des organisations, à développer et renforcer. Cette compétence peut expliquer que ce sont les relations de longs termes entre académiques et industriels qui sont les plus fécondes. Ici, on pourrait se questionner sur les enjeux de pouvoirs associés : on pourrait supposer que les acteurs soient engagés dans une forme de compétition, consciente ou inconsciente, pour hybrider l'espace C de l'autre acteur.

Troisièmement, bien sûr, dans ce raffinement des modèles possibles de l'engagement académique, nous avons introduit la notion de *couplage à double impact simultané*. Cette notion est au cœur des travaux de cette thèse, car elle semble permettre un dépassement des paradoxes des deux classes de couplages précédents. Alors que l'impact scientifique ou industriel semble usuellement se faire l'un aux dépens de l'autre, ici nous envisageons de concevoir une relation féconde simultanément pour les acteurs. Ce modèle repose sur la préservation des espaces de conception, et sur des mécanismes de *défixations croisées* et *d'indépendantisation des connaissances* des deux concepteurs. L'originalité des connaissances échangées entre les acteurs permet la création de concepts scientifiques et industriels qui vont s'auto-alimenter. Bien sûr, ce modèle fait écho aux propositions de Narayanamurti et Odumosu (2016) et Goldstein et Narayanamurti (2018), mais nous y apportons un cadre explicatif formel et une démonstration empirique à grande échelle. De plus, le couplage à double impact simultané permet d'apporter un angle nouveau aux travaux qui ont tenté de montrer que les scientifiques engagés le font principalement pour des « raisons scientifiques » (voir par exemple, Gulbrandsen et Smeby, 2005 ; Mansfield, 1995) : ce qui est recherché ici c'est bien la défixation scientifique en capitalisant sur des connaissances industrielles. Or ici, le rôle de l'industriel n'est plus restreint à la simple proposition de questions de recherche intéressantes (de Wit-de Vries *et al.*, 2018), mais bien à l'échange de connaissances indépendantes et originales vis-à-vis du concepteur scientifique, qui vont alimenter le processus de conception scientifique. Cette nouvelle catégorie dans les formes de couplages science – industrie, et donc pour l'engagement académique, semble d'un intérêt tout particulier pour cette littérature. Cette catégorie permet d'isoler des relations spécifiques, avec des régimes d'actions, des cadres institutionnels et des conditions de succès différents des autres types de couplage. À ce titre le modèle permet de revisiter certaines analyses historiques. On pourrait revisiter le célèbre cas de Pasteur et des brasseurs lillois par exemple en montrant, en quoi la connaissance acquise auprès des brasseurs

permet à Pasteur d’observer une anomalie par rapport au modèle scientifique dominant et sa propre théorie de la cristallographie (Galvez-behar, 2018). Cette logique de revisite de cas historiques s’inscrit dans les efforts menés par d’autres chercheurs pour dépasser le cadre du modèle linéaire et mieux comprendre certaines anomalies (voir par exemple les travaux de Godin, 2006).

Contribution à l’engagement académique - 1 : Nous avons introduit un modèle formel générique qui permet de rendre compte de la richesse des interactions science – industrie, de leurs conditions de succès et de leurs difficultés, à partir de l’analyse des effets cognitifs de la co-exploration dans l’inconnu. Ce modèle formel qui présente trois grands types de couplages (classe des *couplages séquentiels*, classe des *couplages hybridés* et *couplage à double impact simultané*) repose sur trois notions théoriques développées dans cette thèse :

- *L’hybridation* ou la *préservation des espaces de conception*, c’est-à-dire la capacité ou non des concepteurs scientifiques et industriels à préserver des concepts disjoints et qui apparaît comme une compétence à développer ;
- La *fixation* ou *défixations croisées*, c’est-à-dire des effets de transferts de fixations entre les parties, ou de défixations de l’une ou des deux parties, et qui apparaît comme une conséquence importante des co-explorations science – industrie ;
- *L’indépendantisation des connaissances*, c’est-à-dire la capacité à ajouter de nouvelles propriétés à une connaissance d’un concepteur, qui lui revient enrichie au cours du processus, avec une logique de circularité.

Ces nouveaux construits théoriques ouvrent la voie à un renouvellement de l’analyse des relations science-industrie, en mettant en exergue de nouvelles catégories, aux régimes d’actions, conditions d’existence et de performances, et cadres institutionnels différents.

Ainsi, le modèle formel, et à travers lui, les notions d’hybridation ou de préservation des espaces de conception, de renforcement ou de défixations croisées, d’indépendantisation des connaissances, constituent des apports théoriques importants à la littérature sur l’engagement académique. Ils permettent également de répondre aux limites N°1 et N°3 mises en exergue au Chapitre 2 et relatives respectivement aux difficultés de modélisation des relations science-industrie (notamment du rôle joué par l’industrie, voir notamment de Wit-de Vries *et al.*, 2018), et aux facteurs explicatifs du double impact. Nos travaux contribuent également à cette littérature au travers d’un second axe : le lien entre performances scientifiques et industrielles, et engagement académique.

2.1.2. Engagement académique, types de couplages science – industrie et performances scientifiques et industrielles

Comme nous l'avons indiqué dans la sous-section précédente, le développement du modèle formel a permis de raffiner les formes de couplages science - industrie envisageables. Mais au-delà, nous contribuons à la littérature sur l'engagement académique en explorant le lien entre types de couplage et performances scientifiques et industrielles, un élément relativement peu exploré notamment pour les percées scientifiques majeures (Perkmann *et al.*, 2021).

Premièrement, nous contribuons à la littérature sur l'engagement académique en montrant que le choix d'un type de couplage science – industrie (hybridé, séquentiel, double impact simultané) est un facteur explicatif direct des performances scientifiques et industrielles (Chapitre 2 – Limite N°3). Ce résultat empirique majeur a été démontré dans le cas des thèses CIFRE. Ainsi, la richesse du modèle formel présenté ci-dessus n'est pas uniquement de pouvoir fournir un cadre descriptif des relations science – industrie : il permet d'expliquer l'hétérogénéité des performances des chercheurs engagés (Van Looy, Callaert et Debackere, 2006). Ainsi, nos travaux viennent compléter ceux de Callaert *et al.* (2015) qui explorait cette question sur des portefeuilles de projets pour des chercheurs dans une discipline unique et dans deux universités. Nous montrons à plus grande échelle (plusieurs disciplines, plusieurs types de relations science – industrie) dans le cadre des thèses CIFRE, que le choix d'un des types de couplage implique un niveau donné de performance soit industrielle, soit scientifique, soit de double impact. En particulier, le modèle à double impact simultané apparaît comme celui le plus performant. L'explication du mécanisme permettant cette performance se situe dans l'échange des connaissances indépendantes et originales, et les phénomènes de défixations croisées et d'indépendantisation des connaissances.

Deuxièmement, nous sommes allés plus loin en discutant de ce phénomène dans le cas des découvertes scientifiques les plus majeures (Chapitre 2 – Limite N°2). Nos analyses des thèses CIFRE et des lauréats du Prix Nobel permettent de renouveler une image d'Épinal : celle d'une recherche fondamentale, voire de « recherche pure »⁷⁷ qui serait nécessairement ancrée en dehors de relations avec l'industrie pour favoriser la sérendipité. Or, nos résultats sur les découvertes fondamentales majeures sont particulièrement éloquents : par exemple, la part des lauréats du Prix Nobel qui mènent des travaux en collaboration avec l'industrie en amont de leur découverte fondamentale majeure est en très forte augmentation, et ce dans les trois

⁷⁷ Pour G. Carnino, le travail de l'académicien Armand de Quatrefages est précurseur de la « science pure ». Dans un texte précurseur de 1848, il cherche à montrer comment la science pure permet les applications les plus fructueuses : « *Sans science proprement dite, que devient la science appliquée ? Sans Volta, qui inventa la pile, les télégraphes électriques et le dorage sans mercure [la dorure galvanique] auraient-ils jamais existé* » (Armand de Quatrefages, cités dans Carnino, p. 22).

disciplines étudiées (chimie, médecine, et physique). Bien sûr, nous ne disposons pas d'un échantillon avec un contre-factuel qui nous permettrait d'estimer quantitativement si, sans ces relations avec l'industrie, le futur lauréat du Prix Nobel n'aurait pas fait sa découverte scientifique majeure. Pourtant, les éléments dont nous disposons à ce stade nous permettent d'en faire une hypothèse robuste. Le cas DuPont-Danisco était particulièrement intéressant à ce sujet, mais nous pourrions aussi par exemple discuter le cas de Albert Fert, Prix Nobel de Physique français qui a fortement interagi avec Thomson puis Thalès pour sa découverte sur la magnétorésistance géante. Ainsi, nos résultats nous permettent de conclure sur le fait qu'une part importante des découvertes majeures est le fruit de chercheurs engagés avec l'industrie, et que cette part est en augmentation.

Troisièmement, nous pouvons revenir sur un résultat robuste de la littérature sur l'engagement académique : en moyenne, les chercheurs engagés sont plus productifs scientifiquement. Ici, nous pouvons détailler un des résultats de notre étude des thèses CIFRE : nous montrons que les thèses relevant de la classe des couplages hybridés conduisent à des performances scientifiques égales à celles de thèses CIFRE relevant de la classe des couplages séquentiels. Dans ces thèses, en partant du produit, du service, ou du procédé de l'industriel, les travaux de recherche conduisent au développement de théories scientifiques nouvelles et d'intérêt. Deux hypothèses sont possibles ici pour expliquer ce phénomène. Soit les thèses CIFRE qui relèvent des classes de couplages séquentiels sont moins qualitatives que les thèses non-CIFRE qui relèveraient également de couplages séquentiels (ie. menées sans lien avec l'industrie, logique fondamentale). Cet élément expliquerait que les performances scientifiques soient similaires avec celles des couplages hybridés. Malheureusement, nous ne disposons pas de données avec une granularité suffisante pour tester dans le détail cette hypothèse en comparant nos résultats avec le cas des thèses traditionnelles. Toutefois, plusieurs éléments nous permettent de l'écarter. En particulier, les thèses CIFRE ont les mêmes enjeux en termes de soutenance de doctorat, de qualité et de rigueur des résultats scientifiques. De plus, nous avons considéré comme proxy des performances scientifiques les Prix de thèse, un élément commun entre thèses CIFRE et thèses traditionnelles. Cela nous enjoint donc à écarter cette première hypothèse. Nous pouvons évoquer ainsi une seconde hypothèse : l'accès à des connaissances originales de l'industrie devrait permettre une forme de défixation potentielle dans les thèses issues de la classe des couplages hybridés. Or, au regard des résultats de la littérature, cela signifierait qu'il existe des mécanismes qui favorisent le dépassement de la fixation « importée » de l'acteur industriel dans la co-exploration. Ce cas rare, envisagé dans le modèle formel, semble être finalement plus courant qu'initialement envisagé.

Nous pouvons donc conclure sur cette seconde contribution :

Contribution à l'engagement académique - 2 : Nous avons montré que le choix *ex ante* d'un type de couplage science – industrie (hybridé, séquentiel, double impact simultané) est un déterminant des performances scientifique, industrielle, et de double impact *ex post* de l'exploration dans l'inconnu. Le couplage à double impact simultané est le plus performant en termes de double impact et de retombées scientifiques. À ce titre, nous avons pu montrer son rôle dans une part importante des découvertes scientifiques les plus majeures de notre temps (environ 1/5 des cas sur longue période), une part en très forte augmentation dans les disciplines de la chimie, de la médecine et de la physique.

Ces résultats nous permettent donc de pallier la limite N°2 mise en exergue dans la littérature et qui était liée au lien peu documenté entre engagement académique et qualité des découvertes scientifiques. Ici, nous montrons que l'engagement académique peut permettre des avancées scientifiques majeures, et notamment si le chercheur accède à des connaissances industrielles particulièrement originales et indépendantes de ses propres connaissances. De plus, nos travaux adressent également la limite N°3 qui était liée au lien entre stratégie de recherche et performances industrielles et académiques. Ici, nous montrons que le choix d'un modèle de couplage particulier *ex ante* apparaît comme un déterminant des performances scientifiques, industrielles et de double impact *ex post*.

Ainsi, nos travaux étaient particulièrement ancrés dans la littérature sur l'engagement académique, et nous avons détaillé nos contributions à cette littérature. Mais l'intérêt de notre modèle formel et de nos analyses et qu'elles ne nécessitent pas un découpage en termes d'institution s: nous pouvons tout à fait discuter nos résultats au regard de la conduite de la R&D et de l'innovation dans l'industrie. Nous exposons ainsi nos contributions à cette littérature.

2.2. Contributions à la littérature sur la R&D industrielle

La littérature sur l'engagement académique présente la relation science – industrie du point de vue du chercheur, et de ses performances académiques et commerciales. Mais si nous changeons de point de vue, en quoi nos travaux nous permettent-ils de contribuer à la littérature sur le management de l'innovation en lien avec la science et la R&D industrielle ? Comme nous l'avons montré dans la revue de littérature (Chapitre 2 - limite N°4), les travaux sur le lien entre recherche scientifique et développement s'appuient sur l'hypothèse implicite que tout

développement de savoir scientifique est intégré dans les produits, procédés et services de l'organisation. Or, cette hypothèse ne semble pas vérifiée dans l'industrie (Zahra, Kaul et Bolívar-Ramos, 2018). Ainsi, nous contribuons à cette littérature selon trois axes distincts.

Premièrement, le modèle formel permet de distinguer des logiques de conception scientifique et de conception industrielle au sein d'un même laboratoire de R&D. Ainsi, le concepteur industriel et le concepteur scientifique sont deux rôles qui peuvent être joués par une même équipe de R&D industrielle, impliquée dans la science. Soulignons ici que le fait que ces deux rôles coexistent dans un département de R&D peut apparaître comme paradoxal puisque par définition, les acteurs de la R&D sont engagés dans les deux activités et les synergies semblent évidentes. Pourtant, comme nous l'avons montré à l'aune du cas DuPont-Danisco, la représentation en distinguant les deux objectifs permet d'explicitier les phénomènes d'interactions cognitives à l'œuvre. C'est notre définition gestionnaire des activités de développement et de recherche scientifique qui permet ce type d'analyse. Cette division est bien sûr artificielle et sert notre démonstration. Mais cela signifie que pour favoriser la performance, il faut d'abord une véritable volonté d'impact scientifique : il faut que le département de R&D tienne ce rôle de concepteur scientifique, qui peut alors favoriser des mouvements de connaissances féconds pour les deux parties. De plus, nous avons montré ci-dessous qu'un critère important pour la performance était la *préservation des espaces de conception* : il ne suffit pas d'être « science based » pour être performant, il faut aussi assurer cette condition. Or, nous pouvons faire l'hypothèse que la performance des grands laboratoires industriels tels que les Bell Laboratories ou IBM s'explique non pas uniquement par des investissements tous azimuts dans la recherche fondamentale, mais par le fait que d'une part, les deux rôles de concepteurs scientifiques et industriels étaient joués dans ces laboratoires de R&D, mais aussi qu'ils ont probablement dû respecter la condition de préservation des espaces de conception. Nous pouvons suggérer ici que la préservation des espaces de conception soit une forme de compétence à part entière de la R&D, qui nécessite une très forte exposition aux problématiques industrielles concrètes, sans pour autant basculer dans l'hybridation pour favoriser la percée scientifique et pour poursuivre un objectif de double impact. Cette hypothèse est alimentée par une série d'éléments issus de nos travaux. Dans le cas DuPont-Danisco, on observe des cycles répétés de défixations croisées qui pourraient témoigner du développement sur le long terme de cette compétence. Ces éléments sont confirmés par l'étude des contributions scientifiques des industriels au champ de recherche sur les coronavirus : seuls les industriels qui ont un historique de contribution scientifique, ou qui collaborent de longue date avec un OPR sont capables d'obtenir des résultats scientifiques probants.

Deuxièmement, notre modèle formel permet de rendre compte du paradoxe évoqué par Zahra, Kaul et Bolívar-Ramos (2018). En effet, nous pouvons supposer que la variété des types de couplages (hybridés, séquentiels, double impact simultané) puisse être à l'œuvre dans un département de R&D. Nous avons par exemple montré dans le cadre de notre étude sur le secteur du pétrole et du gaz que nous pouvions trouver des traces de couplages à double impact simultané dans la R&D industrielle. Or, cela signifie que le lien entre développement de connaissances scientifiques nouvelles et impact industriel n'est pas mécanique : les limites de ces couplages évoquées dans le cas d'une relation OPR – industriel, restent donc valides. On peut tout à fait imaginer une dynamique de type classe des modèles séquentiels dans un laboratoire de R&D qui conduirait à des difficultés majeures d'intégration des connaissances scientifiques développées si les concepts industriels ne sont pas préexistants. Comme nous l'avons indiqué dans la sous-section précédente, dans le cadre des thèses CIFRE le choix d'un type de couplage était un facteur déterminant des performances industrielles et scientifiques du projet de recherche. Or, il est plausible que ce même phénomène soit à l'œuvre dans un département de R&D, en favorisant plus ou moins les défixations croisées. On soulignera à ce titre à quel point les propositions de Carl Duisberg pour le laboratoire d'Elberfeld de Bayer en 1889 évoquées au Chapitre 1 semblent favoriser les conditions du double impact simultané. En effet, la mobilité des chercheurs dans différentes usines de l'entreprise pour comprendre les processus de production et leurs besoins associés favorise le développement des connaissances du « concepteur industriel », et les laboratoires inspirés des laboratoires universitaires, équipés des outils d'observation les plus innovants, avec des présentations au format conférence scientifique pour favoriser la diffusion des découvertes scientifiques, favorise le développement des connaissances du « concepteur scientifique » tout en assurant des échanges bidirectionnels de ces connaissances indépendantes. On retrouve là encore ces mécanismes dans le cas des Bell Laboratories.

Enfin, troisièmement, nous avons exploré plusieurs pistes qui favoriseraient les couplages à double impact simultané dans l'industrie, en développant des régimes d'actions spécifiques. D'une part, nous avons montré à travers l'étude sur la recherche sur les coronavirus, que le temps long est nécessaire pour développer une expertise suffisante pour favoriser des percées industrielles, soit parce qu'une expertise préalable est nécessaire, soit parce qu'il est nécessaire que la collaboration éventuelle avec un OPR ne soit pas nouvelle. On retrouve l'idée que s'il est nécessaire que l'industriel occupe à la fois les rôles de concepteur scientifique et de concepteur industriel, ce choix semble difficile à opérer dans l'urgence d'une crise par exemple : il lui faut acquérir des connaissances scientifiques, notamment pour favoriser des échanges

bidirectionnels de connaissances indépendantes et originales. Seuls le temps long et un engagement de long terme dans la science peuvent permettre ces résultats. Il en va de même pour les collaborations avec des OPR : on retrouve ici des résultats classiques de la littérature sur les difficultés d'interaction entre ces deux institutions et la nécessité de créer des plateformes cognitives communes (Créplet, Kern et Schaeffer, 2007). D'autre part, nos travaux font échos aux développements de Cabanes (2017) et Cabanes, Le Masson et Weil (2020) concernant le pilotage de l'expertise pour l'exploration dans l'inconnu. Nos travaux dans l'industrie du pétrole et du gaz montrent qu'il est possible de favoriser des couplages à double impact simultané en fonction du type de régime de dynamique de l'expertise associé. Ici, nous sommes revenus sur la structure des connaissances du concepteur. Il apparaît dans nos travaux que les mécanismes de pilotage des expertises qui favorisent des combinaisons d'expertises éloignées dans l'organisation, avec potentiellement des expertises nouvelles (ie. externes) sont les plus performants au regard du double impact simultané. Ces éléments font échos à la proposition de la mise en place de « société proto-épistémiques d'experts » (Cabanes, Le Masson et Weil, 2020, p. 49) qui visent au renouvellement des expertises par la structuration des explorations. Au regard de notre modèle, ce collectif d'expert apparaît comme un outil intéressant pour favoriser la préservation des espaces de conception scientifiques et industriels et piloter les échanges de connaissances bidirectionnels. Nous avons montré qu'il est nécessaire que la connaissance originale externe fasse « sens » dans l'organisation, et permette de restructurer les connaissances pour favoriser le double impact simultané (à l'instar d'une logique d'open innovation qui serait uniquement basée sur l'expertise externe). Ce rôle pourrait être celui du collectif d'experts.

Ainsi, nous pouvons synthétiser notre contribution au champ de littérature portant sur la R&D industrielle, en réponse notamment à la Limite N°3 mise en exergue au Chapitre 2 :

Contribution à la littérature sur la R&D industrielle : Le modèle formel et les résultats associés sur les performances peuvent être appliqués au contexte de la R&D industrielle dans le cas où l'industriel jouerait à la fois le rôle du « concepteur scientifique » et du « concepteur industriel ». Cela signifie d'une part que la pluralité des couplages possibles s'applique dans l'industrie et que la volonté d'une contribution scientifique et la compétence de préservation des espaces de conception apparaissent ici comme des conditions essentielles au double impact simultané dans ce contexte. Ces éléments permettent d'apporter une explication théorique au fait que les découvertes scientifiques industrielles ne se traduisent pas nécessairement en produits nouveaux, puisque cela dépend du couplage dans lequel le centre de R&D s'inscrit. Enfin, ces éléments viennent alimenter des pistes managériales quant au

développement de la compétence de préservation des espaces de conception, et de l'intégration de connaissances externes par des sociétés proto-épistémiques d'experts.

Ainsi, à l'instar de ces contributions sur le champ de littérature de la R&D industrielle, nous pouvons aussi contribuer plus spécifiquement, à travers du modèle formel, à la littérature en sciences de la conception.

2.3. Contribution à la littérature en sciences de la conception

Le développement du modèle formel s'appuie comme nous l'avons explicité au Chapitre 4 sur les théories de la conception, et en particulier, la théorie C-K. Nous avons montré que la littérature était limitée sur l'utilisation de ces théories pour décrire des interactions entre plusieurs concepteurs (à l'exception de Gillier *et al.*, 2010 ; Gillier, Kazakçı et Piat, 2012 ; Klasing Chen *et al.*, 2017). Nous avons également prolongé les réflexions de Hatchuel *et al.* (2013) sur l'utilisation de ces théories pour décrire les phénomènes de découvertes scientifiques. Ainsi, notre modèle formel nous permet de faire une contribution à part entière à la littérature en sciences de la conception.

Pour développer notre modèle formel, nous avons décrit la pluralité de formes d'interaction entre un concepteur scientifique et un concepteur industriel. Ces éléments nous ont permis de mettre en avant trois notions clés : celles d'hybridation / préservation des espaces de conception, de fixations / défixations croisées et d'indépendantisation des connaissances. D'une part, une première contribution a trait à l'utilisation de C-K dans un contexte spécifique : celui des relations science - industrie. Mais nos développements peuvent permettre d'autre part de discuter toute interaction entre deux concepteurs. L'usage de ce cadre pour décrire des formes de co-exploration de l'inconnu entre deux concepteurs industriels pourrait ainsi s'avérer utile.

Les notions de fixations / défixations croisées peuvent être intégrées directement dans ces modèles d'interactions et viennent raffiner les analyses quant à la possibilité de voir des transferts de fixations ou des renforcements de fixations entre les acteurs. À l'inverse, les notions d'hybridation ou de préservation des espaces de conception doivent faire l'objet d'une discussion à part entière. En effet, il est tout à fait possible que deux industriels qui mènent une co-exploration conjointe en dehors de toute considération d'avancement scientifique souhaitent partager des concepts communs (voir ici les cas explorés par Gillier *et al.*, 2010). Bien sûr cette co-exploration peut être tout à fait féconde. Mais il est également possible que les acteurs n'aient pas intérêt à chercher le « plus petit concept dénominateur commun entre eux » qui

risquerait en plus de les enfermer dans des zones de fixations. Il peut y avoir un intérêt à garder les espaces de conception séparés, soit parce que les concepts sont de nature différente (un architecte et un industriel par exemple), soit parce que les concepts sont de même nature, mais n'auraient pas intérêt à être hybridés. Or, alors que la notion de collaboration implique généralement le développement d'un sujet d'intérêt commun, nous ouvrons ici le champ des possibles : les collaborations peuvent être fécondes sur la base d'un partage utile de connaissances, sans partage des concepts.

Ainsi, nous pouvons résumer notre contribution théorique pour ce champ de recherche :

Contribution à la littérature en sciences de la conception : Nous avons montré en quoi la théorie C-K est utile pour modéliser les relations science – industrie. Ces travaux nous ont amenés à proposer les notions d'hybridation / préservation des espaces de conception, de fixations / défixations croisées et d'indépendantisation des connaissances. Ces éléments, et la modélisation formelle associée, pourraient être intégrés à des réflexions plus larges sur les interactions entre deux concepteurs (par exemple deux industriels, ou un industriel et un architecte, etc.).

2.4. Contribution à la littérature sur l'analyse combinatoire de l'invention

Nos travaux se sont, comme nous l'avons montré dès le Chapitre 2, appuyés sur les théories de l'analyse combinatoire de l'invention. Nous avons notamment analysé cette littérature pour mieux comprendre l'effet causal des activités de recherche scientifique sur les activités de développement de produits, procédés et services. Ainsi, nos travaux nous permettent de faire une contribution à part entière à cette littérature, notamment au regard de l'essai N°3 qui porte sur la dynamique de l'expertise pour la science et l'innovation.

Les théoriciens de l'analyse combinatoire de l'invention ont principalement étudié la façon dont des inventeurs ou des organisations capitalisaient sur des connaissances internes (base de connaissances) et externes (Fleming, 2001) pour inventer. Ils ont également exploré les effets sur l'originalité ou la valeur des inventions, voire sur les performances financières de l'entreprise, de ces différentes connaissances (voir par exemple Arts et Fleming, 2018). Or, il a été suggéré que la base de connaissances de l'entreprise ait une structure particulière (Yayavaram et Ahuja, 2008). Les travaux (limités) sur ce sujet ont porté principalement sur le lien entre intensité des modifications de la structure de la base de connaissances et performances financières de l'entreprise, en montrant notamment que les changements étaient perturbateurs

pour l'organisation (Yayavaram et Chen, 2015). Pourtant, le rôle des effets de structuration de la base de connaissances sur l'invention n'a, à notre connaissance, pas été étudié (à l'exception des travaux de Kneeland, Schilling et Aharonson (2020) qui sont postérieurs à notre soumission de l'essai N°3), et c'est sur cette thématique que nous contribuons à cette littérature.

En analysant la structure de la base de connaissances de l'organisation par la théorie des graphs (de façon similaire à Yayavaram et Ahuja, 2008 ; Yayavaram et Chen, 2015) nous pouvons proposer une taxonomie nouvelle de la façon d'exploiter des connaissances internes et externes à l'organisation pour l'invention combinatoire, en tenant compte de la distance de ces connaissances en interne. Ainsi, notre taxonomie s'appuie sur quatre modes de recherche : le raffinement, la clusterisation, l'absorption et la recombinaison

Cette nouvelle taxonomie, que nous avons testée dans le cadre de l'industrie du pétrole et du gaz en nous appuyant sur des données de brevets est prometteuse, et devrait pouvoir permettre des analyses complémentaires de la dynamique des compétences et de l'expertise pour l'innovation dans la perspective de l'invention combinatoire. Nous pouvons résumer ainsi notre contribution :

Contribution à la littérature de l'invention combinatoire : Nous avons montré que la prise en compte de la structure de la base de connaissances de l'organisation dans la perspective de l'invention combinatoire peut permettre une nouvelle approche des modes de recherche (ie. *knowledge search*) pour l'invention. En particulier, nous proposons une nouvelle taxonomie qui tient compte de la distance entre les connaissances dans la base de connaissances de l'organisation et fondée sur quatre principaux modes : raffinement, clusterisation, absorption et recombinaison.

Ainsi, nous avons achevé notre revue de nos contributions théoriques. Nous présentons désormais les apports pour les praticiens.

3. Apports pour les praticiens

Les apports pour les praticiens de cette thèse s'articulent autour de deux axes principaux : les relations OPR – entreprises d'une part, la R&D industrielle d'autre part.

3.1.1. Apports pour les relations OPR – entreprises

Le point de départ de cette thèse s'est construit autour de paradoxes sur les relations science – industrie tirées de constats empiriques, notamment par des échanges avec les praticiens (voir

Chapitre 1). En particulier, nous avons fait l'hypothèse qu'un modèle à double impact simultané pourrait permettre de dépasser ces paradoxes et de développer des relations science – industrie fécondes scientifiquement et industriellement, au sein de même projets. Ces éléments avaient été mis en exergues par la volonté de praticiens ou d'institutions (ARPA-E, Stanford, etc.) de défendre ce type de couplages, qui semble particulièrement intéressant pour faire face aux crises (sanitaires, environnementales) qui nécessitent de concevoir de nouveaux savoirs scientifiques et de nouvelles innovations.

Un premier élément de cette thèse à destination des praticiens est la démonstration empirique du double impact simultané. S'il y avait quelques éléments dans des contextes particuliers qui permettaient de suggérer une réalité empirique et des performances intéressantes pour ce type de couplage, nous en avons proposé une démonstration à grande échelle. En particulier, nous avons d'abord exploré le cas du double impact simultané dans les relations entretenues entre chercheurs des OPR et industriels. Rappelons certains freins des scientifiques des OPR à collaborer avec l'industrie : risque d'enfermement dans la science résolutoire, risque d'influence inappropriée des industriels sur les résultats des recherches, voire même risque en termes de réputation pour le scientifique (voir Chapitre 1 - Paradoxes 2 et 3). Or, nous avons montré avec le cas des lauréats du Prix Nobel qu'une part non négligeable (env. 20%) des découvertes majeures sur longue période sont le fruit de chercheurs engagés avec l'industrie, et que mieux encore, cette part est en forte augmentation sur les dernières périodes (env. 50% sur la période 2010-2016). Ces éléments nous amènent à une réflexion profonde sur l'organisation des relations OPR – industrie : loin de ne favoriser qu'une science résolutoire, elles peuvent permettre de favoriser les percées les plus importantes de l'histoire des sciences.

Deuxièmement, nous avons tenté de mettre en lumière dans nos travaux les conditions qui pourraient permettre de favoriser le succès des couplages à double impact simultané. Il apparaît pour le cas des relations OPR – industrie qu'il faudrait favoriser (1) l'échange bidirectionnel de connaissances originales et (2) la préservation des espaces de conception. Quelles pistes pouvons-nous évoquer à ce sujet pour les praticiens ? D'une part, ces éléments doivent conduire à des réflexions sur ce que peut être une connaissance indépendante et originale qui favoriserait la défixation de l'autre partie dans le cadre de la collaboration OPR - industrie. D'autre part, une réflexion doit être engagée sur les moyens de favoriser une logique d'échanges bidirectionnels. Premièrement, d'après nos analyses, qui sont limitées à quelques contextes (industrie du pétrole et du gaz, recherche sur les coronavirus), il semble que le développement de relations sur le long terme entre les parties devrait pouvoir faciliter ces stratégies. Deuxièmement, certains cadres institutionnels favorisent le développement d'un climat de

confiance et des relations de long terme qui permettent ces échanges bidirectionnels, en évitant a priori les écueils d'une science résolutoire : programme de financement Labcom⁷⁸ de l'Agence Nationale de la Recherche qui favorise des projets de recherche de long terme entre des PME et des laboratoires de recherche, thèses CIFRE, laboratoires mixtes CNRS ou IRT. Les expériences allemandes (voir RWTH Aachen par exemple) de créer des campus avec des locaux dédiés aux personnels de la R&D des entreprises pour être en contact permanent avec des chercheurs des OPR semblent également prometteuses. Si la littérature a démontré sur longue période que les industriels ont tout intérêt à travailler avec les OPR (voir les débats récents sur l'open-innovation à ce sujet), il semble que ces éléments devraient également motiver les chercheurs à s'impliquer encore davantage dans ces relations, et à les piloter proactivement (avec l'appui des institutions publiques). Enfin, troisièmement, il semble que les chercheurs et les industriels doivent développer leur compétence de « préservation des espaces de conception ». Le cas des thèses CIFRE est intéressant : alors que l'engagement académique est plutôt l'apanage de chercheurs seniors, les thèses CIFRE permettent sans doute aux doctorants d'acquérir cette compétence. Il serait intéressant de mieux comprendre comment favoriser son développement. Outre cette logique de compétence, il est possible que le cadre contractuel puisse également favoriser cette logique.

Nous pouvons donc conclure ici sur les apports pour les praticiens :

Apport pour les praticiens N°1 : Les couplages à double impact simultanés sont possibles et apparaissent plus performants en termes de retombées industrielles et scientifiques que les autres modèles classiques de couplage. Des pistes sont possibles pour l'encourager et elles passent par une réflexion sur les cadres institutionnels qui peuvent favoriser les échanges bidirectionnels, une analyse de l'originalité et de l'indépendance des connaissances transférables entre les parties, et la préservation des espaces de conception par le développement d'une compétence ou de cadres institutionnels dédiés.

Au-delà des apports pour les relations OPR – entreprises, cette thèse contribue également à mieux comprendre les enjeux de la R&D industrielle, en particulier le lien entre innovations et activités scientifiques.

3.1.2. Apports pour la R&D industrielle

⁷⁸ <https://anr.fr/fr/detail/call/laboratoires-communs-organismes-de-recherche-publics-pme-eti-labcom-appel-a-propositions-editi/>

Cette thèse permet également de contribuer à une meilleure compréhension des activités scientifiques menées par des entreprises dans le cadre de leurs activités de R&D.

Nous avons exploré les interactions entre conception innovante de produits, services et procédés et activités de recherche scientifique au sein d'un même département de R&D. Il apparaît que si le modèle de couplage à double impact simultané peut être promu dans le cadre des relations OPR – industrie, il est aussi possible de l'envisager au sein d'un centre de R&D industriel. Nous avons fait la démonstration que ce cadre permettait de mettre en lumière deux caractéristiques clés pour la science et l'innovation dans le pilotage de la R&D : (1) un engagement fort de l'organisation vers la découverte scientifique (ie. industriel jouant aussi le rôle de concepteur scientifique) et (2) une préservation (artificielle) des espaces de conception scientifiques et industriels. Cela signifie qu'opérationnellement, il est nécessaire de permettre aux équipes de R&D d'être exposées aux problématiques industrielles de l'entreprise, sans devoir nécessairement chercher des solutions immédiates et en les incitant à dépasser les verrous scientifiques existants. Nous avons montré que ce modèle pouvait être vertueux et permettre d'engager des cycles de découvertes – inventions féconds, y compris dans l'industrie (cas DuPont-Danisco, étude pétrole et gaz). Là encore, le développement d'une compétence de préservation des espaces de conception sur le temps long semble important. Ces éléments peuvent notamment s'appuyer dans les organisations sur le management de l'expertise qui peut permettre de piloter les explorations en garantissant une logique de combinaisons d'expertises indépendantes et originales au sein de l'organisation, avec des expertises externes.

Nous pouvons donc conclure ici sur les apports pour les praticiens :

Apport pour les praticiens N°2 : Le modèle de couplage à double impact simultané peut être promu au sein même de la R&D industrielle, et peut engendrer des cycles de découvertes – inventions particulièrement féconds. Nous en avons fait la démonstration empirique et proposons que les praticiens s'engagent dans des réflexions sur la manière dont ils peuvent ancrer leur engagement dans la science, et favoriser la préservation (artificielle) des espaces de conception scientifiques et industriels. L'appui par le pilotage de l'expertise semble une voie prometteuse.

Ainsi, nous pouvons conclure ce Chapitre de discussion en évoquant quelques perspectives de recherches ouvertes par nos travaux.

4. Perspectives de recherche

Nos contributions permettent d'envisager plusieurs perspectives de recherche qui pourront constituer les prémices du programme de recherche post-thèse du chercheur. Ces dernières portent notamment sur deux axes principaux : l'analyse des types de couplages dans différents environnements (et en particulier les couplages à double impact simultané), l'exploration approfondie des conditions managériales et institutionnelles associées à différents types de couplages.

Premièrement, notre conceptualisation des couplages à double impact simultané s'inscrit dans des réflexions plus globales et internationales sur les limites du modèle linéaire (Godin, 2006) et l'enjeu de dépasser les oppositions entre « recherche fondamentale » et « recherche appliquée » pour promouvoir une logique de simultanéité (Goldstein et Narayanamurti, 2018 ; Narayanamurti et Odumosu, 2016). Ainsi, la conceptualisation des couplages de type hybridé, séquentiel et à double impact simultané permet de s'interroger sur les différents contextes des relations science – industrie et à la représentation desdits modèles dans ces contextes. Nous avons dû dans cette thèse faire des choix de contextes d'analyse : les CIFRE, les Prix Nobel, les coronavirus, etc. D'autres pistes s'avèrent vertueuses pour des recherches complémentaires. D'une part, faire un pont en double impact simultané et entrepreneuriat peut s'avérer une piste féconde. Ce choix est justifié d'abord par l'effet « start-up » dans l'analyse de la performance des CIFRE : elles conduisent en moyenne à des effets négatifs sur les performances scientifiques, mais certaines start-up s'engagent également dans des thèses particulièrement exploratoires proches de logiques de double impact. La récente notion de « start-up deeptech », présentée comme le résultat d'un travail de recherche académique, pourrait faire l'objet d'analyses supplémentaires pour peut-être y déceler des formes fécondes de double impact simultané. D'autres cas pourraient être envisagés où les start-up co-évoluent avec des laboratoires publics (ex., Fini, Perkmann et Ross, 2021 ; Robinson, Rip et Mangematin, 2007). D'autre part, une analyse des cas de double impact à plus grande échelle en lien avec la R&D industrielle peut s'avérer intéressante. Une piste qui semble féconde serait d'étudier les brevets qui citent en SNPL des articles scientifiques écrits ou co-écrits par la même entité que celle déposant le brevet. Une analyse des performances de ces brevets particuliers vis-à-vis des autres brevets pourrait s'avérer féconde. Enfin, une autre piste prometteuse pourrait être de s'interroger sur les cas de double impact simultané dans certains grands laboratoires publics ou écosystèmes qui enregistrent des relations privilégiées avec l'industrie. Nous pourrions nous intéresser aux pratiques managériales dans les écosystèmes où activités de recherche scientifique et activités de développement semblent relever du double impact simultané : INRA

(ex., Aggeri, Fixari et Hatchuel, 1998) ou NASA (ex., Mazzucato et Robinson, 2018 ; Robinson et Mazzucato, 2019) par exemple.

Deuxièmement, au-delà de l'observation des types de couplages à l'œuvre dans certains contextes, des analyses complémentaires pourraient être envisagées sur les conditions managériales, l'importance du leadership, les cadres institutionnels, les besoins de formations associés au double impact simultané. Nous avons pu présenter quelques conditions dans les essais N°3 et N°4, mais nous commençons seulement à lever le voile sur ces éléments. Par exemple, il pourrait être utile de s'interroger sur les manières de développer et renforcer les compétences associées à la préservation des espaces de conception des acteurs : est-ce une compétence distincte à enseigner ? Faut-il former les managers de la R&D sur ces questions spécifiques ? Et si oui, comment le faire ? Cela interroge par exemple sur le rôle que pourraient prendre certains acteurs institutionnels de l'innovation dans ce cadre : comment peuvent-ils devenir des garde-fous de la préservation des espaces de conception et assurer des échanges bidirectionnels dans la recherche partenariale ? Bien sûr cela invite à conduire des études plus approfondies, et notamment qualitatives sur ces éléments. Repartir de certaines thèses CIFRE déjà codées peut être une piste potentielle. En complément, réfléchir au rôle du leadership par exemple peut également s'avérer prometteur, en faisant écho aux travaux sur le leadership créatif et ses effets sur les fixations (voir par exemple (Camarda *et al.*, 2017)). Cela pose également des questions sur les équipes projet (Nagle et Teodoridis, 2019 ; Teodoridis, 2017) qui pourraient favoriser le double impact : faut-il des experts ? Des généralistes ? Une combinaison des deux types d'inventeurs ?

Enfin, troisièmement, nos résultats notamment au regard des théories de la conception nous enjoignent également à s'intéresser à d'autres types de collaborations que celles entre des activités de développement de produits, procédés ou services et des activités de recherche scientifique, où la question de l'hybridation ou non des espaces conceptuelle pourrait être cruciale. Par exemple, des collaborations entre des entités industrielles de R&D complémentaires liées à des effets de fusions et de rachats, ou des collaborations encore plus variées : scientifiques et articles, architectes et industriels, etc.

Synthèse du Chapitre 6

Ce dernier chapitre vient clore ce travail de thèse par une discussion sur les apports théoriques, les enseignements pour les praticiens et vise à donner des perspectives sur le programme de recherche post-thèse que permettent ces travaux.

Premièrement, nous contribuons à la littérature sur l'engagement académique en modélisant les effets cognitifs à l'œuvre dans les relations science – industrie. Pour cela nous proposons la notion novatrice de *couplage science – industrie* qui s'appuie sur deux sous-notions développées pour cette thèse : la *préservation / hybridation des espaces de conception*, et *l'indépendantisation des connaissances*. Nous contribuons également à cette littérature en montrant que les performances scientifiques et industrielles de l'engagement sont contingentes au choix d'un type de couplage, et que cet engagement peut conduire, à grande échelle, à la production de connaissances scientifiques parmi les plus novatrices (ie. cas des Nobel).

Deuxièmement, nous contribuons à la littérature sur la R&D industrielle en montrant qu'un centre de R&D peut être modélisé à partir d'une double logique de concepteur scientifique et industriel. Ce paradigme permet d'appliquer les résultats du modèle formel à ce contexte spécifique, et de fournir un cadre explicatif à certains succès de la recherche industrielle (ex. Bell Laboratories) ou limites, par exemple quant aux difficultés d'exploitation des connaissances scientifiques développées en interne d'un centre de R&D.

Troisièmement, nous sommes en mesure de faire une contribution spécifique aux théories de la conception. La modélisation des interactions entre deux concepteurs, et en particulier la notion de préservation des espaces de conception, peut être applicable plus largement (par exemple au cas d'un industriel et un architecte).

Quatrièmement, nous contribuons à la littérature sur l'invention combinatoire en proposant une typologie nouvelle des régimes de dynamique d'expertise, et qui tient compte de la structure de la base de connaissances de l'organisation.

Ces résultats sont également d'intérêt pour les praticiens : nous apportons une grille de lecture novatrice des relations science – industrie avec des pistes à explorer, notamment pour favoriser le développement d'une compétence de préservation des espaces de conception, et pour mettre en place des cadres institutionnels qui permettraient de favoriser les échanges bidirectionnels de connaissances originales et indépendantes.

Enfin, nous concluons ce chapitre par quelques pistes de recherche additionnelles. En particulier, nous proposons que le modèle formel puisse être d'intérêt pour explorer l'entrepreneuriat académique. Par ailleurs, il semble que des études dans d'autres cadres institutionnels et contextes pourraient s'avérer intéressantes, notamment afin de déterminer des leviers managériaux à des niveaux plus micro, à l'échelle du pilotage d'un projet par exemple.



PARTIE 2 :
ESSAIS DE LA THESE

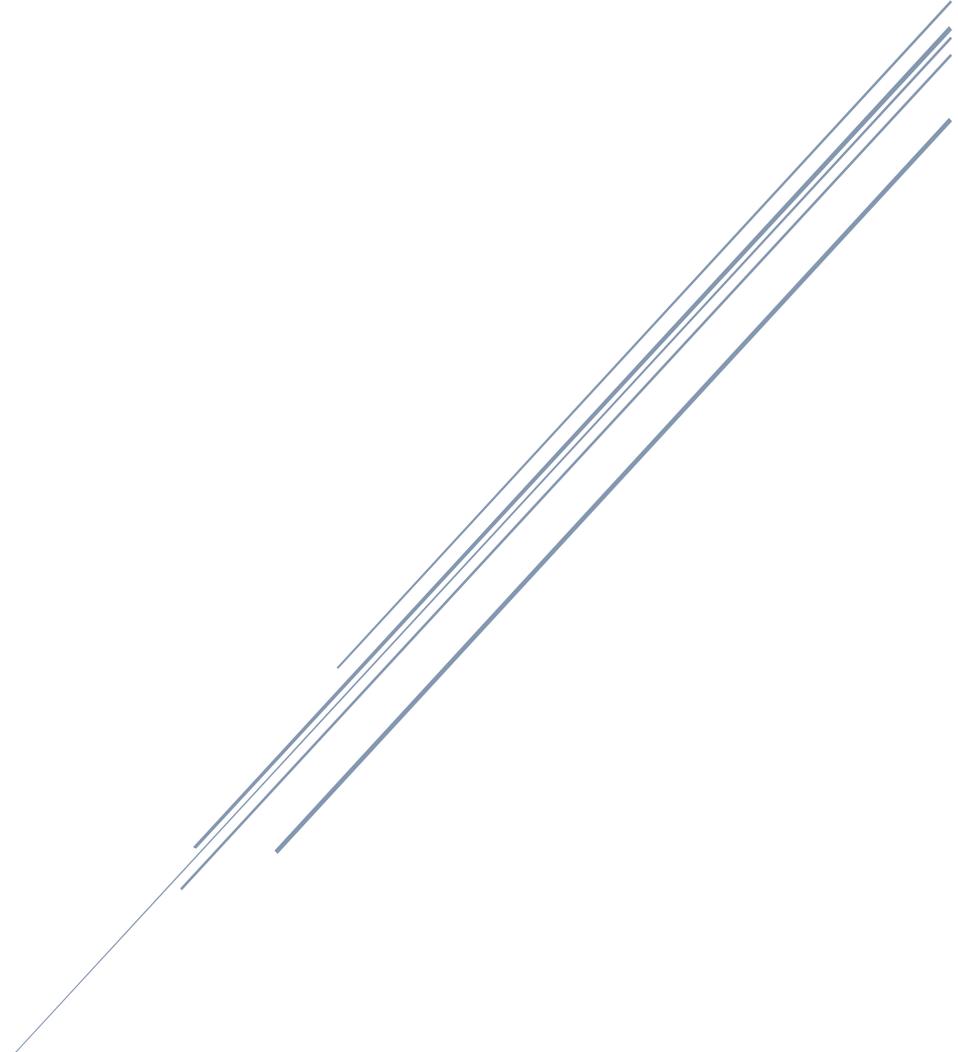
Cette seconde section vise à présenter successivement les différents essais qui composent cette thèse et qui ont été introduits dans les Chapitres 5 et 6 de la partie précédente. Les essais sont repris dans le tableau ci-dessous :

Essais	Détails	Page
Essai N°1	<i>Another way to get the Nobel Prize: The role of the industry in the emergence of new scientific breakthroughs</i> , Quentin Plantec, Pascal Le Masson, Benoît Weil.* - Présenté à <i>R&D Management Conference 2021</i> , Dublin (en ligne)	p. 335
Essai N°2	<i>Market-pull or research push? Effects of research orientations on university-industry collaborative Ph.D. projects' performances.</i> Quentin Plantec, Benjamin Cabanes, Pascal Le Masson, Benoît Weil. - Présenté à <i>R&D Management Conference 2019</i> , Paris - Présenté à <i>Academy of Management Conference 2021</i> , Philadelphia (en ligne)	p. 375
Essai N°3	<i>Impact of knowledge search practices on the originality of inventions: a study in the oil & gas industry through dynamic patent analysis</i> , Quentin Plantec, Pascal Le Masson, Benoît Weil - Présenté à <i>Academy of Management Conference 2020</i> , Vancouver (en ligne) - Publié dans <i>Technological Forecasting & Social Change</i> , vol. 168, 2021 (DOI : https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120782)	p. 411
Essai N°4	<i>Crises sanitaires et contributions industrielles à la recherche scientifique : le cas des coronavirus</i> , Quentin Plantec, Clément Sternberger, Pascal Le Masson, Benoît Weil - Soumis à la revue <i>La Revue Française de Gestion</i> (accepté - en cours de publication)	p. 459

* Soumis à *R&D Management Conference 2020* et *DRUID Conference 2020*, toutes deux annulées en raison de la pandémie de Covid-19

ESSAI N°1

Another way to get the Nobel Prize: The role of the industry in the emergence of new scientific breakthroughs



Thème	Détail
Auteurs	<ul style="list-style-type: none"> • Quentin Plantec, Pascal Le Masson, Benoît Weil
Présentations conférences	<ul style="list-style-type: none"> • V1 : Conférence <i>R&D Management 2020</i> (soumis mais annulée Covid-19) • V2 : Conférence <i>DRUID 2020</i> (soumis mais annulée Covid-19) • V3 : Conférence <i>R&D Management 2021</i>, Dublin ed. (en cours de revision)
Langue	<ul style="list-style-type: none"> • Anglais

ANOTHER WAY TO GET THE NOBEL PRIZE: THE ROLE OF THE INDUSTRY IN THE EMERGENCE OF NEW SCIENTIFIC BREAKTHROUGHS

Quentin PLANTEC, Pr. Pascal LE MASSON & Pr. Benoit WEIL

ABSTRACT: Since the 1980s, most industrial corporations cut-off their investments in fundamental research activities. While the benefits for scientists of interacting with the industry have been demonstrated many times, (1) how much scientific breakthroughs are still emerging, in modern science, from scientists engaged with the industry, and (2) how this would affect ex-post knowledge diffusion are yet to be documented. To do so, we explored the extent to which scientists from the quasi-complete cohort of Nobel laureates in Physics, Medicine, and Chemistry were engaged with industrial corporations for their breakthrough discoveries. We designed a unique dataset of their ties with the industry based on affiliations review of 84,423 academic papers and applicant review of 5,207 patent families. First, we showed that one-fifth of the studied cohort of Nobel laureate was engaged with the industry at the date of their breakthrough discovery. More importantly, this share is still increasing. During the last period of observation, more than one of two laureates belong to this category. Second, while those scientific discoveries were partly made possible thanks to those Nobel laureates' industrial partners, the laureates' subsequent knowledge was not bound to their initial sets of partners. Indeed, those laureates experienced similar knowledge diffusion-to-industry rates than other laureates but higher academic production rates and diffusion-to-academia rates. Finally, we claim that the extent to which scientific new knowledge still emerges in relation to industrial contexts in modern science has been under-evaluated and open rooms for further research.

KEYWORDS: Scientific discovery, University-Industry collaborations, Nobel Prize, New Product Development, Knowledge absorption, Academic engagement.

ACKNOWLEDGMENT: We would like to thanks C. Sternberger (INPI), N. Sennequier (INPI), F. Caillaud (WIPO), S. Lenfle (DTMI), A. Hatchuel (DTMI) and the members of the Design Theory & Management of Innovation (DTMI) chaire for their helpful comments for this article.

ANOTHER WAY TO GET THE NOBEL PRIZE: THE ROLE OF THE INDUSTRY IN THE EMERGENCE OF NEW SCIENTIFIC BREAKTHROUGHS

AT&T's Bell Laboratories have fourteen Nobel Prize laureates among their past employees⁷⁹ while IBM has six⁸⁰. Those are two well-known examples of companies which established large corporate laboratories, leading them to major scientific breakthroughs such as the transistor, the cosmic microwave, or the computer (Arora, Belenzon et Pataconi, 2018 ; Buder, 2000). However, the organization of science has been subjected to profound transformations since the 1980s (e.g. Mowery, 2009; Mowery & Oxley, 1995; Pisano, 2010). A key one is that leading companies mainly cut-off internal fundamental research activities⁸¹ and associated resources were redirected to more short-term and commercially-oriented projects (e.g. Bhaskarabhatla & Hegde, 2014a). This “*research bloodbath (...) [that] rolled around the world*” (Buder, 2000, p. 30) can be appreciated through the significant decrease of the number of scientific papers written by corporate R&D staffs from the 1980s and the 1990s (Bhaskarabhatla et Hegde, 2014b ; Tijssen, 2004). Despite those changes, some key scientific breakthroughs still result from scientists interacting with industrial companies: CRISPR-Cas system discovery by P. Horvath and his team with the company DuPont-Danisco in 2007 (Lander, 2015) and who paved the way for the 2020 Chemistry Nobel Prize, or the optical tweezers discovery by Arthur Ashkin with NOKIA and who were awarded the Physics Nobel prize in 2018. This article aims at **digging into the extent to which scientific breakthroughs still emerge from scientists engaged with the industry in modern science and the effects on subsequent scientists' knowledge diffusion rates towards both science and industry.**

Following the significant decrease of the industry contribution to fundamental science since the 1980s, first, innovation management researchers largely contributed to a better understanding of how firms were still able to both produce science-intensive commercial inventions and absorb the most recent scientific findings (eg. Arora et al., 2018; Arts & Veugelers, 2020), in particular by relying on distributed open-innovation practices (e.g. Chesbrough, 2003; Chesbrough & Rosenbloom, 2002; West & Bogers, 2014). Second,

⁷⁹ C. Davison, J. Bardeen, W. Brattain, W. Shockley, P. Anderson, A. Penzias, R. Wilson, S. Chu , H. Störmer, D. Tsui, R. Laughlin, W. Boyle, G. Smith, A. Ashkin

⁸⁰ L. Esaki, G. Bining, H. Rohrer, G. Bednorz, A. Mueller and E. Moerner

⁸¹ IBM, for example, eliminated one-third of its total R&D budget in 1993 getting from 5.1 billion dollars to 3.5 billion dollars only (Buder, 2000)

management researchers broadly explored the mechanisms that supported knowledge transfer mechanisms from university to the industry and therefore, how academics, universities and their Technology Transfer Offices (TTO) were mainly able to contribute to firms' open-innovation processes (e.g. D'Este & Perkmann, 2011; Perkmann & Walsh, 2009). Third, management scholars contributed to a greater understanding of academic engagement with the industry, which can be defined as “*knowledge-related interactions by academic researchers with non-academic organisations, as distinct from teaching and commercialization*” (Perkmann *et al.*, 2021). In particular, scholars reviewed individual motives, characteristics and institutional effects associated with academic engagement (see. Perkmann *et al.*, 2013, 2021 for comprehensive literature review). While the literature remains fragmented, it has been repeatedly demonstrated that academic engagement is widely practiced (eg. Cohen, Nelson, & Walsh, 2002) and is associated with a positive effects on research productivity (eg. Bikard, Vakili, & Teodoridis, 2019). This literature is of crucial interest to explore the relationship between academic engagement and scientific breakthrough discoveries because we have “*only tentative evidence on the effect of engagement on [...] the potential for breakthroughs increases.*” (Perkmann *et al.*, 2021).

Hence, considering Nobel laureates as an adequate proxy for breakthroughs discoveries, it is undeniable that the 20 Nobel laureates who were IBM or AT&T's Bell Laboratories alumni benefited, somehow, from their repeated interactions with those industrial companies for their scientific breakthroughs (eg. Gertner, 2012). Nevertheless, while the role of the industry in the early emergence of scientific breakthroughs has been documented through questionnaires or case studies (e.g. D'Este & Patel, 2007; Evans, 2010; Narayanamurti & Odumosu, 2016; Stokes, 1997), the “*backward link*” (D'Este *et Perkmann*, 2011, p. 330) of being engaged with the industry on fundamental research activities — particularly for breakthrough discoveries — is still underappreciated (Perkmann *et al.*, 2021) and contentious (Murray, 2010). On the one hand, some scholars claimed that engaged academics might suffer from publications restrictions or additional delays to contribute to open-science due to secrecy and patenting activities (Blumenthal *et al.*, 1996 ; Czarnitzki, Grimpe *et Toole*, 2015). It also has been reported that academic engagement with the industry may divert scientists from curiosity-driven research (Azoulay, Waverly *et Toby*, 2009 ; Callaert *et al.*, 2015 ; Van Looy, Callaert *et Debackere*, 2006), implying weaken the Mertonian norms of science in academia (Mowery, 2009 ; Perkmann *et Walsh*, 2009). On the other hand, the industry may also be a valuable source of skills, materials, equipment, resources, and ideas to fuel fundamental research (eg. Ankrah, Burgess, Grimshaw, & Shaw, 2013; Banal-Estañol, Jofre-Bonet, & Lawson, 2015; D'Este &

Perkmann, 2011; Gulbrandsen & Smeby, 2005; Lee, 2000; Mansfield, 1995; Siegel, Waldman, & A. Link, 2003). Scientific activities performed in industrial contexts also conduct researchers to be more interested in the “*usage*” of their fundamental breakthroughs, a phenomenon that has been associated with higher research performances in specific contexts, in relation with the Pasteur Quadrant (Goldstein et Narayanamurti, 2018 ; Narayanamurti et Odumosu, 2016 ; Stokes, 1997 ; Tijssen, 2018). Furthermore, industry-university interactions may also conduct more efficient specialization between researchers and their industrial partners, particularly for scientific breakthroughs with commercial potential, with positive effects on follow-on research and researchers’ performances (Bikard, Vakili et Teodoridis, 2019).

Hence, due to the structural changes in the science-industry ecosystem (i.e. withdrawal of leading firms on fundamental research activities and the development of open-innovation), as well as the need to disentangle both adverse and positive effects of academic engagement with the industry on academics’ research activities, **(1) to what extent scientific breakthroughs are still emerging from academics engaged with the industry** and **(2) how this would affect knowledge diffusion of those academics**, are yet to be documented. Here, we take a step towards filling these gaps by assessing the magnitude and evolution of academic engagement with the industry in relation to new scientific discoveries from scientists awarded with the Nobel Prize. We also explored the effects of such an engagement with the industry on the follow-on (future) laureate knowledge diffusion towards academia and the industry. We acknowledged that in the long run, Nobel laureates constituted an adequate proxy of fundamental scientific activities evolution and, can help us better understand modern science dynamics (Jones, 2009). Exploring this relationship between academic engagement and scientific breakthroughs constitutes a key question for universities, industrial companies and policy makers as “*academic engagement is practiced more widely across disciplines and is of greater economic significance for universities and companies*” (Perkmann *et al.*, 2021, p. 104114). Hence, our findings are likely to be relevant for both R&D, and University TTO managers, as well as policymakers, to help in the understanding of science-industry ecosystems and to provide insights on how to strategically managed university-industry interactions or corporate scientists teams.

To do so, we relied on a sample of 518 Nobel Prize laureates in “hard science” (Physics, Medicine, and Chemistry) who were awarded between 1902 and 2016 for their outstanding scientific discoveries. We designed a unique new dataset of Nobel laureates’ ties with the industry based on database crossing (Jefferson *et al.*, 2018; Li, Yin, Fortunato, & Wang, 2019; European Patent Office, 2019) and text-matching technique. We carried (1) an in-depth review

of 21,897 distinct affiliations or funding organizations reported in 84,423 academic papers published by Nobel laureates, as well as (2) a detailed analysis of organizations cited as applicants in 5,207 patent families that we were able to allocate as having been filled by a Nobel laureate. Previous research showed that reviewing academic papers or patent affiliations with the industry constitute an adequate proxy to measure researchers or inventors ties with industry (e.g. Abramo, D'Angelo, Di Costa, & Solazzi, 2009; Abramo, D'Angelo, & Solazzi, 2010, 2012; Arora et al., 2018; Calvert & Patel, 2003; Tijssen, 2012). We underline that we were not the first to rely on Nobel data, as it has been primarily used in management science, particularly since the seminal work of Zuckerman (Zuckerman, 1977). Scholars, for example, reviewed specificities of the cohort such as the extent to which laureates changes institutions (Schlagberger, Bornmann et Bauer, 2016), the alteration of co-authors on the laureates' publications (Chan, Önder et Torgler, 2015, 2016), the difference in impact, productivity and research networks of Nobel laureates and a matched group of non-laureate (e.g. Chan, Mixon, & Torgler, 2018; Wagner, Horlings, Whetsell, Mattsson, & Nordqvist, 2015). Others also used Nobel publications or patents data as benchmarking technique (e.g. Fontana, Iori, Montobbio, & Sinatra, 2020). Nevertheless, to our knowledge, we are the first study to analyze the relation between academic engagement of Nobel laureates with industrial companies and their breakthrough discoveries. As, thanks to Li et al. (2019) work, we were able to retrieve the exact first paper for which a given laureate was awarded the Nobel Prize (i.e. here called *Prize Paper*), we conceptualize the notion of *industry inspiration*. Indeed, we consider that **a given laureate has been inspired by industry if, he or she was engaged with industry before (or at the date) of the academic publication of the paper for which he or she will be awarded the Nobel laureate (ie. breakthrough discovery)**. Based on the literature, we assume that the engagement with the industry provide the laureate with specific knowledge that had an influence on the scientific breakthrough. As a proxy for industry-inspiration, we used the different sorts of engagement with the industry that a given laureate might have experienced before the publication of its Prize Paper. We highlight here that we are not testing the causal relation between the effect of being engaged with the industry and the probability of making a scientific breakthrough. Nevertheless, we are able to evaluate the magnitude of engagement with the industry on the emergence of radical scientific breakthroughs, as well as evolution and forms of this phenomenon. We are also able to compare subsequent knowledge diffusion between engaged and non-engaged scholars that made a scientific discovery, considered as having a similar magnitude.

Our primary contribution in this article is to establish that, if in total, 1/5 of the cohort of Nobel laureates was engaged with the industry at the date or before their fundamental breakthroughs, the share of industry-inspired laureates **is mainly increasing despite the cut-off of corporate laboratories started in the 1980s**. Hence, **more than one out of two laureates awarded between 2010 and 2016** (our last period of observation) **made their scientific discovery in relation to knowledge arising from their ties with industry**. The “*golden age*” (Gertner, 2012) of fundamental research in industrial corporations is sometimes regretted, especially in Press (see the example given by Arora et al., 2018). However, William Shockley, Walter Brattain, and John Bardeen, who were well-known for being awarded the Physics Nobel Prize in 1956 for “*their researches on semiconductors and their discovery of the transistor effect*”⁸² when working at the Bell Laboratories, constituted more an anomaly of scientific activities at that time, than a category of discoveries happening regularly in science. We also demonstrated that inspiration by industry is discipline dependent: a more significant number of laureates were engaged with the industry in Physics and Chemistry than in Medicine, even if we observed a catch-up phase in the last couple of decades that matched with recent structural changes in the way of doing, for example, biomedical research in healthcare contexts (Anckaert, Cassiman et Cassiman, 2020). We claim that those findings advocate for a renewal of the understanding of the industry’s role in the early emergence of new scientific knowledge in modern science because the magnitude of this phenomenon might have been undervalued.

Our second key contribution is to show that, despite that industry-inspired Nobel laureates’ discoveries were partly made possible thanks to their industrial partners, **the laureates’ subsequent knowledge was not bound to their initial sets of partners**. To do so, we used a negative binomial regression model combined with difference-in-difference estimators to compare the behavior of industry-inspired laureates to other Nobel laureates. We showed that industry-inspired laureates experienced **similar knowledge diffusion-to-industry rates than other laureates following their breakthrough discoveries** but **higher academic production rates and diffusion-to-academia rates**. Hence, we **do not observe a larger shift towards more applied research** for those industry-inspired laureates than their peers. We claim that industrial partners of engaged scientists were not able to entirely restrict the diffusion of very new and radical fundamental knowledge beyond their companies’ boundaries. We assume that new scientific knowledge might be either too radical or at a stage

⁸² Source: Nobel.org

that is too far from application to conduct industry partners to favor full appropriation or disclosure restriction of major follow-on research works.

To summarize, our contribution is to evaluate the magnitude of academic engagement in the emergence of new scientific breakthroughs and to disentangle the effects of academic engagement on ex-post knowledge diffusion of findings towards both the industry and the academy at the scientist level. Our findings suggest that many recent scientific advances are arising from scientists deeply engaged with the industry at the early emergence of the new knowledge, without significant negative drawbacks on those scientists' careers performances or ex-post scientific knowledge diffusion towards academia or industry. Hence, some scientists can **maintain a research orientation towards fundamental research questions by simultaneously benefiting from their efforts to diffuse their research results to their industrial partners**. Those academics would be able to maintain their curiosity-driven orientation while collaborating with firms. It opens new ways to look into research interactions with the industry, how they are involved in open-innovation practices, and how firms and universities managed their collaborations. Finally, we discussed implications for R&D management, study limitations, and areas for future research.

1. Conceptual background

To derive assumptions on the relation between academic engagement and scientific breakthroughs and its effects on subsequent academics' knowledge diffusion, we first review the mechanism by which academic engagement would favor the development of new and original scientific knowledge. Second, we dig into the controversial debate on the different effects of such an engagement with the industry on knowledge diffusion following the scientific breakthrough.

1.1. Academic engagement and scientific breakthroughs

As identified by Wit-de Vries (2018), the role of the industry when interacting with engaged academics have been mainly oversimplified to the formulation of interesting research questions and the furniture of data regarding application contexts (de Wit-de Vries *et al.*, 2018). Furthermore, this “*backward links* [of the technological development on the potential for new scientific discoveries is] *often under-appreciated*” (D’Este et Perkmann, 2011, p. 311). Here, we review two main ways by which academic engagement can favor scientific breakthroughs:

(1) by fueling with diverse original resources the scientific activities and (2) by creating synergies between scientists and their industrial partners through the engagement.

Regarding the first mechanism, first, engaged academics may benefit from the fact that the industry is a valuable source of skills, material, equipment, resources, and ideas to fuel the upstream process of research (e.g. Banal-Estañol, Jofre-Bonet, & Lawson, 2015; D'Este & Perkmann, 2011; Gulbrandsen & Smeby, 2005; Lee, 2000; Mansfield, 1995; Siegel, Waldman, & Link, 2003). First, scientists can be fueled by new ideas or new research questions with repercussions on their scientific agenda (Gulbrandsen et Smeby, 2005 ; Mansfield, 1995). Mansfield (1995), in a study on 200 academic researchers, showed that half of the respondents reported that their choice of studying a given problem and the direction of their work was considerably or primarily influenced by their funders and/or users, with a more significant effect for scientists collaborating with the industry. Gulbrandsen & al. (2005), in a questionnaire study over 1,967 academics in Norway, found that “*contract research introduces new and interesting research topics*” (Gulbrandsen et Smeby, 2005, p. 947). Those results match with a more recent large survey of over 18,177 UK scientists conducted by Hughes et al. (2016), which showed that gaining insights on the area of scientists’ research is considered important by 77% of the respondents and constituted the primer reason for academic engagement. In qualitative work, Ankrah et al. (2013), by conducting a case study in the context of the Faraday Partnership Initiative, showed that learning about new research areas and accessing new ideas are the main motives for collaborations with industry. Those findings match with studies on academic engagement motives that repeatedly showed (except for Iorio, Labory, & Rentocchini, 2017) that scientists mainly engaged with the industry for intellectual challenges and research purposes (Blind, Pohlisch et Zi, 2018 ; Lam, 2011).

Second, the industry may provide feedbacks to scientists or practical environments to test theories or ideas, i.e. the downstream process of research. Lee (2000), in a survey of over 422 faculties, showed that the reasons to engage with the industry are mostly driven by gaining research insights and, testing and applying theories instead of pursuing future commercial goals. Siegel & al. (2003), in a qualitative study on 98 scientists involved in collaborations with the industry, showed that 65% of them stated that it had positively influenced their scientific works. As stated by one interviewee: “*there is no doubt that working with industry scientists has made me a better researcher. They help me refine my experiments and sometimes have a different perspective on a problem that sparks my own ideas*” (Siegel, Waldman et Link, 2003b, p. 23). D’Este & Perkmann (2011), in a review of 1,528 scientists in the UK in physical and engineering science, showed that the first motivation of scientists when engaging with industry

is “*learning from industry*” —gaining new insights, receiving feedbacks on research, accessing new knowledge—while commercialization ranks as the least essential motivation. D’Este & Perkmann (2011) also acknowledged that scientists do not derive significant research-related benefits when engaging in commercialization. It also matches Callaert et al. (2015), who demonstrated that the outcome of academic engagement is mediated by the type of collaborations, initial motives, and alignment with initial research objectives.

Beyond the fact that the industry may be a direct provider of non-pecuniary resources for scientific works, the interaction itself between scientists and the industry can conduct positive synergies and spillover effects. First, scholars reported that the industry and scientists could work on projects that are sharing both applicative objectives and fundamental research questions with potential for new scientific discoveries (Stokes, 1997): basic research and applications would then be complementary (Narayanamurti et Odumosu, 2016 ; Narayanamurti, Odumosu et Vinsel, 2013). Indeed, in some documented historical cases such as the Manhattan Project (Gillier et Lenfle, 2019) or the invention of the transistor at the Bell Laboratories (Gertner, 2012), the industry has developed an invention, but there is a lack of scientific understanding of the underlying phenomenon associated to the new invention. Hence, resolving problems that arise from technology development can conduct further research activities and fuel the research agendas. Goldstein & Narayanamurti (2018), by reviewing the case of the Advanced Research Projects Agency – Energy of the Department of Energy (DoE) that aims at financing projects that “*bridge the gap between basic and applied research and development*” (Goldstein et Narayanamurti, 2018, p. 1506), showed that those projects conducted to both more patents and more scientific publications than the other Agencies of the DoE that are focusing either on basic science or on application & development. Second, academia and industry differ in how they approach research and use different methods and logic of reasoning, increasing the teams’ creative potential (Evans, 2010a ; Mansfield, 1995). Indeed, interacting with the industry conducts an increase in the pool of ideas accessible by academics (Rosenberg, 1998), and increases the variety of those ideas. As reported by Evans (2010), the science made by the industry and the science made by academics differ in their way of performing research activities which conduct science-based industrial firms to inject innovations into the academy: “*anomalous, unexpected, and not entirely reconcilable findings that will more likely shape the next generation of academic science*” (Evans, 2010a, p. 442). There is also an extensive literature in design theory and creativity explaining how individuals and teams can be locked-in in specific design paths and then would not be able to explore more innovative areas (Agogu e et al., 2014 ; Kaplan et Tripsas, 2008 ; Le Masson, Weil et Hatchuel,

2010b ; Thrane, Blaabjerg et Møller, 2010). Teams with mixed backgrounds are then more able to overcome those issues (Hargadon et Sutton, 1997 ; Teodoridis, 2017 ; Uzzi et Spiro, 2005). Furthermore, as reported by Bikard et al. (2019), science – industry collaborations can often foster specialization, in particular for scientific works with high commercial potential.

To summarize those different contributions regarding our research question, we consider that academic engagement may be positively related to scientific breakthroughs. We then formulated the following hypothesis regarding Nobel laureates:

Hypothesis 1: a significant share of Nobel laureates (beyond the well-known IBM and Bell Laboratories cases) benefited from their engagement with the industry for their scientific breakthrough discovery for which they were awarded the Nobel Prize.

1.2. Academic engagement and post-discovery performances:

While there are theoretical and empirical arguments that sustain the relation between academic engagement and scientific breakthroughs, this engagement's effects on the ex-post diffusion of subsequent scientific works remain unclear.

First, scholars raised concern that a more excellent orientation towards academic engagement would distort the institutional norms of research freedom and fast and wide dissemination of research results in science (Merton, 1973 ; Mowery *et al.*, 2001). In particular, scholars reported that some firms impose publication restrictions, additional delays, or may ask for secrecy on some part of the research to engaged academics. It conducts to more significant publication barriers for scientists involved in such interactions with the industry (Blumenthal *et al.*, 1996 ; Czarnitzki, Grimpe et Toole, 2015 ; David et Dasgupta, 1994 ; Lee, 2000 ; Thursby et Thursby, 2002) with adverse effects for the global innovation system. Indeed, the benefits of research work disclosure, and the associated increase of the stock of public scientific knowledge have been repeatedly demonstrated (David et Dasgupta, 1994 ; Mukherjee et Stern, 2009 ; Murray *et al.*, 2009). It has to be highlighted that the issue of the value appropriation of research by private companies is considered as increasing since the 1980s due to changes in the systems of innovation and the Bayh-Dole act (Taylor Aldridge et Audretsch, 2011 ; Tijssen, 2004). Those barriers would result in a decrease of the number of publications of engaged scholars and by then, a decrease of the diffusion rate of research towards the academia.

Second, the more excellent orientation towards research commercialization of entrepreneurial universities (Etzkowitz, 2003) may influence the research agenda itself and

activities performed by scholars. For example, Goldfarb, (2008) showed that scientists who maintained their relationships with an applied-oriented partner, in a study on 221 scientists involved in the NASA Aerospace engineering program in 1981, experienced a decrease in publications of academic papers during their careers. Indeed, academic engagement can divert academics from research activities as they might spend more time doing other activities (problem-solving, contract management, conflict management, etc.) affecting their scientific productivity (Yusuf, 2008). Toole & Czarnitzki (2010) even claimed that while “*these academic entrepreneurs devote significant time and cognitive effort to the firm, their contribution to academic knowledge accumulation is likely to be less—a potentially costly “brain drain” on the not-for-profit research sector*” (Toole et Czarnitzki, 2010, p. 1599). University–industry interactions and emphasis on commercialization can also lead to a greater orientation toward applied research (Slaughter, 1993). For example, in a study on 3,862 academic life scientists, Azoulay, Waverly, & Toby (2009) showed an increase in patenting for academic researchers conducted those inventors to shift their research focus towards questions of commercial interests, which is considered as having less potential for serendipity. Those mechanisms would support lower performances in terms of publications and their quality, as well as an increase of the research diffusion to the industry due to the adoption of a more applied oriented perspective.

Hence, we formulated the following hypotheses regarding our dataset on Nobel laureates:

Hypothesis 2.a: Nobel laureates who benefited from their engagement with the industry for their scientific breakthroughs are suffering from a negative effect on their ex-post publication performances (number and quality).

Hypothesis 3.a. Nobel laureates who benefited from their engagement with the industry for their scientific breakthroughs are shifting their research towards a more applied orientation, with then an increase of the research diffusion to industry rate.

On the other hand, other studies claimed that academic engagement is associated with higher research performances. Zucker & Darby (1996), focusing on star-scientists, showed that star bio-scientists' quality of publications was higher when collaborating with the industry. Tijssen (2018) showed that “*crossover collaborators*”, measured as those who collaborated the most with the industry, have higher publications rates than those who do not, based on a case study at KU Leuven University. Bikard et al. (2019) relied on twin discoveries to explore the effects of collaborating with the industry. For a given twin discovery (Bikard, 2020), if for one

of the articles, scientists collaborated with the industry but not the scientists in its twin paper, authors showed that engaged academics are publishing more follow-on articles on the research projects than their peers. They claimed that it is mainly due to a greater specialization between the two actors. Hottenrott & Lawson (2017), in a study based on 15 UK universities, showed that scholars that are receiving grants from the industry published more papers with higher quality on average. Banal-Estañol et al. (2015), in a study of over 3,991 academics in 40 UK universities, showed that industry funding affects research productivity but only up to a certain threshold, which also echoes the idea of an inverse-U shape relation (Lin et Bozeman, 2006). Nevertheless, it has also been shown that this positive effect on ex-post publications quality and quantity is mediated by the type of collaborations, particularly if the research project is aligned with the academic's research goals (Callaert *et al.*, 2015). Hence, those elements support mainly, as described by Perkmann et al. (2021), a positive relation between academic engagement and scientists' research productivity.

Furthermore, several studies explored the shift from basic research towards more applied research following academic engagement. Mainly, scholars relied on academics who filled patent as a proxy for applied research and showed that both activities complement (Agrawal et Henderson, 1997 ; Azoulay, Waverly et Toby, 2009 ; Breschi, Lissoni et Montobbio, 2008). Furthermore, Thursby & Thursby (2002) did not observe a change in research direction since the Bayh-Dole act despite increasing universities' efforts to commercialize research. Those elements does not sustain the view of a shift towards applied research of engaged scholarships following their breakthrough discoveries.

Our two hypotheses are then the following:

Hypothesis 2.b. Nobel laureates who benefited from their engagement with the industry for their scientific breakthroughs are suffering from a positive effect on their ex-post publication performances (number and quality).

Hypothesis 3.b. Nobel laureates who benefited from their engagement with the industry for their scientific breakthroughs are not shifting their research towards a more applied orientation, with no increase in the research diffusion to industry rate.

We then present the methodology and data to test our hypotheses.

2. Methodology & data

In this section, we review first, the methodology used to derive a proxy of engagement with the industry in relation to laureates' scientific breakthroughs, and second, the data and procedure to defined laureate's ties with industries through academic publications and patents. Third, we detailed the proxy used to measure research directions to either more basic or applied research.

2.1. Identification of Nobel laureates who benefited from their engagement with the industry for their scientific breakthroughs

In order to identify the Nobel laureates that have been engaged with the industry and benefited from those interactions for their breakthrough discoveries, we derived a methodology that relies first on the identification of the critical scientific paper that conduct a given laureate to be awarded the Nobel Prize and, second, on the analysis of laureates' ties with industry before or at the date of this critical paper (i.e. *Prize Paper*).

To do so, we used Li et al. (2019) public dataset available on *Nature data* website. They combined diverse sources of unstructured data such as Nobel laureates' university websites, CV's of laureates, laureates' Wikipedia pages, Nobel.org website, and the Microsoft Academic Graph (MAG) database to come up with an extensive list of 89,311 academic papers written by 92.4% of all the Nobel laureates in Chemistry, Medicine and Physics between 1900 and 2016. They also provided the identification of the specific scientific paper that led each laureate to be awarded the Nobel Prize based on a specific text-matching technique between laureates' scientific papers and public data regarding the reasons why the Nobel committee decided to offer them this Prize (available on Nobel.org or Wikipedia.org websites), as well as an assessment of laureates' scientific papers academic citations. We called *Period 0*, the period between the first academic paper of a given laureate and his/her Prize Paper; *Period 1*, the period between his/her Prize Paper, and the Nobel award⁸³.

Hence, following the Prize paper's identification, we consider the potential interactions with the industry that the laureate may have experienced before or at the date of the Prize Paper publication (i.e. *Period 0*). We designed a unique dataset that relied on a review of laureates' ties with the industry based (1) on a careful examination of authors' affiliations and funding organizations of all papers written by Nobel laureates as well as (2) a review of all assignee

⁸³ The period post-Prize has been excluded to avoid issues related to distortions of the results following the fact that the laureate become more famous and can received additional solicitations and can be diverted from research.

organizations of patents filed by laureates. Previous research showed that affiliations of authors of academic papers or patent's assignee organizations could be used as a proxy to measure ties with the industry and, therefore, academic engagement (eg. Abramo et al., 2009, 2010; Arora et al., 2018; Arts & Veugelers, 2020; Calvert & Patel, 2003; Tijssen, 2012).

Here, we called *industry-inspired researchers the laureates that had ties with the industry before or at the date of their breakthrough discoveries*. As described in the upper section, the literature showed that engaged scholars have access to original resources, skills, materials, ideas, different ways of thinking, feedback, fields of experiments or benefited from synergies with the industry through their engagement. Hence, we assume that those ties in *Period 0* would influence their research works. Therefore, we consider them *industry-inspired*, although we cannot measure the precise magnitude of this inspiration. Nevertheless, the ability to differentiate researchers those who were industry-inspired for their breakthrough discoveries from scientists that were not constitute a key advance in the exploration of the relation between academic engagement and scientific discoveries. Because Nobel laureates are comparable scientists between each other's as their scientific discoveries can be considered as having similar magnitude, it allows us to explore the extent of this phenomenon, its evolution as well as to assess the difference in terms of knowledge diffusion and research performances between those two populations. When there was more than one prize paper, we selected the first published one to adopt a conservative approach. The procedure is summarized in Figure 1 below

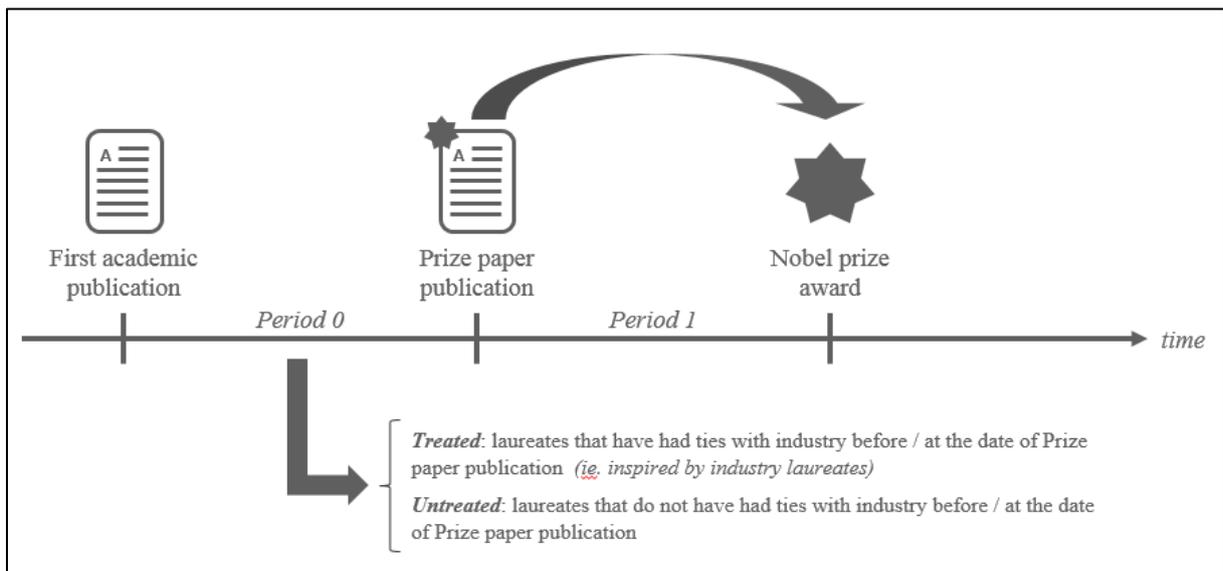


Figure 1 – Treated Nobel laureate identification process

2.2. Academic publications of Nobel laureates and industry ties

Academic publications of Nobel laureates in physics, chemistry, and medicine were gathered using Li et al. (2019) dataset who provided Microsoft Academic Graph (MAG) unique identifier for each scientific paper. Hence, based on that data key, we extracted affiliations of the laureates and all their co-authors, and the funding sources of each paper from the LENS project database – scholarly work API (Jefferson *et al.*, 2018)⁸⁴. The LENS project⁸⁵ database crossed and harmonized academic publications’ metadata, such as affiliations or funding sources from multiple databases, including MAG, Web of Science, and PubMed. It also includes, for some affiliations, a link to the Global Research Identifier Database (GRID), a publicly available dataset⁸⁶ that helps in defining and disambiguating the type of affiliations. Categories of affiliations included: Education (e.g. the University of Manchester), Government for Public Research Organizations (e.g. the Max Plank Institute), Non-Governmental Organizations (e.g. the Cancer Research UK), Healthcare (e.g. Pittsburgh Medical Center) or Company (e.g. IBM). We retrieved 99.9% of the publications and selected only those from journal articles (instead of books or conference proceedings for example) and consistent meta-data regarding the laureate careers. It represents a final set of 83,372 academic papers for 518 laureates on the 590 laureates awarded between 1901 and 2016 in the three selected disciplines. Due to the multiplicity of affiliations and co-authors, the resulting dataset is comprising of c. 2.7 million entries and 21,597 distinct affiliations or funding organizations.

Regarding affiliations, it has to be highlighted that first, while we are using one of the most accurate database, 33.3% of the academic papers are not related to any organization. Second, 83.2% of affiliations were missing from the GRID database. Hence, we developed an algorithm to classify those remaining affiliations based on text-matching techniques (~ 500 words). Based on word occurrence and, when possible, we assigned them to a specific category such as *Healthcare* or *Company*. For example, all affiliations that contained “university”, “school”, “école”, “université”, “escola”, etc. were classified as *Education*. Affiliations that contained for example “company”, “GmbH”, “corporation”, “S.A.” etc. were classified as *Company*. We were then able to allocate 15,593 affiliations to a specific type: 7,911 were allocated to

⁸⁴ We designed a R program for this particular task through a R Studio interface.

⁸⁵ <https://www.lens.org/>

⁸⁶ <https://www.grid.ac/>

Education, 5,196 to *Public Research Organizations, NGO, Private Institute and Associations*, 1,498 to *Healthcare*, and finally 988 to *Company*. Therefore, the 2,567 remaining affiliations were allocated manually based on an Internet search for the organization name. For 1,343 we did not retrieve any type due to an error in the affiliation names⁸⁷. We harmonized name retrieved from GRID database for affiliations to the companies, those retrieved through the algorithm, and manually allocated. Finally, we were able to classify 18,924 unique affiliations (93.3% accuracy on available data). We were then able to define whether each publication in our final dataset involved at least one author affiliated to a company representing 3,422 unique publications (4.10% of all publications). Our data are consistent with Tijssen (2012) analysis that showed that 4.2% of Thomson Reuters' Web of Science database included at least one author from the industry. After name harmonization, 661 different industrial companies interacted with our sample of Nobel laureates, including, of course, IBM and the Bell Laboratories, but also Dutch State Mines (DSM), Alcatel-Lucent, Nichia Chemical or Hoffman-LaRoche.

Finally, we performed an analysis to identify in each publication with the industry, if (1) the laureate was directly considered as affiliated or co-affiliated to the company or (2) if the paper was the result of a co-publication with industry co-author(s) while the laureate was affiliated another type of organizations (Education, PRO, NGO, research associations or healthcare). In 1,248 cases, the laureate wrote its academic publication as directly affiliated to one company. We also checked for funding data in publications, but the information was scarce. We retrieved data for 11,502 academic publications only. We, therefore, performed a similar analysis than the one that we undertook on affiliations. Only 79 academic publications appeared to be funded by a company. All publication's data are finally gathered at the laureate level for each period (panel structure) and normalized.

2.3. Patent of Nobel laureates and ties with the industry analysis

Previous literature showed that patents filed by academics could help to define ties with the industry, in particular by analyzing the applicant of the patent (e.g. Balconi, Breschi, & Lissoni, 2004; Balconi & Laboranti, 2006; Crescenzi, Filippetti, & Iammarino, 2017). It has to be highlighted that crossing scientists and patents is a complex task due to issues such as: how the name of the inventor is written in the patent or how would we be able to cross-validated that

⁸⁷ For example, affiliations recorded as "Geneva Switzerland", "New York city department"

the academic author does not have a reduplicated names that would distort the data set. Scholars used ex-post mailing and phone calls with inventors to check the data (Balconi, Breschi et Lissoni, 2004) or geocoding strategies (Crescenzi, Filippetti et Iammarino, 2017).

Here, we collected data from the PATSTAT database⁸⁸, and we looked for patents filed by inventors with exact similar names and surnames (including a check for second and third first names whenever needed) than those from the list of Nobel laureates' academic publications. We restricted the sample to only the patents that have been filled after the first academic publication of the laureate and before their last known one in our dataset. We then collected data on application number, DOCDB family number, DOCDB applicant harmonized name, and applicant category (e.g. Company, University, Government, etc.) by relying on the PSN classification from PATSTAT (OEB, 2019). We adopted an approach through patent families (DOCDB). It constitutes a better approach to inventors' creative activities by disentangling the different applications that might be filled in different countries or geographic areas (Martinez, 2010 ; Martínez, 2011). We did not control whether or not the patent has been granted as we focus on the ties with industry only. We then retrieved 38,655 patent applications that involved 308 Nobel Prize laureates.

To control for the issue of reduplicated names, we adopted a conservative approach. First, for all potential companies cited as an applicant for a given Nobel laureate identifier, we checked if the company name has been cited either in the Nobel.org webpage of the Nobel laureate (included extensive bibliographical data and Nobel laureate's lecture, for example) or in the English Wikipedia page of the Nobel laureate. Second, we checked if the company name appeared in its academic publications' affiliations of the laureate or its co-authors. Finally, all affiliations were manually checked to ensure the data's consistency, and company names were harmonized with the list gathered from the publication dataset. It then comprises of 4,658 patent applications with 2,321 cross-validated with Nobel.org or Wikipedia websites and 2,478 cross-validated with affiliations data of laureates or co-authors. The final dataset comprises 5,219 patent families, including 3,001 filled for company applicants and 2,394 filled for the university-like applicants. In total, 185 distinct laureates from our sample have filled at least one patent family. We adopted a similar approach for patents filed by Nobel laureates for universities, public laboratories, and research associations as applicants by controlling for the

⁸⁸ Spring 2019 version

PSN sector (OEB, 2019). All patent data are finally gathered at the laureate level for each period (panel structure) and normalized.

2.4. Nobel laureates' research orientation

To proxy research orientation towards basic or applied research, we explored how the industry relies on laureate's academic papers when filing patents. Hence, scholars have extensively used this proxy of Scientific Non-Patent Literature (SNPL): academic papers that are cited by the inventor or the examiner of a given patent application in order to demonstrate the newness of the invention, since the seminal work of Narin, Hamilton, & Olivastro (1997). Hence, Roach & Cohen (2012) demonstrated that SNPL count is an adequate indicator of company closeness to academic science by comparing a qualitative study on R&D managers' views on their engagement with academic research and qualitative analysis of patent applications of those companies. It has been shown that there is a positive relationship between inventiveness and patent citations to science (e.g. Branstetter & Ogura, 2005; Poegel, Harhoff, Gaessler, & Baruffaldi, 2019). Indeed, those patents are receiving more forward citations in general (e.g. Arts & Fleming, 2018; Gruber, Harhoff, & Hoisl, 2013), and it reduces the negative effect of value decrease when an inventor is exploring new fields (Arts et Fleming, 2018). Finally, SNPL constitutes an adequate proxy of the orientation of research towards applied research. Hence, the more an academic paper is cited by the industry, the more the research work is oriented towards application.

Here, we relied on the Marx & Fuegi (2020) dataset, who conducted an in-depth analysis to disentangle citations to academic papers in patents filled in the USPTO, OEB, and through the PCT procedure. They showed that c. 3.4 million patents are cited 4.5 million distinct academic papers. They also provided a confidence index: we rely here on the highest level of confidence conducting 2.8 million patents and 3.9 million distinct academic papers. Marx & Fuegi (2019) relied on the Microsoft Academic Graph (MAG) dataset and then provided each academic paper cited in a patent that they retrieve its unique MAG identifier. Then, after crossing the database on Nobel laureates' publications and SSNPL, we showed that 13,935 academic papers wrote by Nobel Prize laureates in our sample are cited in 68,361 specific patent applications. All SNPL data are finally gathered at the laureate level for each period (panel structure) and normalized.

3. Exploring the cohorts of Nobel laureates that were inspired by industry

In this section, in relation to *Hypothesis 1*, we first explored the extent to which some Nobel laureates were inspired by the industry for their fundamental discovery (3.1). We then analyzed industrial partners of those laureates (3.2) and the temporal dynamics of industry-inspired laureates (3.3).

3.1. Industry-inspired laureates characteristics

We computed in **Table 1** the number of Nobel Prize's laureates with ties with the industry before the publication of their prize paper, split by channel and discipline. First, we showed that a significant part of the cohort of Nobel laureates had ties with the industry before the publication of their prize paper: 108 Nobel laureates experiences such ties, which represents 21% of the whole cohort in our sample. Second, we demonstrated that this result is divergent from one discipline to another. Indeed, while the number of laureates that had ties with industry before their prize paper is similar between Physics and Chemistry (i.e. 26%), only 13% of the laureates in Medicine was considered industry-inspired. Third, we also reviewed in what extent the laureates used a particular channel of interaction with the industry. The main channel is academic publications in collaboration with an industrial company: the (future) Nobel laureate is affiliated to a university-like organization for a given publication while at least one co-author is affiliated to an industrial company. Half of the industry-inspired laureates used this channel (i.e. CI Pub.), but a closer number of laureates also wrote academic papers when being directly affiliated to an industry organization (i.e. IA Pub.). Finally, a lower number of laureates filed patents for industry applicants as only a third of the treated laureates were involved in that channel (i.e. CI Pat.).

	Nbr. Nobel Prize's laureates (share of the cohort)	Nbr. Nobel Prize's laureates (share of the cohort by discipline)		
		Physics	Chemistry	Medicine
Nbr. laureates affiliated to a University-type organization who published academic papers with industry affiliated co-authors before publishing its Nobel paper (CI Pub.)	55 11%	16 9%	24 15%	15 8%
Nbr. laureates directly affiliated to an Industry-type organization and who published academic papers before publishing its Nobel paper (IA Pub.)	52 10%	29 16%	14 9%	9 5%
Nbr. laureates registered as inventor for an Industry-type organization who filled patents before publishing their Nobel papers (IA pat.)	38 7%	19 11%	14 9%	5 3%
Nbr. laureates inspired by industry before publishing their Nobel papers	108 21%	47 26%	40 26%	21 11%

Note: for example, 16 Nobel laureates in Physics published at least one academic paper before (or at the date) of their Prize Paper publication by being affiliated to a University-type organization while at least one co-author was affiliated to the industry in this paper. It represents 9% of the whole cohort of Nobel laureates in Physics. A given Nobel laureate can be involved in more than one channel.

Table 1 – Treated Nobel laureates split by ties with industry types and disciplines

Then we attempted to characterize the specificities of the population of those industry-inspired laureates. In **Table 2**, we computed the different channels' details by specifying if each Nobel laureate used a particular channel or used a mix of channels for their industry interactions before their prize paper.

	Nbr. laureates	Nbr. academic publications	Nbr. patent families	Nbr. industry partners	Period duration
Treated	108	1.06	1.05	2.03	16.73
Untreated	410	0.36	0.04	0.00	9.84
CI pub.	38	1.30	0.12	1.71	19.68
AI pub.	26	0.83	0.05	1.36	13.85
AI pat.	14	0.51	1.27	1.14	11.43
AI pub. + AI pat.	13	0.55	3.33	2.28	14.31
AI pub. + CI pub.	6	1.82	0.37	3.81	19.00
CI pub. + AI pat.	4	0.89	3.38	3.14	24.00
AI pub. + CI pub. + AI pat.	7	2.07	4.45	5.38	20.43
Total	518	0.51	0.25	0.42	11.28

Note: CI pub.: laureates affiliated to a University-type organization that published academic papers with industry affiliated co-authors before publishing its Nobel paper. IA pub.: laureates directly affiliated to an Industry-type organization and who published academic papers before publishing its Nobel paper. IA pat.: laureates registered as an inventor for an Industry-type organization who filled patents before publishing their Nobel papers. The number of academic publications includes academic papers that were non-affiliated or for which the affiliation type is unknown. All data are normalized except for period duration.

Table 2 - Details characteristics of the treated cohort of Nobel laureates

First, we showed that three-quarters of the laureates inspired by industry only used one unique channel of interaction with industry instead of a combination of channels (e.g. academic publication as affiliated to industry and patents for an industry applicant). Second, we demonstrated that the laureates' type of channel influences academic publication and patenting behavior. For example, laureates that were solely publishing academic papers as affiliated to the industry published fewer papers (c. 44 papers vs. c.68 papers), have fewer industrial partners (c. 1.2 vs. 1.5), than their peers solely collaborating with industry co-authors while being affiliated to a university-like organization. Third, the number of publications with industry (by being affiliated, funded, or with co-authors from industry) remains relatively low with 4.5 papers on average, representing only 16% on average of the academic papers published in Period 0 by industry-inspired laureates. Four, regarding patenting behavior, we also noticed that laureates filing patents for industry applicants and publishing academic papers as affiliated to the industry are filling around two more times patents than their peers. Finally, we can also observe the difference between the laureate that were industry-inspired and the rest of the cohort in their pre-Nobel prize paper period. Indeed, the number of academic papers published in this period by inspired-by-industry laureates is three times higher than those who were not. They also filled more patents for the university-like applicants in period 0.

3.2. Industry-inspired laureates company partners characteristics

Hence, we explored some industrial companies' characteristics that interacted with Nobel laureates before the publication of their Prize Paper. The 108 industry-inspired laureates had ties with 119 distinct industrial companies. In **Table 3**, we detailed the average number of Nobel laureates interacting with a given company and the number of patent families or academic papers written in total by laureates in period 0 with a given company. It appears that the companies in our sample collaborate one average with only 1.63 laureates. We also detailed in **Appendix A-1** the top-20 list of companies collaborating with Nobel laureates before the publication of their Prize paper. We observed that the Bell Laboratories or IBM are the tip of the iceberg. Indeed, they record an enormous amount of papers and patents filled by future Nobel laureates comparatively to the other companies, but a wider breadth of industrial companies inspired Nobel laureates. We also noticed that companies that had ties with Nobel laureates filled on average 3.84 patent families and participated in 4.35 academic papers writing.

<i>Period before Nobel paper (i.e. period 0)</i>	Obs.	Mean	Std. Dev.	Min	Max
Nbr. Nobel laureates per industrial company interaction before their Prize paper	119.00	1.63	2.32	1	23
Nbr. academic paper wrote by Nobel laureates per industrial company interaction before their Prize paper	94.00	4.25	15.36	0	120
Nbr. patent family filled by Nobel laureates per industrial company interaction before their Prize paper	49.00	3.84	10.55	0	87
Nbr. output (patent family and/or paper) by Nobel laureates per industrial company interaction before their Prize paper	119.00	8.09	20.32	1	153

Note: The number of academic papers represents the total number of academic papers written by a given laureate as affiliated to the company, or with co-authors affiliated to the company, or with the company as a funding organization. The number of patent families represents the total number of patent families filled by Nobel laureates with the company as an applicant. The number of interacting laureates represents the number of distinct laureates that have published the latter academic papers or filled the latter patents. Those numbers are non-normalized due to company-level analysis.

Table 3 – Ties of laureates with industrial company

3.3. Temporal dynamic of industry-inspired Nobel laureates

In this sub-section, we analyzed the evolution through time of the share and number of industry-inspired Nobel laureates across the sample's whole cohort of laureates. One particularity of our dataset is that we explored a very long period (from 1905 to 2016 by date of award). The science system was profoundly modified through the last century with, for example, a significant increase in the number of published academic papers and co-authors network (e.g. Arora et al., 2018; Pisano, 2010). Even the number of laureates per decades has increased during the last century as the Nobel can be attributed to multiples laureates (see. Appendix A-2). Therefore, we reviewed the share of Nobel laureates that had ties with industry before their prize paper based on the date of award per decade basis (Figure 2) and by analyzing the split per discipline (Figure 3). We also computed results by date of Prize Paper per decade (Appendix A-3 and Appendix A-4).

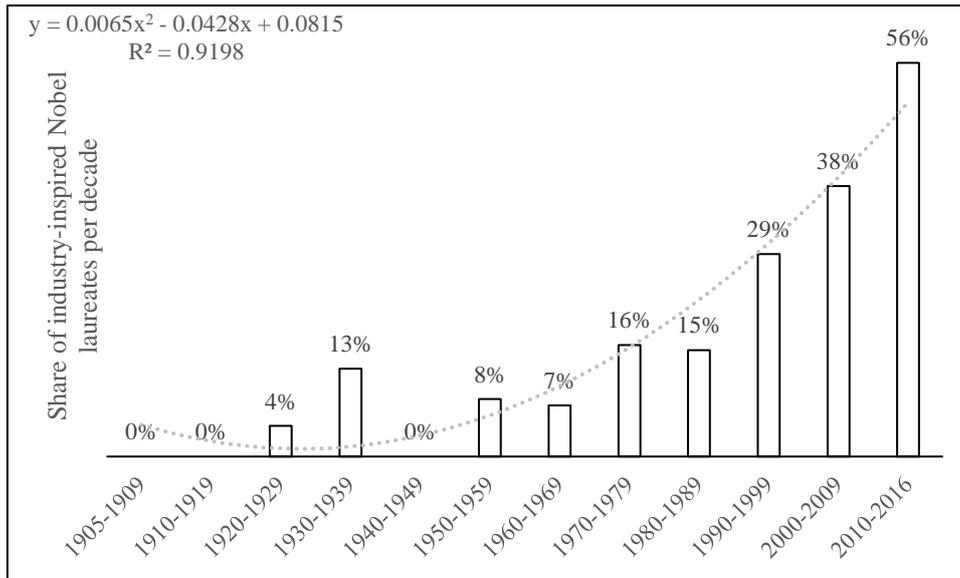


Figure 2 – Evolution of share of industry-inspired Nobel laureates per decade by date of award

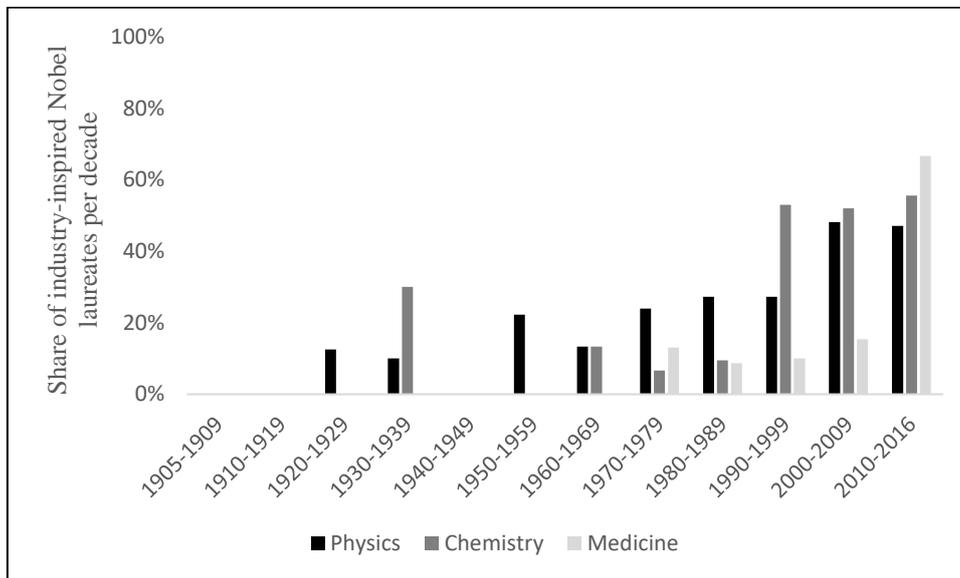


Figure 3 – Evolution of share of industry-inspired Nobel laureates per decade and date of award and split by discipline

We observed an increase of industry-inspired Nobel laureates since the 1960s and up to the last decade. Indeed, the share of industry-inspired laureates was only 7% in 1960 – 1969 and rose to 56% during the last period (2010 – 2016). In particular, we noticed a significant increase in both the number and share of industry-inspired laureates awarded in the 1990s and the 2000s while the industry cut investment in fundamental research. Even by considering the lag between the prize paper and the Nobel award, the magnitude of the effect continues after the start of the significant cuts in fundamental research by the industry that have started in the 1980s. Regarding disciplinary contribution, the increase was mainly driven by Physics and then Chemistry for a relatively similar share, but surprisingly, Medicine contributed mostly to the last period (2010 – 2016).

In Figure 4, we observed the cumulative evolution of laureates involved in each channel of interaction with the industry before Prize Paper and by Prize year. Direct affiliation to the industry (with patent or publications) was almost the only channel of interactions until the 1990s. Industry-inspired laureates affiliated with university-like organization mainly increase since the 1990s to become hegemonic during the last period.

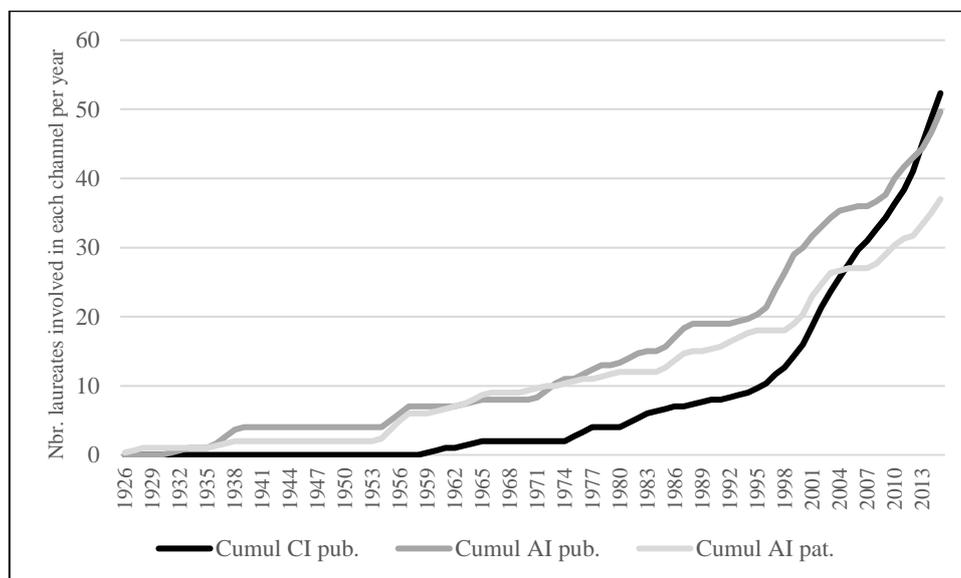


Figure 4 – Cumulative evolution of laureates involved in each channel of interaction with industry before Prize Paper by Prize year (3-year moving average)

Hence, our results confirmed *Hypothesis 1*, as we demonstrated that **one-fifth** of Nobel Prize laureates in the sample were industry-inspired. Our results are robust in particular for the last decades as more than 50% of laureates awarded in the 2010 – 2016 period were inspired by the industry for their breakthrough discoveries. In the next section, we reviewed the effects of academic engagement in relation to the scientific breakthroughs on the diffusion of laureates' follow-on research.

4. Industry inspiration effects on Nobel laureates' academic follow-on research

In this section, we compared industry-inspired Nobel laureates' follow-on research performances with non-industry-inspired Nobel by using a difference-in-difference model (D-i-D), in relation to hypotheses 2 and 3.

4.1. Variables and descriptive statistics

To test *Hypothesis 2* and *Hypothesis 3*, our objective is to define if during the period following the publication of the Prize paper by a given laureate, being inspired by the industry during period 0 conduct to significant differences in terms of follow-on academic performances and orientations of research with those that were non-engaged. Our data set is a panel with two periods: period 0 and period 1 (Figure 1). When measuring academic performances and research orientations towards applied research while isolating the effect of being inspired by industry in Period 0, we need to hold for pre-existing differences between laureates in Period 0 (see Appendix A.5 for descriptive statistics). It is consistent with previous findings on academic engagements that showed that engaged scientists have different individual characteristics (see Perkmann et al., 2013 for a review). Therefore, we used a Difference-in-Difference (D-i-D) model which is widely used in management science (e.g. Jung & Lee, 2014). The D-i-D variable is a dummy equal to 1 during the tested period, here the period 1 and for treated laureate only, and 0 otherwise.

The variables definitions are reported in Table 4. Dependent Variables (DV) are the following: the *number of papers published by laureates*; the *number of papers published by laureates weighted by scholarly citations* to account for laureate work diffusion to industry; the *number of papers published by laureates weighted by SNPL citations* to account for laureate's research results diffusion to industry. We also explored the *number of patent families* published by laureates and the *number of patent families weighted by patent citations* to account for their performances of subsequent direct inventions. Finally, we also look at the *number of industry partners* to account for the laureate's effort to diffuse its research results with industry directly. Independent Variables (IV) are the following: *treated*, a dummy variable to account for the performances of the industry-inspired laureates; *period* a dummy variable to account for the difference between period 0 and period 1; *Difference-in-difference*, a dummy variable to account for the effect of having been inspired by industry in period 0 on tested DV in period 1. The *period duration* is used as an exposure variable to control differences between the available time to produce new academic papers and diffuse knowledge at each period. We also defined a set of control variables aligned with usual practices in the exploration of academic performances including *born year* to control for changes in academic practices, *US-born laureates* to control if the laureate was born in the US, disciplinary characteristics (Chemistry, Physics, and Medicine), the age of the laureates at both its Prize paper and its Nobel award. We reported in **Table 5**, descriptive statistics for all our variables.

Variable	Definition
Nbr. academic publications	Total number of academic papers published by the laureate in a given period.
Nbr. academic publications - Scholarly citations weighted	Total number of academic papers published by the laureate in a given period, weighted by the number of follow-on received academic citations.
Nbr. academic publications - SNPL citations weighted	Total number of academic papers published by the laureate in a given period, weighted by the number of follow-on citations of those papers in patents.
Nbr. patent families	Total number of patent families filled by the laureate in a given period.
Nbr. patent families - Patent citations weighted	Total number of patent families filled by the laureate in a given period weighted by the number of follow-on citations by other patents.
Nbr. industry partners	Total number of distinct industrial company that interacted with the laureate in a given period.
Period	A dummy variable equal to 0 the period before the publication of the Nobel's paper of the laureate and 1 the period
Period duration	Count of the number of distinct years for a given period of the laureate.
Born year	Date of birth of the laureate.
US-born laureates	A dummy variable equal to 1 if the laureate is born in the US, 0 otherwise.
Female laureate	A dummy variable equal to 1 if the laureate is a female, 0 otherwise.
Chemistry Nobel	A dummy variable equal to 1 if the laureate was awarded with the Chemistry Nobel prize, 0 otherwise.
Medicine Nobel	A dummy variable equal to 1 if the laureate was awarded with the Medicine Nobel prize, 0 otherwise.
Physics Nobel	A dummy variable equal to 1 if the laureate was awarded with the Physics Nobel prize, 0 otherwise.
Age at Nobel's paper publication	The age of the Nobel laureate when he or she published the Nobel's paper.
Age at Nobel Prize winning	The age of the Nobel laureate when he or she was awarded with the Nobel prize.
Treated	A dummy variable equal to 1 if the laureate was industry-inspired before the publication of its Nobel's paper, 0 otherwise
Difference-in-difference	A dummy variable equal to 1 if the laureate was industry-inspired before the publication of its Nobel's paper and during the period after the publication of the Nobel's paper of the laureate and before being awarded with the Nobel prize (i.e. period 0).

Table 4 – Variable definition

Variable	N	Mean	Std. Dev.	Min	Max
Nbr. academic publications	1004	1.005	1.691	0	16.27
Nbr. academic publications - Scholarly citations weighted	1004	1.005	1.693	0	18.05
Nbr. academic publications - SNPL citations weighted	1004	1.005	3.240	0	34.16
Nbr. patent families	1004	1.003	7.660	0	146.65
Nbr. patent families - Patent citations weighted	1004	1.005	9.452	0	243.96
Nbr. industry partners	1004	1.002	2.992	0	42.94
Period	1004	0.484	0.500	0	1
Period duration	1004	15.113	10.823	1	57
Born year	1004	1919.169	23.121	1852	1974
US-born laureates	1004	0.375	0.484	0	1
Female laureate	1004	0.030	0.170	0	1
Chemistry Nobel	1004	0.300	0.458	0	1
Medicine Nobel	1004	0.357	0.479	0	1
Physics Nobel	1004	0.344	0.475	0	1
Age at Nobel's paper publication	1004	39.669	8.443	21	72
Age at Nobel Prize winning	1004	57.602	12.402	25	88
Treated	1004	0.214	0.410	0	1
Difference-in-difference (DiD)	1004	0.107	0.309	0	1

Table 5 – Descriptive statistics

4.2. Estimation

Formally, we used the following regression equation to estimate the effect of inspiration by the industry on the cohort of laureates, with Y_i a given Dependent Variable for laureate I and X_i a vector of controls variables:

$$Y_i = f(\beta_1 DiD_i + \beta_2 treated_i + \beta_3 period_i + \alpha X_i + \varepsilon_i)$$

Since the Dependence Variables of our models are a count of scores (non-negative integers), ranging from 0 to many, we used a Negative Binomial Regression (NBR) as a means of estimation and by controlling for period exposure (e.g. Baba, Shichijo, & Sedita, 2009; Zucker & Darby, 1996). NBR is an extension of the standard Poisson model that succeeds in accommodating the overdispersion issue, then it is preferred to a standard Poisson Model that would assume that the variance of the counts is equal to the mean (see **Appendix A.6**). As a standard requirement in panel data models, we used robust standard errors clustered by laureates. Then, the results of the estimation are reported in **Table 6**.

	DV = Nbr. academic publications	DV = Nbr. academic publication - Scholarly citations weighted	DV = Nbr. academic publications - SNPL citations weighted	DV = Nbr. patent families	DV = Nbr. patent families - Patent citations weighted	DV = Nbr. industry partners
	(1-1)	(1-2)	(1-3)	(1-4)	(1-5)	(1-6)
Difference-in-difference treated vs. untreated (0/1)	0.312*** (0.109)	0.660*** (0.133)	1.021*** (0.386)	-0.507 (0.438)	-1.765*** (0.546)	-16.26*** (0.205)
Treatment	0.281*** (0.0966)	-0.211 (0.144)	-0.542* (0.309)	2.421*** (0.433)	3.634*** (0.711)	17.61*** (0.161)
Period	0.557*** (0.0576)	0.0833 (0.0801)	0.105 (0.352)	1.643*** (0.353)	3.084*** (0.369)	16.77*** (0.161)
Born year	0.0154*** (0.00173)	0.0331*** (0.00342)	0.0824*** (0.00530)	0.0509*** (0.00966)	0.0998*** (0.0156)	0.0350*** (0.00375)
US-born laureate	-0.210*** (0.0802)	-0.168* (0.0966)	-0.284 (0.264)	-0.192 (0.345)	-0.217 (0.359)	-0.318** (0.124)
Female laureate	-0.563*** (0.165)	-0.600*** (0.155)	-1.284*** (0.367)	-0.101 (0.942)	-1.316 (0.862)	-0.913** (0.377)
Chemistry Nobel	0.692*** (0.101)	0.290** (0.134)	1.564*** (0.272)	0.661* (0.362)	0.774 (0.490)	0.0534 (0.150)
Medicine Nobel	0.397*** (0.0994)	0.410*** (0.123)	1.955*** (0.342)	0.427 (0.382)	1.099* (0.563)	-0.129 (0.175)
Age at Nobel's paper pub.	0.00478 (0.00597)	0.00931 (0.00750)	0.0550*** (0.0145)	-0.00401 (0.0210)	0.0826*** (0.0239)	0.00369 (0.01000)
Age at Nobel Prize winning	-0.00154 (0.00373)	-0.0171*** (0.00496)	-0.0227* (0.0123)	0.0591*** (0.0165)	0.00768 (0.0206)	0.0102 (0.00695)
Constant	-33.23*** (3.371)	-66.15*** (6.573)	-164.3*** (9.813)	-107.3*** (18.94)	-204.1*** (30.87)	-87.89*** (7.382)
Exposure – time period	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Log-pseudolikelihood	-1021.9801	-1121.1657	-913.46381	-623.8026	-480.60184	-845.77287
Wald chi-squared	468.46***	281.93***	482.11***	220.98***	211.84***	575.87***
Nbr. treated	108	108	108	108	108	108
Nbr. laureates	518	518	518	518	518	518
Observations	1,004	1,004	1,004	1,004	1,004	1,004

Robust errors clustered to laureate id in parentheses, * p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01

Table 6 – Negative Binomial Regression

Based on our regression, our D-i-D model showed that the effect of being inspired by the industry has a significant impact on the career trajectory of those Nobel Prize laureates. Indeed, the difference-in-difference estimator in each model indicates the magnitude of this effect on DV by taking into account ex-ante Nobel laureate career trends and the set of controls.

Hence, we showed that the direct effect of having been inspired by industry in period 0 conducted laureates to publish more academic papers, with more academic impact and an increased level of diffusion to the industry than what they would do without this industry inspiration. Furthermore, they also filled less impactful patents and had less industrial partners in period 1, than they would have had without being inspired by industry.

Nevertheless, our key objective to answer *Hypothesis 2* and *Hypothesis 3* is to compare industry-inspired laureates vs. other laureates in period 1. Then, we need to test if $\beta_1 + \beta_2 \neq 0$ which would mean that industry's inspiration for Paper Prize conduct laureates to come up with different estimated mean for a given dependent variable. The results are presented in **Table 7**.

<i>Chi-squared test:</i> $\beta_1 + \beta_2 = 0$	DV = Nbr. Academic publications	DV = Nbr. academic publication - Scholarly citations weighted	DV = Nbr. academic publications - SNPL citations weighted	DV = Nbr. patent families	DV = Nbr. patent families - Patent citations weighted	DV = Nbr. industry partners
	(1-1)	(1-2)	(1-3)	(1-4)	(1-5)	(1-6)
$\beta_1 + \beta_2$	0.593	0.449	0.480	1.914	1.869	1.346
Chi-squared	22.87	8.99	3.49	26.14	17.11	51.94
Prob > chi-squared	0.0000	0.0027	0.0618	0.0000	0.0000	0.0000
Status	Reject	Reject	Accept	Reject	Reject	Reject

Acceptance or rejection decision is based on a 5% confidence intervals ratio.

Table 7 – Mean difference test estimation of DV in period 1

First, we showed that regarding *Hypothesis 2*, industry-inspired laureates for their Prize paper have a premium in terms of follow-on academic papers. On the one hand, they publish more papers in period 1 that they would have done without industry inspiration and more papers than their peers. On the other hand, those results stand by taking into account the quality of the publications. Hence, we accept *Hypothesis 2.b* and reject *Hypothesis 2.a*. Second, we showed that regarding *Hypothesis 3*, industry-inspired laureates have been prone to a greater orientation towards applied research than they would have done without being engaged with the industry in Period 0. Nevertheless, there are no significant differences between the orientations towards applications than their peers who were not engaged in period 0. Then we reject *Hypothesis 3.a* and accept *Hypothesis 3.b*.

Finally, models 1-4, 1-5 and 1-6 showed that the non-industry-inspired laureates in period 1 are catching up with the industry-inspired laureates in terms of the number of patent families filled in period 2, associated impacts measured by patent citations, and number of distinct industrial partners. Nevertheless, industry-inspired laureates still get a premium regarding the rest of the cohorts in terms of direct industrial impact through patent filling and the number of their industry partners.

5. Discussion

This research's primary motivations were to explore the relation between academic engagement and scientific breakthroughs, which ultimately shed light on the industry's role in the early emergence of new radical scientific knowledge.

To do so, we relied on the quasi-complete cohort of the Nobel Prize laureates in Physics, Chemistry, and Medicine, which conducted us to control for scientific breakthroughs that “*have conferred the greatest benefit to humankind*” (Alfred Nobel's will, 1895). By (1) identifying the exact scientific paper that led them to be awarded the Nobel Prize and (2) by retrieving their ties with industrial companies based on their scientific papers and filed patents, we were able to specify those who were industry-inspired. Those laureates had been engaged with the industry before or at the date of their Prize Paper, and we assumed, based on the literature, that it favors access to original new knowledge and synergies with activities from industrial companies that would have ultimately influenced their capabilities to make their breakthrough discoveries. Then, we were able to monitor both the magnitude and evolution of this phenomenon and compare the ex-post behavior of industry-inspired laureates with those who were not.

First, our essential contribution is to establish that despite the significant cut-off of corporate laboratories on fundamental research from the 1980s, the share of industry-inspired laureates to be awarded is mainly increasing. The industry has inspired more than one of two laureates for their breakthrough discoveries in the last observation period. We demonstrated that this phenomenon is discipline-dependent: more laureates are industry-inspired in Physics and Chemistry than in Medicine, even if we recently observed a catch-up phase. The channels of interactions are also evolving: while direct affiliation to industrial companies was the most classic form of engagement before the 1990s awardees, collaboration with the industry, including a laureate affiliated to a university-like organization, became the first channel of interaction during the last period of observations. Finally, while The Bell Laboratories or IBM

are well known for concentrating many Nobel laureates, many other industrial companies had influenced Nobel laureates. Second, we showed that despite that industry-inspired Nobel laureates' scientific breakthroughs were partly made possible thanks to their industrial partners, their subsequent knowledge was not bound to these initial sets of partners. Those laureates experienced similar knowledge diffusion-to-industry rates than other laureates but higher academic production rates and diffusion-to-academia rates. It also means this industry-inspiration do not lead to a more remarkable shift towards applied research than their Nobel laureates' peers.

Our study is subjected to several limitations. First, as highlighted in the methodological section, we explore the cohort of industry-inspired Nobel laureates for their breakthrough discoveries rather than testing the causal effect of academic engagement on the probability of making breakthrough discoveries. Testing this causal effect would require a counterfactual set of successful and unsuccessful scientific explorations conducted by both engaged and not engaged scientists. Nevertheless, we were able to provide a first examination of the extent to which scientists that made incredible breakthroughs were engaged with the industry and the evolution of this phenomenon through time. We hope that it encourages scholars to access more detailed and granular data to refine our findings and methods. Second, we assume that academic engagement with the industry prior (or at the date) to the Prize paper can be conceptualized as industry inspiration. Nevertheless, one limitation is that we could not measure the magnitude of this inspiration as we used a binary logic. The literature on academic engagement —mainly when using qualitative studies or survey methods —repeatedly showed that engaged scientists benefit from backward effects on their research quality by accessing diverse original knowledge building blocks, different ways of thinking, fruitful synergies with industrial companies' activities, etc. Based on that observation, their ties with the industry through patents and publications before the breakthroughs, and the magnitude of the breakthrough to be awarded the Nobel Prize, we considered our approach constituted a robust proxy of the industry inspiration. In-depth qualitative studies based on more detailed data could provide a greater understanding of industry mechanisms and the magnitude of inspiration. Third, ties with the industry could have been underestimated. One reason is that it is possible that for competitive reasons, a given industrial company refuses to appear in the authors' affiliation organizations of scientific papers. Another reason is that other types of ties may be included. Further studies could explore additional ties by reviewing companies established by Nobel laureates, Nobel laureates participating in Board of Directors or as advisors for industrial companies as well as more informal relations with the industry (former Ph.D. students that went to the industry,

invitations to companies' events, involvement in contract research that did not end up with either patents or publications, etc.). Four, we created an original database by using very conservative assumptions that limit type-2 errors. The exception concerns patent assignment to Nobel laureates—one of the most challenging tasks in our study—as we may have included in the dataset patents that were filled by someone who would have similar first name and surname, who worked with the same company, or institution than the laureate, in a similar period of activity than Nobel laureates. We consider here this risk as limited for our study purposes. Our conservative approach may also be subjected to type-1 errors as we may have rejected proper industrial ties that were not consistent (misspelling issues, for example). Five, a bias in the sample could be that the Nobel committee would give the award to scientists more oriented towards basic science than applied sciences. Nevertheless, this bias seems limited as Alfred Nobel's will specify that the award can be granted to both scientists and inventors, which can be viewed as an orientation towards basic and applied research⁸⁹. Furthermore, the Nobel committee has robust procedures that should prevent this issue (see **Appendix A.7**).

Our findings contribute to the literature on academic engagement. We acknowledge that the need to explore the relation between academic engagement and scientific breakthroughs was clearly defined in the research agenda designed by Perkmann et al. (2021). While it was previously showed that academic engagement is widely practiced across all disciplines (Cohen, Nelson et Walsh, 2002 ; Hughes *et al.*, 2016), we bring evidence that (1) it constitutes a reality also for the most incredible scientific advances in modern science and (2) academic engagement is becoming more and more practiced by scientists who made major scientific breakthroughs. Our results regarding the comparison of academic performances and post-Prize Paper behaviors between industry-inspired laureates and non-industry inspired ones also complement previous literature findings. Hence, first, we noticed that industry-inspired laureates published a higher number of articles in period 0 than their peers, which echoes the finding that academics with more publications are more prone to be engaged with industry (e.g. Gulbrandsen & Smeby, 2005; Tartari, Perkmann, & Salter, 2014). We also found that industry-inspired laureates published more follow-on papers than their peers, even when considering the quality of those publications. It matches with a robust line of works claiming that one consequence of academic engagement is an increase in the number of publications (e.g. Blumenthal et al., 1996; Gulbrandsen & Smeby, 2005; Hottenrott & Lawson, 2017). The quality of those publications

⁸⁹ “one part to the person who made the most important discovery or invention in the field of physics; one part to the person who made the most important chemical discovery or improvement; one part to the person who made the most important discovery within the domain of physiology or medicine” (Alfred Nobel's Will, 1895).

remained unclear, but our finding showed that for star scientists it has a positive effect, which is aligned with Bikard et al. (2019) and Hottenrott & Lawson's (2017) findings on non-star scientists. Finally, we also contributed to the literature by demonstrating that industry-inspired laureates did not have a more excellent orientation towards applied research than their non-industry-inspired peers. In contrast, it has been highlighted as a common drawback of academic engagements (e.g. Blumenthal et al., 1996). It seems that those Nobel laureates were able to maintain their orientation towards basic research by continuously be engaged with their industrial partners, including for commercialization activities measured through filled patents or for collaborative research projects (co-publications).

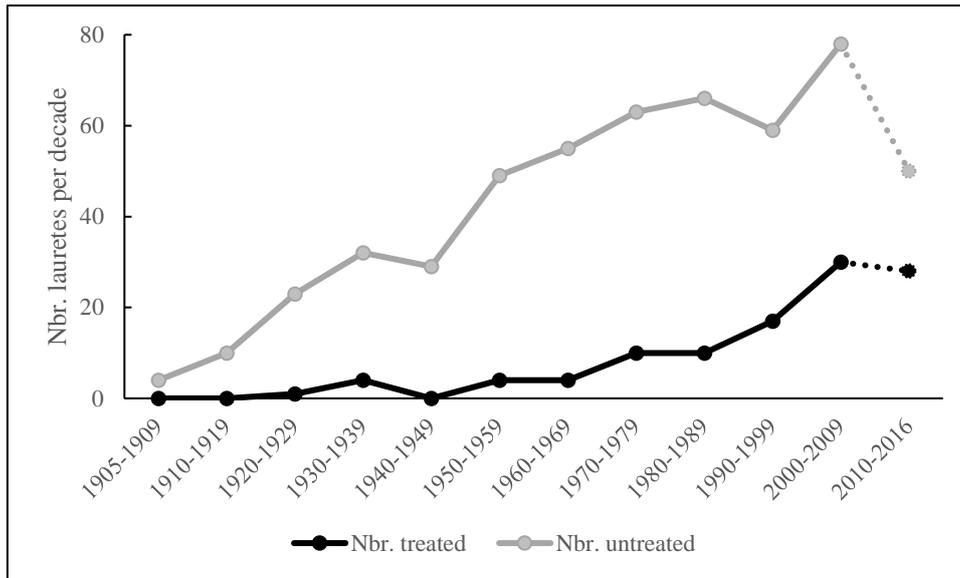
Our findings also contributed to a broader literature on the role of the industry in science. It has been repeatedly shown that the industry focused more, at least since the 1980s', on knowledge absorption than knowledge creation (e.g. Arora et al., 2018). While large corporate laboratories such as the Bell Laboratories or IBM and all their Nobel alumni are usually presented as a gone “*golden age*” (Gertner, 2012) of industrial research, our findings showed that the contribution of the industry to modern scientific discoveries remains essential in their ability to inspire scientists. Furthermore, it indicated that the key actors of this “*golden age*” such as 1956 Nobel laureates William Shockley, Walter Brattain, and John Bardeen at the Bell Laboratories or even 1920 Nobel laureate Charles-Edouard Guillaume were “*unusual*” (Cahn, 2005, p. 145) at that time as the share of industry-inspired laureates was limited before the 1990s. Hence, it advocates for a renewal of the understanding of university-industry interactions and research activities pursued in industrial contexts as the magnitude of this phenomenon might have been undervalued. Scientists seem to interact with the industry in complex ways that go far beyond transfer. Rather than being science supplier for the industry, some scientists are involved in relationships with industrial corporations that favor radical new scientific knowledge development. Instead of hurting academia through barriers to sharing and publications (e.g. Murray, 2010), the industrial partners of Nobel laureates could not fully capture the value of those critical scientific breakthroughs and favor those discoveries. It echoes Bikard et al. (2019) observation that industry and academia’s institutional environments are complements rather than substitutes. It opens rooms for further research to better understand how the industry benefited from their relationships with engaged scientists.

6. Appendix

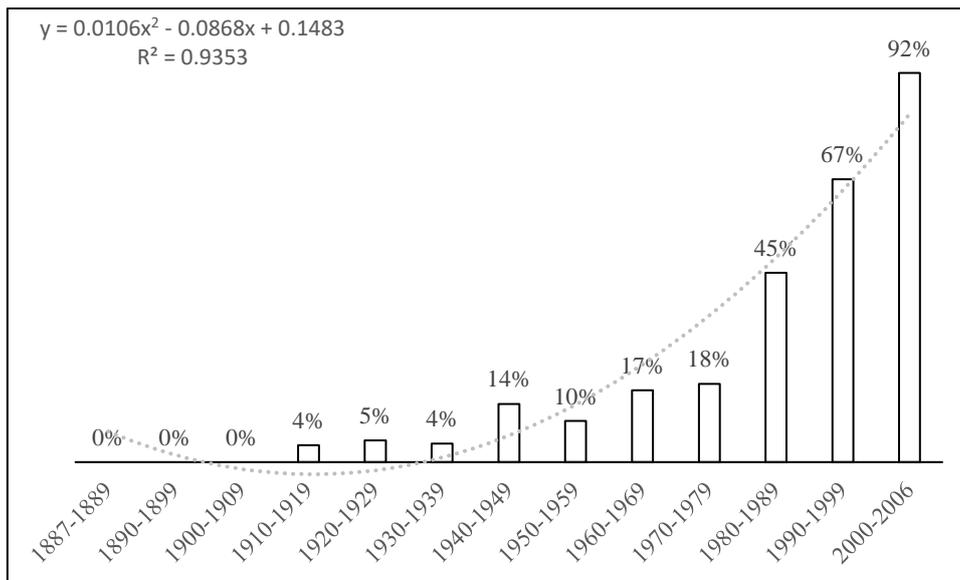
Industrial Company names	Nbr. interacting laureates	Nbr. of academic papers	Nbr. of patent families
Bell Laboratories	23	120	33
IBM	11	115	10
Nichia Chemical Industries	1	2	87
Matsushita	1	4	46
Toyoda Gosei	2	0	34
Monsanto	2	1	27
Merck	7	22	3
AkzoNobel	1	23	0
Hercules Inc	1	0	20
Kobe Steel	1	15	3
Ube Industries	1	2	16
CIBA-Geigy Chemical	3	5	11
Fujitsu	1	0	16
Novartis	5	16	0
DuPont	3	15	0
Kanebo Ltd	1	0	14
Meiji Seika Kaisha Ltd	1	0	13
Thomson-Houston Company	1	0	13
Shell	2	9	2
Varian Associates	2	7	4

The number of academic papers represents the total number of academic papers wrote by a given laureate as affiliated to the company, or with co-authors affiliated to the company, or with the company as funding organization. The number of patent families represents the total number of patent families filled by Nobel laureates with the company as applicant. The number of interacting laureates represents the number of distinct laureates that have published the latter academic papers or filled the latter patents. Those number are non-normalized due to company-level analysis.

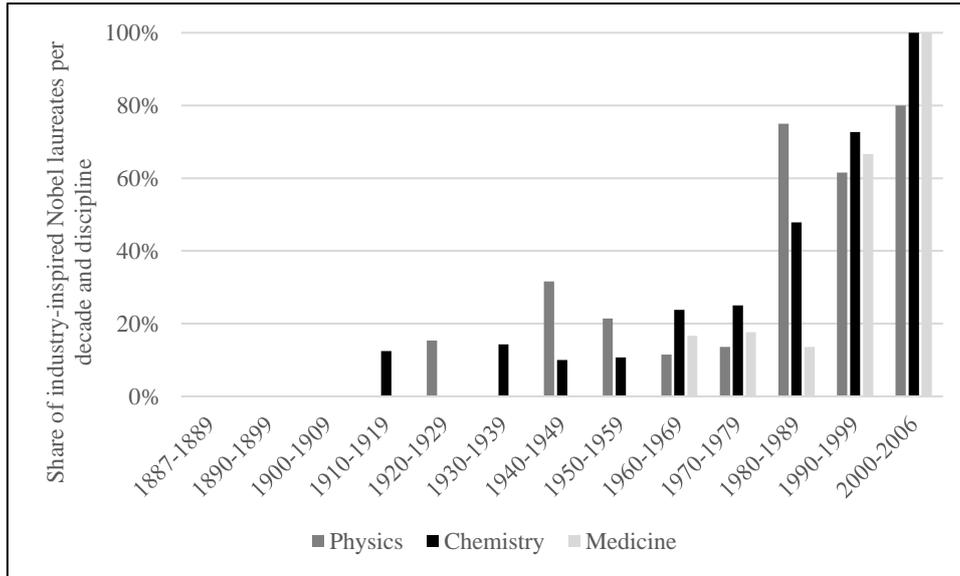
Appendix A.1 – Top-20 companies interacting with Nobel laureates classified per number of output



Appendix A.2 – Evolution of the number of inspired-by-industry Nobel laureates (treated) and other laureates per decade



Appendix A.3 – Evolution of share of industry-inspired Nobel laureates per decade by date of Prize Paper



Appendix A.4 – Evolution of share of industry-inspired Nobel laureates per decade and date of Prize Paper and split by discipline

	Period 0 <i>(before Nobel's paper publication)</i>			Period 1 <i>(between Nobel's paper publication and Prize)</i>		
	Non-treated	Treated	Total	Non-treated	Treated	Total
Nbr. academic publications	0.36	1.05	0.50	1.24	2.62	1.54
Nbr. academic publications - Scholarly citations weighted	0.51	1.12	0.63	1.13	2.36	1.40
Nbr. academic publications - SNPL citations weighted	0.45	1.07	0.58	1.11	2.69	1.46
Nbr. patent families	0.04	1.04	0.25	0.65	5.92	1.81
Nbr. patent families - Patent citations weighted	0.01	1.12	0.24	0.68	5.82	1.81
Nbr. industry partners	0.00	2.01	0.42	0.82	4.48	1.62
Period duration	9.84	16.73	11.28	19.69	17.46	19.20
Nbr observations	410.00	108.00	518.00	379.00	107.00	486.00

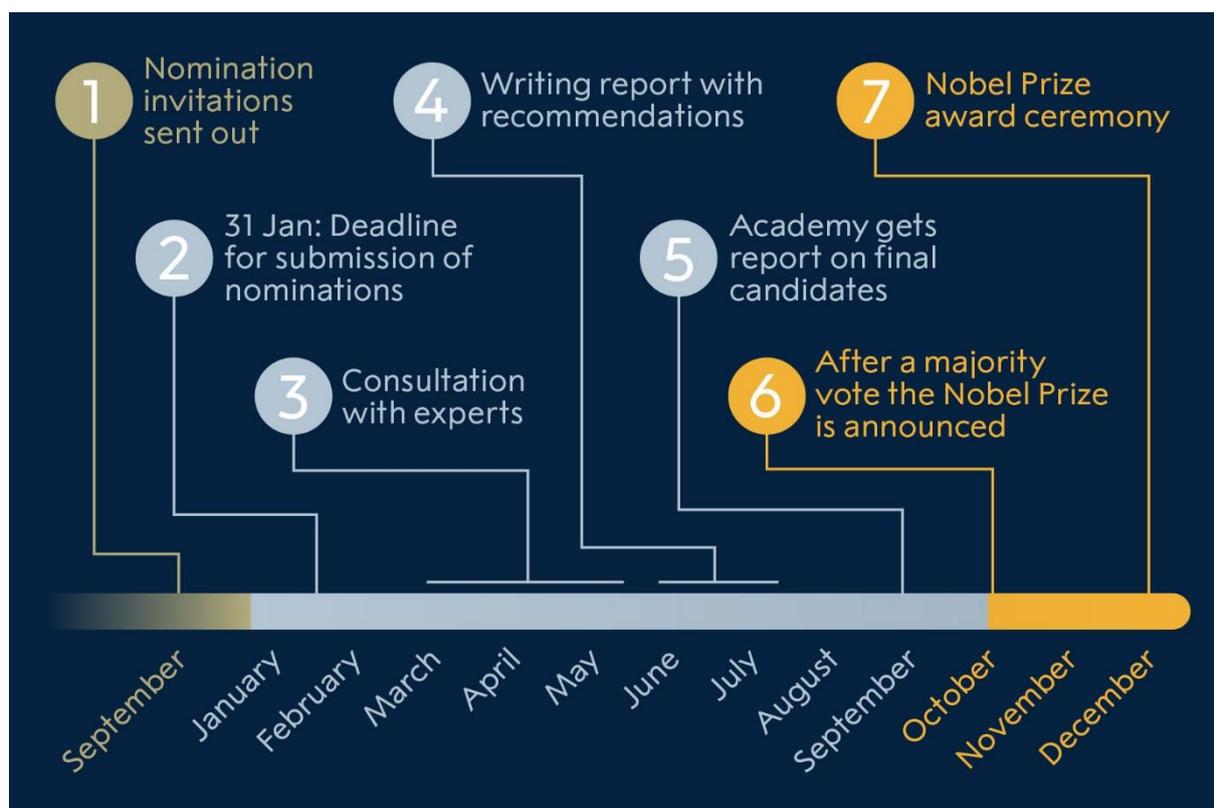
Appendix A.5 – Descriptive statistics in Period 0 and 1 for treated and non-treated laureates

<i>Chi-squared test:</i> <i>ln alpha = 1</i>	DV = Nbr. Academic publications	DV = Nbr. academic publication -	DV = Nbr. academic publications	DV = Nbr. patent families	DV = Nbr. patent families -	DV = Nbr. industry partners
---	---------------------------------	----------------------------------	---------------------------------	---------------------------	-----------------------------	-----------------------------

	Scholarly citations weighted	- SNPL citations weighted	Patent citations weighted			
	(1-1)	(1-2)	(1-3)	(1-4)	(1-5)	(1-6)
Chi-squared	99.55***	78.40***	10.46**	16.68***	55.78***	88.16***
Status	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject	Reject

* p<0.1, ** p<0.05, *** p<0.01. Acceptance or rejection decision is based on a 5% confidence intervals ratio.

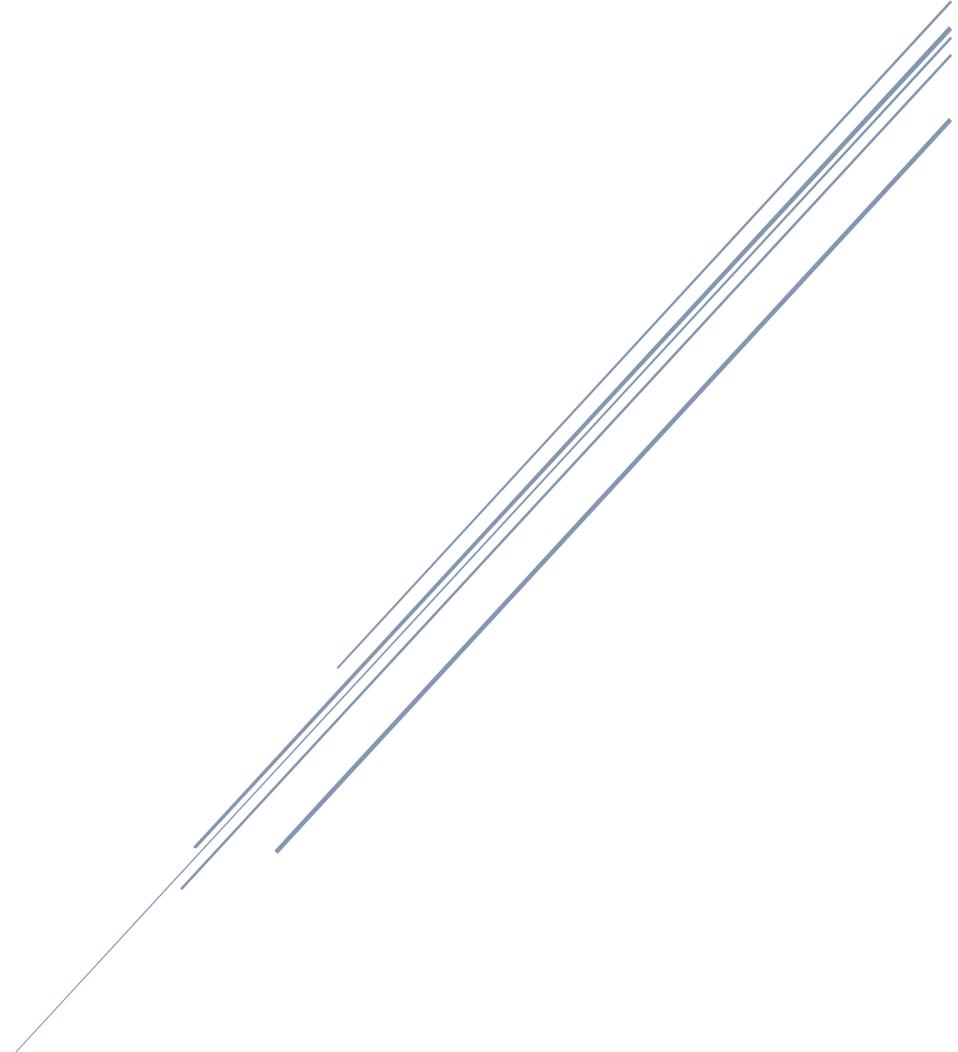
Appendix A.6 – Overdispersion test



Appendix A.7 – Chemistry Nobel Prize process (extracted from Nobelprize.org on the 15/10/2020)

ESSAI N°2

Market-pull or research push? Effects of research orientations on university-industry collaborative Ph.D. projects' performances



Thème	Détail
Auteurs	• Quentin Plantec, Benjamin Cabanes, Pascal Le Masson, Benoît Weil
Présentations conférences	• V1 : Conférence <i>R&D Management</i> 2019, Paris ed. • V2 : Conférence <i>Academy of Management</i> 2021, Philadelphia ed. (en cours de revision)
Langue	• Anglais

MARKET-PULL OR RESEARCH PUSH? EFFECTS OF RESEARCH ORIENTATIONS ON UNIVERSITY-INDUSTRY COLLABORATIVE PH.D. PROJECTS' PERFORMANCES

Quentin PLANTEC, Benjamin CABANES, Pascal LE MASSON & Benoit WEIL

ABSTRACT: There is abundant literature on the consequences of academic engagement with the industry, on overall scientists' commercialization and scientific performances. Nevertheless, the literature remains silent on how those performances are contingent on the research orientation's choice at the project level. This paper aims to fill this gap by exploring different research orientations in the context of university-industry collaborative Ph.D., a topic of interest as private companies are becoming more involved in Ph.D. training. To do so, we relied on a unique dataset comprising of 635 Collaborative Ph.D. projects through the CIFRE program in France. We classified the projects' ex-ante research directions: market-pull-oriented (MPO), research-push-oriented (RPO), and simultaneous-discovery-invention-oriented (SDI), and we observed their ex-post performances. First, as expected, an orientation towards industry needs conduct to higher commercialization performances. However, counter-intuitively, those projects are also prone to have similar scientific performances than those oriented towards scientific discoveries. Second, while SDI projects were considered over-performing other research orientations, they led to more significant scientific performances than traditional orientations but generated as many patents as MPO projects. Finally, we highlight that initial research orientation is a crucial determinant variable of scientific and commercialization performances, and our paper opens rooms for further research to the literature on academic engagement, university-industry collaborations, and Collaborative Ph.D.

KEYWORDS: University-Industry collaborations, Ph.D., Academic engagement; Doctoral education.

ACKNOWLEDGMENT: We would like to thank C. Angelier (ANRT), P. Giat (ANRT), N. Sennequier (INPI), F. Caillaud (WIPO), the members of the Design Theory & Management of Innovation (DTMI) group, the participants of the track "R&D ecosystems" at R&D Management Conference Paris ed., 2019, for their helpful comments for this article. We also thank the three research engineers that were involved in the project: Maureen Vagneron, Amaury Cordier and Paul Noiret.

MARKET-PULL OR RESEARCH PUSH? EFFECTS OF RESEARCH ORIENTATIONS ON UNIVERSITY-INDUSTRY COLLABORATIVE PH.D. PROJECTS' PERFORMANCES

1. Introduction

Collaborations between public research laboratories and private companies are of vital interest to favor new scientific knowledge, transfer, and technological innovation (e.g. Etzkowitz and Leydesdorff, 2000; Rothaermel et al., 2007). To support those, academic have tended to be more extensively *engaged*⁹⁰ with the industry (for a global overview, see Perkmann et al., 2013; 2021) through various forms of research collaborations.

Academic engagement is widely practiced across disciplines and is of substantial economic significance both for private companies and universities (e.g. Cohen, Nelson, & Walsh, 2002; Hughes et al., 2016). Previous research puts great effort into identifying individuals (e.g. Tartari & Breschi, 2012), organizational (e.g. Johnson, Monsen, & MacKenzie, 2017), relational (e.g. Tartari, Perkmann, & Salter, 2014), and institutional characteristics (e.g. Abreu & Grinevich, 2013) conducting to greater academic engagement, as well as the consequences of such engagement on research productivity (e.g. Bikard, Vakili, & Teodoridis, 2019), commercialization potential (e.g. Lavie & Drori, 2012), and broader societal impact (e.g. Iorio et al., 2017).

Nevertheless, the consequences of academic engagement on research quality and intellectual property development's potential remain unclear (Perkmann et al., 2021), and are contingent to various research projects' characteristics (e.g. Callaert, Landoni, Van Looy, & Verganti, 2015; Rentocchini, D'Este, Manjarrés-Henríquez, & Grimaldi, 2014). While it has been shown that academic engagement conducts on average to higher academic productivity (e.g. Banal-Estañol, Jofre-Bonet, & Lawson, 2015; Bikard et al., 2019; Gulbrandsen & Smeby, 2005; Hottenrott & Lawson, 2017), engaged academics' scientific performances are heterogeneous at the individual level (Van Looy, Callaert et Debackere, 2006). This latter phenomenon can be linked to the large variety of university-industry collaborative research projects' aims and settings (Carayol, 2003 ; Meyer-Krahmer et Schmoch, 1998). To go a step further in understanding academic engagement's effects on research projects' performances,

⁹⁰ To simplify, we will use the terminology "engage" always in the context of engage with the industry though research collaborations, in line with Perkmann & al. (2013, 2021) definition.

management scholars have recently called to control for projects' research orientation (e.g. Tijssen, 2018), an issue that received less attention in the literature on academic engagement.

On the one hand, some scholars alleged that a more excellent orientation towards industry demands—ie. *market-pull orientation* (ie. MPO)—in university–industry collaborative research projects would lead to reducing academic contribution to open science and favoring the development of IP for private companies (e.g. Blumenthal et al., 1996; David and Dasgupta, 1994), when compared with more *research-push orientated* projects (ie. RPO). For example, Callaert et al. (2015), by analyzing three strategic approaches mainly used by scientists from two European Universities across their joint-research projects' portfolios, showed that when scientists do not participate in projects in response to industry's calls, they record higher scientific performances. On the other hand, even when supporting industry needs (ie. MPO), academics' research activities can be fostered by having access to companies' skills, equipment, or materials (e.g. D'Este and Perkmann, 2011; Mansfield, 1995), by increasing the pool of available new ideas for scientists (e.g. Evans, 2010; Siegel et al., 2003), and by favoring more fruitful labor division (Bikard, Vakili et Teodoridis, 2019). Hence, Goldstein and Narayanamurti (2018) explored another possible fruitful research orientation, based on the scientists' commitment to addressing fundamental research questions through applied research, referred to as *Simultaneous Discovery-Invention (SDIO)* research orientation (in echoes to Stokes, 1997).

As university–industry collaborations remain contentious (Murray, 2010), there is a need to better assess the relevance of those results for academic engagement in diverse contexts (disciplines, universities, etc.), at project level, and with a fine-grained control variables' set due to, as previously mentioned, the heterogeneity of joint-research projects (Callaert *et al.*, 2015 ; Tijssen, 2018). Indeed, the effects of *ex-ante* research orientation on *ex-post* scientific and commercialization performances of joints research projects with the industry needs to be further assessed and still lack quantitative analysis. Our study aims to fill this gap by classifying joint research projects among different research orientations (ie. market-pull, research-push, or simultaneous-discovery-invention) at their launch, and reviewing their ex-post patenting and publication data.

To do so, we rely on an original dataset of a yet understudied category of joint-research projects: university–industry collaborative Ph.D. While Ph.D. students represent an essential part of academic research groups and are vital contributors to the development of new scientific knowledge (e.g. Baruffaldi, Visentin, & Conti, 2016; Larivière, 2012), there is recent evidence that some of them are also involved in collaborations with the industry during their training,

along with their supervisors (e.g. Buenstorf and Heinisch, 2020; Gaughan and Robin, 2004). In Europe, many countries have prescribed various government-funded programs to develop *Collaborative Ph.D.* with the industry, representing large number of Ph.D. students. Nevertheless, in management science, research on Ph.D. students' contribution to science and innovation remains limited (Shibayama, 2019), and the specific study of Collaborative Ph.D. programs largely underexplored (Salimi et al., 2015a). It has to be highlighted that the managerial literature on *Collaborative Ph.D.*, while scarce, obtains findings aligned with the broader literature on academic engagement, including an overall positive effect on scientific productivity compared to traditional Ph.D. (Gaughan et Robin, 2004 ; Salimi, Bekkers et Frenken, 2015a) despite heterogeneous settings of projects (Butcher et Jeffrey, 2007). We also found evidence in qualitative studies of the three distinct research orientations previously mentioned (e.g. Grimm, 2018 for MPO; Harryson et al., 2007 for SDI; Kerr and Ivey, 2003 for RPO), which make the case relevant for the review of research orientations' effects on joint projects' scientific and commercialization performances.

The paper is structured as follows: in the following paragraph, we define hypotheses derived from the literature; then we introduce the context of the empirical data, as well as the methodology used to analyze the different variables and indicators. A subsequent section covers the main results, and we then conclude by discussing theoretical implications, limitations, and room for further research.

2. Theoretical considerations

2.1. Academic engagement: the case of Collaborative Ph.D.

While being subject to regional specificities, overall, Collaborative Ph.D. covers a research project that has “*a typical duration of 3-4 years and which involves a university, a firm and a Ph.D. candidate, all working together to meet (common or individual) expectations*” (Salimi, Bekkers et Frenken, 2016, p. 813) and for which an “*industry expert take part in the supervision committee, officially and informally*” (Borrel-Damian, Morais et Smith, 2015, p. 17). Hence, they can be arranged directly by the company and a public laboratory on a discretionary basis (see examples from Italy, Switzerland, Norway, or Lithuania in Borrel-Damian et al., 2015, p. 67-69). However, in many cases, and particularly in Europe, policy-makers developed specific

programs to support and develop Collaborative Ph.D. programs⁹¹. They sometime represent large numbers of Ph.D. students, such as in France where 10% of the total cohort of funded Ph.D. students each year is involved in such program⁹².

is our understanding that Collaborative Ph.D. programs constitute then a modality for academic engagement (D'Este et Perkmann, 2011), that can be referred to as “*knowledge-related interactions by academic researchers with non-academic organisations, as distinct from teaching and commercialisation. These interactions include collaborative research, contract research [...]*” (Perkmann *et al.*, 2021, p. 1). Indeed, Collaborative Ph.D. cannot be viewed as solely a practice to transfer or commercialize scientific knowledge, as they require overall similar scientific quality than traditional Ph.D. (Kerr et Ivey, 2003). Furthermore, Collaborative Ph.D. is a way for both Ph.D. students and academic supervisors to be involved in collaborative and contractual research projects with companies. The latter constitutes one key reason universities engage in Collaborative Ph.D. projects (Borrel-Damian, Morais et Smith, 2015).

As previously noted, Ph.D. students involved in Collaborative Ph.D. do not seem to suffer, on average, from a negative effect on their scientific productivity in comparison with traditional Ph.D. programs. Kerr and Ivey (2003), through a case study analysis, concluded that the understanding of the scientific and technical issues in Collaborative Ph.D. projects is equivalent to traditional training programs. Hence Collaborative Ph.D. projects “*entail the same high standards for scientific quality of research as that required of a doctorate in a traditional doctoral programme*” (Borrel-Damian, Morais et Smith, 2015, p. 8). Gaughan and Robin (2004), by conducting a survey and CV analysis on 807 Ph.D. in life sciences and physics concluded that being engaged in the CIFRE Collaborative Ph.D. program in France, does not affect student’s publication productivity. Salimi *et al.* (2015), through an analysis of 448 Ph.D. students at Eindhoven University of Technology, showed that, on average, students involved in Collaborative Ph.D. research projects obtained better performances in terms of the number of scientific publications and number of publications’ forward citations than other students⁹³. Overall, those findings match with results from the academic engagement literature: one

⁹¹ Collaborative Ph.D. programs with the industry include BBSRC CASE or EPSRC CASE studentships in the UK, the Enterprise Partnership Scheme (IRCSET) in Ireland, the Leaders for Technological Industries scheme in Portugal, the Graduate-Cluster for Industrial Biotechnology in Germany, the Industrial doctoral student’s Project in Sweden, or the Industrial Ph.D. program in Denmark, CIFRE case in France.

⁹² French National Audit Court Data (2018), Report on the *Investment Plan for the Future* (PIA)

⁹³ It has to be highlighted that the study was performed in a particular context as the University was extensively relying on this particular scheme (ie. 1/3 of its Ph.D. students). Moreover, lots of projects were conducted with a unique large regional industrial private company.

consequence of engagement with the industry is, on average, an increase of scientific productivity at individual level (e.g. Bikard et al., 2019; Tijssen, 2018).

In terms of intellectual property generation and contribution to firms' innovation processes, Salimi et al. (2015) showed that Ph.D. students involved in Collaborative Ph.D. projects recorded better performances than those who do not, in terms of the number of filed patents and number of patents' forward. Furthermore, Buenstorf and Heinisch (2020) analyzed the contribution to firms' innovation processes of recently graduated Ph.D. in the context of the German laser industry. Using topic-modeling techniques to compare Ph.D. dissertations and patents that Ph.D. holders filed for companies' accounts, they found out that some of them were filed while the inventor was still a Ph.D. student due to collaborative research projects. Focusing on those "*early patent[s]*" (Buenstorf et Heinisch, 2020, p. 4), they demonstrated that they were, on average, more exploratory regarding a given company's patent portfolio. This finding conducted them to claim that having an early access to new scientific knowledge developed by Ph.D. students is crucial for companies' innovation performances. Finally, those two studies are also in line with results from the academic engagement literature suggesting that engagement with industry increases academics' inventive prowess measured by patents (e.g. Lawson, 2013).

Collaborative Ph.D. projects differ in terms of settings, goals, and characteristics (e.g. Butcher and Jeffrey, 2007; Salimi et al., 2015b). While they are associated on average to greater scientific performances, performances at the project level are heterogeneous (Tavares, Soares et Sin, 2020). Similarly to more traditional university-industry collaborative projects, one key, but understudied, explanatory factor might be embedded in the choice of projects' research orientation (Callaert *et al.*, 2015 ; Tijssen, 2018), that has to be analyzed by reflecting to the broader literature on academic engagement. We acknowledge that relying here on collaborative Ph.D. instead of traditional university-industry collaborative projects do not conduct to significant bias regarding research orientation, as in most collaborative Ph.D. program, the Ph.D. supervisor is highly involved in the project.

2.2. Collaborative Ph.D. and research orientations

This section discusses possible research orientations in Collaborative Ph.D. projects and their effects on subsequent scientific discoveries, commercialization potential, and possible joint-outcomes (ie. at least one publication and one patent) through a given project.

2.2.1. Market-pull (MPO) and Research-push (RPO) research orientations

Market-pull-oriented (ie. MPO) collaborative Ph.D. projects are based on conducting research on the companies' products, processes, or services in relation to companies' R&D short-term goals, needs, or issues⁹⁴. Conversely, *research-push-oriented* (ie. RPO) projects are more oriented towards creating novel basic scientific knowledge⁹⁵. Those two research directions are mostly presented as opposed to one another.

In terms of performances, MPO research projects are mainly considered as less prone to favor new scientific discoveries but tend to lead more often to commercialization through patenting (e.g. Bush, 1945; Calderini, Franzoni, & Vezzulli, 2007). Some examples of both research directions were found when reviewing the literature on Collaborative Ph.D. (e.g. Grimm, 2018 for market-pull; Kerr and Ivey, 2003 for research-push). Overall, MPO projects are more frequent in university-industry interactions (Mansfield, 1998; Muscio & Pozzali, 2013) as it would be easier for firms to absorb more applied knowledge (Bruneel, D'Este, & Salter, 2010; Nooteboom, Van Haverbeke, Duysters, Gilsing, & van den Oord, 2007). This phenomenon might be amplified in Collaborative Ph.D. projects due to companies' bargaining power in providing financing for the project (Slaughter et Campbell, 2002). Here, we will detail factors explaining those projects' performances in relation to the two identified research directions in the context of Collaborative Ph.D.

First, when external funding requirements shape the content of a research project (ie. MPO projects), it has been showed that scientists involved record lower scientific performances due to less incentive to explore novel lines of inquiry (Azoulay, Graff Zivin et Manso, 2011). In the context of Ph.D. students, Broström (2019), analyzing survey results related to the 2006 cohort of Ph.D. students in Sweden, confirmed this result. Notably, he highlighted that "there exists a trade-off between two potential objectives: to *"get what you want"* in terms of research content and to foster academically successful PhDs" (Broström, 2019, p. 1656). As in MPO Collaborative Ph.D. projects, content and objectives are extensively shaped by the company, it supports the detrimental effect of Ph.D. student scientific performances compared to RPO Collaborative Ph.D. projects, which might be more extensively shaped by Ph.D. students and Ph.D. supervisors.

⁹⁴ Those projects are equally called applied-oriented (Tijssen, 2018) or non-proactive strategies (Callaert et al., 2015).

⁹⁵ Those projects are equally called discovery-oriented (Tijssen, 2018) or proactive strategies (Callaert et al., 2015)

Second, Collaborative Ph.D. students may act as “gatekeepers” (Thune and Børing, 2015, p. 641) between universities and industries, particularly in MPO projects for which key objectives would be transferring and adapting public laboratory’s knowledge to the industry context. Those Ph.D. students might have to spend time and effort for other purposes than research activities (problem-solving for the companies, business analyses, etc.), activities that have been shown to negatively impact scientists’ production of new academic knowledge (Toole et Czarnitzki, 2010). Conversely, adapting public laboratory’s knowledge to the industry context can boost patenting in those MPO research projects, compared to more RPO ones.

Third, Collaborative Ph.D. students are on average more prone to take a position in the industry at project completion (Mangematin, 2000 ; Thune et Børing, 2015), or to engage in an entrepreneurial activity through start-up creation (Muscio and Ramaciotti, 2019). Hence, they might tend to self-select more in MPO projects as their commitment to producing breakthrough science might be lower than acquiring business knowledge, as shown by Grimm (2018) in the context of the German automotive industry.

Four, in MPO, companies can be more prone to implement publication barriers restricting or delaying publications as it has a direct impact on their innovation portfolio (Blumenthal *et al.*, 1996 ; Czarnitzki, Grimpe et Toole, 2015), which can ultimately impact the scientific productivity of involved Ph.D. students compared to RPO projects.

Based on those findings, we then derived the following:

- ***Hypothesis H1.*** *Ex-ante RPO research direction in Collaborative Ph.D. projects would result in ex-post greater scientific performances than MPO projects.*
- ***Hypothesis H2.*** *Ex-ante MPO research direction in Collaborative Ph.D. projects would result in ex-post greater patenting performances than RPO projects.*

2.2.2. Simultaneous discovery-invention (SDI) research orientation

Another possible research orientation in collaborative Ph.D. projects lies with the Pasteur quadrant logic (Stokes, 1997), by intersecting basic research and an interest in the discovery’s usage. There are qualitative observations that the cycle of discovery–invention is not always linear (Godin, 2006 ; Narayanamurti et Odumosu, 2016 ; Narayanamurti, Odumosu et Vinsel, 2013). Hence, Goldstein and Narayanamurti (2018) studied the performances of research projects committed to address technological issues that are too novel to be considered as applied ones (Goldstein et Narayanamurti, 2018, p. 1507). To do so, they analyzed projects from a specific branch of the US Department of Energy, the Advanced Research Projects Agency–

Energy (ARPA-E), which aims to support such projects. They compared performances of ARPA-E projects with those from other divisions: the Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE) branch, which usually financed applied-oriented projects (ie. MPO), the Office of Science, which usually financed basic-research (ie. RPO). They showed that projects of ARPA-E record higher performances than projects from the other branches in terms of joint output of patents and publications. We found one example of this strategy in qualitative work on Collaborative Ph.D. in Harryson et al. (2007). We would push this line of research forward by testing how simultaneous discovery-invention (SDI) research direction would perform in the context of Collaborative Ph.D. projects. We made then the following hypothesis (**Hypothesis H3**):

- **Hypothesis H3.** *Ex-ante SDI research direction in Collaborative Ph.D. projects would result in ex-post greater joint output (scientific publication and filed patents) performances than MPO or RPO project's direction.*

3. METHODOLOGY

3.1. Context: the CIFRE program

To test our hypotheses, we relied on an original dataset regarding collaborative Ph.D. projects, started in 2015, and conducted through the *Industrial Convention to Research Training* (CIFRE) Collaborative Ph.D. program (then called “CIFRE program”) in France.

The CIFRE program was established in France in 1981 and aims at “*financially support a company operating through the French legislation, to recruit a Ph.D. student that will be at the heart of a joint research project with a public laboratory. The research works of the joint-research project have to support the preparation of the Ph.D. student's defense*”⁹⁶ (ANRT, 2018, p. 25). The *National Agency for Research and Technology* (ANRT), a not-for-profit organization that acts on behalf of the *French Ministry of Higher Education, Research, and Innovation* (MESRI), supervises the CIFRE program. In 2015, after 35-years of operation, the CIFRE Ph.D. program trained 25,400 Ph.D. students in 8,500 different companies and involved 4,000 different public laboratories. The CIFRE program has become more and more attractive each year since its creation. In 2000, 750 CIFRE Ph.D. projects were launched while 1,383 started in 2015, the latter representing 10% of all the Ph.D. students' cohort in France that year.

⁹⁶ Translation from French to English by the authors.

In the CIFRE Ph.D. program, the company, the public laboratory, and the Ph.D. student are all contractually tied (figure 1). First, the company—from large companies of over 5,000 employees to SMEs of less than 250 employees—has to hire the Ph.D. student through a 3-year employment contract (or a permanent contract) at a minimum annual gross wage of 23,484€ (2015 figure). Second, the Ph.D. student has to be enrolled in the University⁹⁷ from which the public laboratory belongs. The Ph.D. student and the public laboratory are tied with a Ph.D. agreement, which details the conditions of the research, the registration conditions, rights, and duties of the Ph.D. students to obtain the Ph.D. diploma in the University. It has to be noted that the program also attracted 21% of foreign Ph.D. students in 2015. Third, the public laboratory and the company are tied with a 3-year Contractual Agreement. While there is no specific framework, usually, the following sections are included in the Contractual Agreement: characteristics of the parties, workplace arrangements for the Ph.D. student (including time to be spent in each facility), financial arrangements, intellectual property conditions, and litigation and termination arrangements. Usually, the company contribute financially to the supervision of the Ph.D. student by the public laboratory. Moreover, a specific Appendix in the Contractual Agreement contains a research project summary at the beginning of the joint research project. ANRT supports the research by providing the company with a 14,000€ subsidy each year during the project's three-year duration, on a budget made available by the MESRI.

⁹⁷ We used the general term "University" here, but due to the French higher education system's specificities, it also includes Grandes Ecoles and other Higher Education institutions such as business or engineering schools.

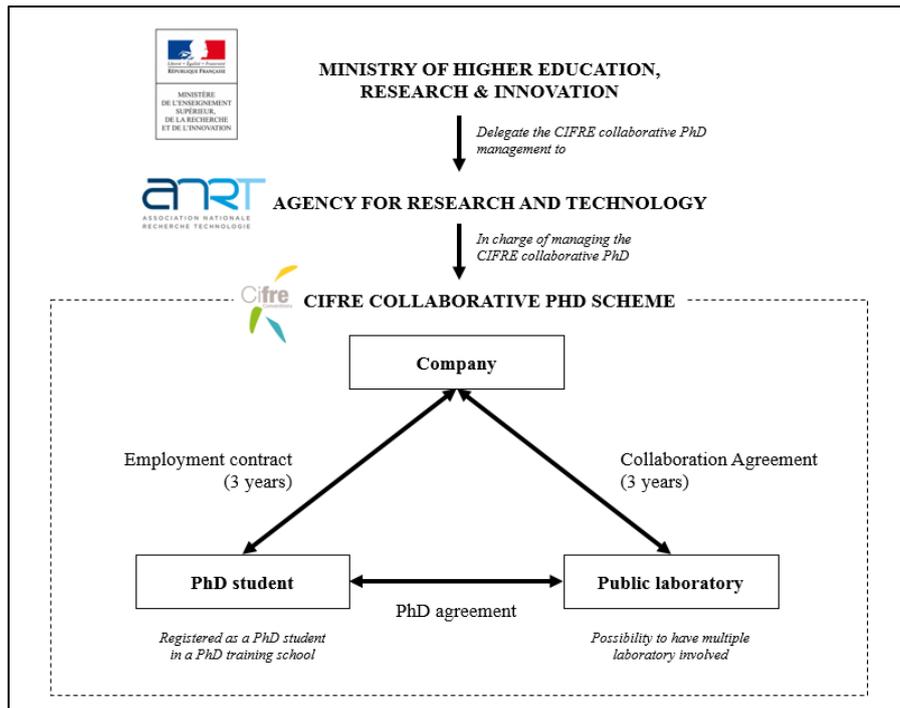


Figure 1 – Parties and institutional ties of a CIFRE Collaborative Ph.D.

One key element of the CIFRE program is that the parties are set free to define the joint research project goals, orientations, content, field of research⁹⁸ and expected outcomes as long as the research work serves the Ph.D. dissertation and conduct the student to be graduated with the Ph.D. diploma at completion. Hence, the public laboratory and the company are able to negotiate the Contractual Agreement that is the most suitable for the project. For example, the time to be spent by the Ph.D. student in a given facility during the three years can be divided from 0% to 100%, intellectual property can be fully appropriated by one of the parties or shared between them. Nevertheless, to be eligible for the CIFRE program, the parties have to complete an application including details on their characteristics, conditions of the project (e.g. time spent by the Ph.D. student in each facility), and the research project's summary. ANRT evaluates the joint-research project eligibility to the CIFRE program, in particular based on an expert assessment of the project. The latter, which is typically made by a university professor in the field of the research project, focuses on the “*scientific value of the project*” and “*the selected Ph.D. student's adequacy with the project's goals*” (ANRT, 2019a, p. 4) The acceptance rate for a CIFRE Ph.D. project by ANRT is 90%.

⁹⁸ The program is funding projects in any scientific disciplines (engineering, social sciences, mathematics, etc.), but in 2015, Information and Technological Science Technologies (22%), Engineering Sciences (20%), and Chemistry & Materials (12%) are the top-3 scientific disciplines among the CIFRE project.

ANRT is also performing an ex-post evaluation of the projects through dedicated surveys that are separately sent to the Ph.D. student, to the Ph.D. supervisor in the public laboratory, and to the Ph.D. supervisor in the company upon project completion. Those surveys include elements regarding the project management (e.g. number of meetings between the parties, potential conflict regarding the research orientation), and the performances (e.g. number of top journal publications, number of filed patents by the company related to the project).

Regarding our research question, the CIFRE Ph.D. program is highly suitable to test our hypotheses as the program is not oriented towards a particular field or scientific discipline, involved diverse universities and companies, and does not favor a specific research direction. Indeed, the CIFRE Ph.D. program supports projects oriented towards a “*fundamental approach*” (ANRT, 2020, p. 9) (ie. research-push); the development of “*technological disruption*” (ANRT, 2019b, p. 2) or aiming at “*anticipating future technology*” (ANRT, 2020, p. 9) (ie. simultaneous discovery-invention), or the “*development of an competency to solve [company’s] complex problems*” (ANRT, 2020, p. 10) and “*transfer and value [public laboratory] research*” (ANRT, 2020, p. 9) (ie. market-pull). We also highlight that due to the specific settings of Collaborative Ph.D. in the CIFRE program (e.g. contractual agreement between the public laboratory and the company), those projects are representative of traditional university-industry research collaborations and do not appear biased by the fact that it also implies the Ph.D. dissertation completion.

3.2. Data

In this study, we relied on a unique dataset of Collaborative Ph.D. projects launched in 2015 through the CIFRE Ph.D. scheme in France. For each of those projects, the data includes:

- Details from the Application Form completed by the parties to apply for the CIFRE program (e.g. number of employees of the companies, Nationality of the Ph.D. student, geographical location of the facility);
- The Contractual Agreement (and its Appendix related to the research project summary) negotiated between the public laboratory and the company before the beginning of the project (e.g. intellectual property terms, a summary of the research projects);
- The three post-project surveys completed by (1) the Ph.D. supervisor in the public laboratory, (2) the Ph.D. supervisor in the company and (3) the Ph.D. student (e.g. number of patents filed by the company along with the project, number of academic publications, number of inter-parties meetings, potential conflicts occurring during the project).

The sample was restricted to projects for which sufficient data were available (particularly, three completed post-CIFRE surveys and a comprehensive project summary), representing 635 Ph.D. projects.

The key independent variables of interest, related to the *ex-ante* research orientation, were computed following a qualitative analysis of the research project summaries included in the Contractual Agreement's Appendix (see next subsection for dedicated procedure). To control for characteristics of the different projects, we extracted 25 control variables from the Application Forms, Contractual Agreement, and the post-CIFRE surveys. Dependent variables were extracted from the post-CIFRE surveys based on self-reported (1) number of scientific publications, (2) number of scientific publications in top-journal, (3) number of filed patents by the company with the project, (4) Ph.D. Prize received as an award by Ph.D. student at project completion. Besides, to measure performances, we also explore joint outcomes (Goldstein et Narayanamurti, 2018).

3.3. Procedure to derive research orientation

Exploring the role of research directions on projects' performances is a challenging task. Scholars mainly relied, as a proxy for orientation towards MPO (or applied-research), to an *ex-post* evaluation of the project's outcomes. For example, scholars reviewed to what extent scientific papers published in relation with a given project was cited in any patent (see the usage of scientific non-patent literature, for example in Marx and Fuegi, 2019), the type of journal in which scientific papers were published classified by the number of scientists affiliated to a private company that are publishing in that specific journal (e.g. Tijssen, 2012), or the number of patents filed in the project's context (e.g. Bikard et al., 2019). Others relied on proxy closer from an *ex-ante* analysis of the research direction. For example, Callaert et al. (2015) used survey data to distinguish between different research orientations in the portfolio of scientist's projects. Goldstein and Narayanamurti (2018) relied on the projects' belonging towards the US Department of Energy's different departments to derive research orientations, Azoulay et al., (2011) to projects' belonging towards either Howard Hughes Medical Institute or National Institutes of Health. However, having *ex-ante* information on projects' research orientations would be critical to assess the effect on projects' performances. Therefore, our original dataset contains projects' summaries at project launch that can be qualitatively analyzed to derive the research direction of the project.

To do so, we classified research projects' summaries enclosed in the Contractual Agreement according to three distinct research directions: (1) research-push, (2) market-pull and (3) SDI, by using a qualitative approach. The methodological process is detailed below and summarized in a flow chart (Figure 2).

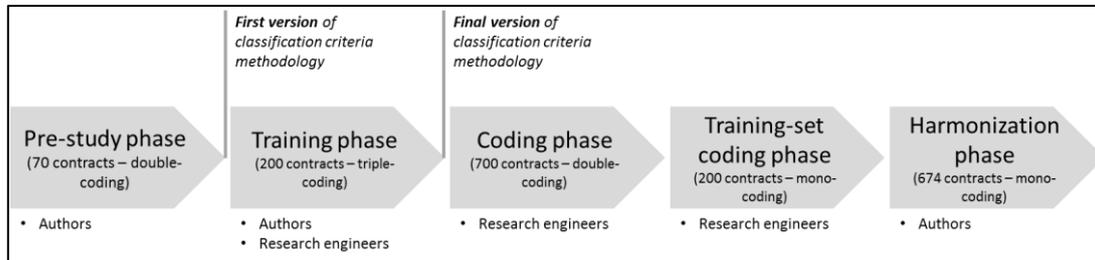


Figure 2 – Research strategies methodology implementation

During a *pre-study phase* focusing on analyzing 70 research projects' summaries from various years provided by ANRT (excluded from the final dataset), the authors defined a list of criteria to classify each research project according to the three possible research directions. Then, we relied on a structured sample of 909 Contractual Agreement (and associated Appendix with projects' summaries) for CIFRE Collaborative Ph.D. projects launched in 2015 and which all have been completed (ie. no project terminated before completion). ANRT randomly selected projects for the purpose of the study by keeping the share of SMEs equal in the sample compared to the total number of CIFRE Collaborative Ph.D. launched in 2015 (43.2% in the sample, 43.9% in the total population). During the *training phase*, the research team trained three qualified research engineers to classify 200 projects according to the three research directions. The authors coded the first 40 projects and then discussed them during two meetings of approximately 2 hours with the research engineers to teach them the methodology. 160 other projects were then double-coded independently by the research engineers, and separately by the authors. The research engineers' results were discussed during regular meetings with the authors to ensure full appropriation and harmonization of the methodology. Based on their feedback, the list of criteria to classify projects was also iteratively updated and stabilized at the end of this phase. During the *Coding Phase*, the three research engineers double-coded independently and separately the 709 remaining research projects. During the *Training-set coding phase*, the 200 research projects from the training phase were each coded once another time by the research engineers to ensure the consistency of the approach. Overall, the *Coding Phase* procedure led to similar codes in over 70% of the final sample projects. In a final

Harmonization phase, the authors reviewed each project's summaries coded differently by the research engineers to define the most suitable research orientation (always among the two categories identified by the research engineers), based on verbatim extracted by the engineers to make a decision. Finally, we were able to classify 748 projects (82% of the dataset), as some missing or incomplete Appendix were discarded (e.g. only recto pages scans while the Contractual Agreement was printed on recto-verso). We also discarded the projects for which the three ex-post surveys were not available (15%), and we ended up with 635 projects in our final dataset.

	Definition	Criteria	Example
Research-push-oriented direction (ie. RPO)	The research project is dedicated to developing new fundamental scientific knowledge in a strictly defined disciplinary area and that could aim to strengthen the company's scientific competencies.	<ul style="list-style-type: none"> - There is only one scientific discipline mentioned in the project (eg. material chemistry, organic chemistry, computer science) with detailed existing literature and an identified precise scientific gap; - There is no existing precise product, process or service of the company that constituted the core of the research project; - It mainly includes projects focusing on (1) producing new scientific modeling and simulations, (2) establishing new scientific methodologies and chemical processes, (3) gathering data in the context of the company for social science projects but not directed towards implementation; - The project goal can be to develop a prototype only if it is constituting a proof of concept of a fundamental research experiment. 	<p>Project #0421 between Company A, operating in the defense area, and INSA (an engineering school) focuses on a new family of explosive called "insensible". The scientific gap is that the mechanical deformation and rupture modes during the explosion are yet unknown. The scientific goal is to define a new scientific methodology to model mechanical deformation. Here, we acknowledge that the project is not focusing on a particular product but a generic one.</p>
Market-pull-oriented direction (ie. MPO)	The research project is dedicated to developing new academic knowledge directly applied to a pre-existing product, process, or service of the organization.	<ul style="list-style-type: none"> - The research project focuses on a particular product, process, or service already existing (or at the final development stage) in the company and is explicitly mentioned in the project's summary. Research focusing on generic products are not considered here (e.g. airplane motors in general vs. the airplane motor X2589 for A321 aircraft); - Or, the research project is focusing on developing a new product that can be directly commercialized at the end of the project. - The project goal can be to develop a prototype, except if the prototype aims at being a proof of concept of a fundamental research experiment; - Social sciences projects for which the core objective is to design a new process directly implemented in the company and scientific literature is abundant according to the research summary would be considered in this category. 	<p>Project #0456 between Company B, producing tools for the beekeeper's industry, and Tours University focuses on developing a new trap for <i>Vespa Velutina Nigrithorax</i>, a sort of hornet. The company already conducted a project to develop scientific knowledge on this particular hornet. The project's objective is first to leverage scientific techniques to identify biotic parameters that would attract or be a repulsive for the hornet. Second, the project aims at designing a trap to capture the hornet that can be directly commercialized at project competition.</p>
Simultaneous-discovery-invention-oriented direction (ie. SDI)	The research project is dedicated to developing new scientific knowledge regarding the investigation of radically new scientific areas, transdisciplinary contexts-, or very disruptive industrial contexts.	<ul style="list-style-type: none"> - The research project can be transdisciplinary as more than one scientific discipline is mentioned in the project (e.g.: philosophy and medicine) or there is at least two public laboratories focusing on different areas involved; - The research project can be embedded in a radically innovative context which requires the development of new scientific methodology or new knowledge to tackle a new level of constraints (ie. the scientific gap includes to tackle many large challenges); - The research project can focus on the development of new knowledge in a very new scientific disciplines; - The project is not a follow-up of a previous company exploration (in particular with commercial objectives); 	<p>Project #0593 between Company C, producing numerical and video systems for the media industry, and INRIA focuses on developing innovative paths related to the display of images enhanced with tactile sensations. There are multiple scientific challenges to be tackled in the novel discipline called haptic. In particular, one objective is to be able to feel the sensation of a blue jeans by touching a screen.</p>

Table 1 – Research directions coding criteria and example

4. Results

4.1. Descriptive statistics

Variables' description is presented in **Table 2** and we also provide a descriptive statistics analysis in **Table 3**. Looking at our sample, first we identify that the three categories of research orientations are not equally represented. While it is mainly assumed that Collaborative Ph.D. projects would be prone to favor MPO projects due to companies' bargaining powers (e.g. Grimm, 2018; Slaughter and Campbell, 2002), it is not the case in our sample. Hence 60% of the projects are RPO, and 27% MPO, while 13% only are SDI.

Variable	Definition
SDI project	A dummy variable equal to 1 if the CIFRE Ph.D. project is considered as SDI; 0 otherwise.
RPO project	A dummy variable equal to 1 if the CIFRE Ph.D. project is considered as research-push-oriented; 0 otherwise.
MPO project	A dummy variable equal to 1 if the CIFRE Ph.D. project is considered as market-pull-oriented; 0 otherwise.
Comp. nbr. employees	Number of employees in the private company partner as declared by the Parties to ANRT at the beginning of the Ph. D. project
Comp. R&D dpt.	A dummy variable equal to 1 if the private company already has a structured R&D department as declared in the post-CIFRE company survey; 0 otherwise.
Comp. Start up	A dummy variable equal to 1 if the private company is considered as a start-up company as declared in the post-CIFRE company survey; 0 otherwise.
Comp. nbr. Ph.D.	The number of employees with a Ph.D. as declared in the post-CIFRE company survey; 0 otherwise.
Comp. Paris area	A dummy variable equal to 1 if the private company facility, in which the Ph.D. Candidate is involved, is located in the Paris Region, as declared by the Parties to ANRT at the beginning of the Ph. D. project; 0 otherwise.
Comp. excl. IP	A dummy variable equal to 1 if the private company has exclusive IP rights on the outcome of the Ph.D. project, as stipulated in the contractual agreement between the private company and the University; 0 otherwise.
Comp. first CIFRE	A dummy variable equal to 1 if the private company participate in the CIFRE program for the first time, as declared in the post-CIFRE company survey; 0 otherwise.
COMPMASTERED	A dummy variable equal to 1, if the private company looked for developing new scientific knowledge on a domain that is already mastered by the company through the CIFRE Ph.D. project, as declared in the post-CIFRE company survey ; 0 otherwise.
COMPNEW	A dummy variable equal to 1, if the private company looked for developing new scientific knowledge on a domain that is new for the company through the CIFRE Ph.D. project, as declared in the post-CIFRE company survey ; 0 otherwise.
COMPEQUIP	A dummy variable equal to 1, if the private company looked for accessing to university equipment and experimental know-how, as declared in the post-CIFRE company survey ; 0 otherwise.
Univ. Paris area	A dummy variable equal to 1 if the University facility, in which the Ph.D. Candidate is involved, is located in the Paris Region, as declared by the Parties at the beginning of the Ph. D. project; 0 otherwise.
Univ. exp. with indus.	A dummy variable equal to 1 if the University is used to be involved in joint projects with private third parties, as declared in the post-CIFRE University survey ; 0 otherwise.
Univ. excl. IP	A dummy variable equal to 1 if the University has exclusive IP rights on the outcome of the Ph.D. project, as stipulated in the contractual agreement between the private company and the University; 0 otherwise.
UNIVMASTERED	A dummy variable equal to 1, if the University looked for an experimental field in a scientific domain that is already mastered for the University through the CIFRE Ph.D. project, as declared in the post-CIFRE University survey ; 0 otherwise.
UNIVNEW	A dummy variable equal to 1, if the University looked for an experimental field in a scientific domain that is new for the University through the CIFRE Ph.D. project, as declared in the post-CIFRE University survey ; 0 otherwise.
UNIVEQUIP	A dummy variable equal to 1, if the University looked for having access to the company's equipment on know-how through the CIFRE Ph.D. project, as declared in the post-CIFRE University survey ; 0 otherwise.
Ph.D. Science oriented	A dummy variable equal to 1, if the Ph.D. Candidate is planning to work in academia, as declared in the post-CIFRE Ph.D. Candidate survey ; 0 otherwise.
Ph.D. French nationality	A dummy variable equal to 1, if the Ph.D. Candidate is French, as declared by the Parties to ANRT at the beginning of the Ph. D. project; 0 otherwise.
Ph.D. wage	The Ph.D. Candidate annual income as declared by the Parties to ANRT at the beginning of the Ph. D. project (and in contractual agreement); 0 otherwise.
Ph.D. contractual time with comp.	The Ph.D. Candidate share of the time to be spent in the company's facilities as declared by the Parties to ANRT at the beginning of the Ph. D. project (and in contractual agreement); 0 otherwise.
Ph.D. effective time with comp.	The Ph.D. Candidate share of the time effectively spent in the company's facilities during the CIFRE Ph. D. project, as declared in the post-CIFRE Ph.D. Candidate survey; 0 otherwise.
Ph.D. diverted from research	The Ph.D. Candidate reported that he or she had to perform work not related to the research project for the Company, as declared in the post-CIFRE Ph.D. Candidate survey; 0 otherwise.
Scientific disciplines	A categorical variable depending on the classification made by the ANRT of the scientific discipline of the research project among 10 possible scientific disciplines.
Colab. multi. lab.	More than one University laboratory is involved in the CIFRE project, as declared by the Parties to ANRT at the beginning of the Ph. D. project (and in contractual agreement); 0 otherwise.
Colab. conflict	The Ph.D. Candidate reported conflict between the company's and the university's objectives, as declared in the post-CIFRE Ph.D. Candidate survey; 0 otherwise.
Colab. new	A dummy variable equal to 1, if the private company and the university laboratory are involved in their first collaboration through the CIFRE Ph.D. project; 0 otherwise.
Colab. quarter meetings	A dummy variable equal to 1, if the Parties participated in a joint meeting on the CIFRE Ph.D. project at least each quarter; as declared in the post-CIFRE Ph.D. Candidate survey; 0 otherwise.
Colab. annual meetings	A dummy variable equal to 1, if the Parties participated in a joint meeting on the CIFRE Ph.D. project at least each year and less than each quarter; as declared in the post-CIFRE Ph.D. Candidate survey; 0 otherwise.
Top journal publication	Number of academic publications in top journals of the Ph.D. candidate discipline during the CIFRE Ph.D. project, as declared in the post-CIFRE Ph.D. Candidate survey.
Publication	Number of academic publications of the Ph.D. candidate during the CIFRE Ph.D. project (including those in top journals), as declared in the post-CIFRE Ph.D. Candidate survey.
Patent	Number of patents filled by the Ph.D. candidate with the Company as applicant during the CIFRE Ph.D. project (including those in top journals), as declared in the post-CIFRE Company survey.
Ph.D. Prize	A dummy variable equal to 1, if the Ph.D. candidate was awarded a Ph.D. Prize by a scientific associations, as declared in the post-CIFRE Ph.D. candidate survey.

Table 2 – Summary of variables used.

When focusing on projects' performances, first, Collaborative Ph.D. projects with an orientation towards SDI, on average, better perform than MPO or RPO projects. They lead to a higher number of output per project and are also more likely to obtain at least a publication (86.3% of projects) or a joint-output (21.3% projects), even when considering top-journal publications only (16.3%). By using a t-test analysis with unequal variance, we show that the difference in means between SDI projects and projects with other research orientations projects are greater on all measured outputs at 99% confidence (**Appendix A1**). Second, we also observe that MPO projects better perform than RPO in terms of IP production, but lead to similar results in terms of scientific output (including for top-journal publications).

	Market-pull-oriented Ph.D. (N = 171)	Research-push-oriented Ph.D. (N = 384)	SDI Ph.D. (N = 80)	Min	Max
		Mean			
VARIABLES					
<i>Control</i>					
Comp. nbr. employees	34,584.9	28,090.1	26,809.7	0.0	364,795.0
Comp. nbr. Ph.D. employees	39.1	39.0	41.7	0.0	100.0
Cand. wage	28,467.5	28,988.0	29,932.4	23,360.0	57,660.0
Cand. effective time with comp.	0.5	0.4	0.5	0.0	1.0
Cand. contractual time with comp.	0.5	0.4	0.5	0.0	1.0
<i>Dependent</i>					
Nbr. publications	2.3	2.2	2.9	0.0	20.0
Nbr. top journals publications	0.8	0.8	1.3	0.0	9.0
Nbr. patents	0.5	0.2	0.7	0.0	14.0
PERCENT					
<i>Control</i>					
Comp. R&D dpt.	88.3%	82.3%	91.3%	0%	100%
Comp. Start-up	16.4%	9.4%	8.8%	0%	100%
Comp. Paris area	38.0%	44.0%	37.5%	0%	100%
Comp. exclusive IP	18.7%	13.8%	21.3%	0%	100%
Comp. first CIFRE	7.6%	7.0%	21.3%	0%	100%
COMPMASTERED	29.8%	28.1%	28.8%	0%	100%
COMPNEW	59.6%	62.8%	63.8%	0%	100%
COMPEQUIP	10.5%	9.1%	7.5%	0%	100%
Univ. Paris area	22.8%	28.1%	31.3%	0%	100%
Univ. exp. with industry	64.9%	62.0%	56.3%	0%	100%
Univ. exclusive IP	1.8%	0.5%	0.0%	0%	100%
UNIVEQUIP	11.1%	7.8%	11.3%	0%	100%
UNIVMASTERED	28.1%	37.2%	37.5%	0%	100%
UNIVNEW	60.8%	54.9%	51.3%	0%	100%
Cand. Science-oriented	8.8%	16.9%	25.0%	0%	100%
Cand. French nation.	76.0%	79.7%	83.8%	0%	100%
Colab. new	28.7%	29.7%	31.3%	0%	100%
Colab. multi. Lab.	11.7%	15.1%	13.8%	0%	100%
Colab. conflict	36.8%	35.9%	27.5%	0%	100%
Colab. cand. research diverted	54.4%	58.6%	47.5%	0%	100%
Colab. quarter meetings	72.5%	65.6%	65.0%	0%	100%
Colab. annual meetings	97.1%	93.0%	93.8%	0%	100%
Discipline - Mathematics	4.7%	5.2%	10.0%	0%	100%
Discipline - Physics	3.5%	0.8%	2.5%	0%	100%
Discipline - Life Sciences	1.2%	1.0%	1.3%	0%	100%
Discipline - Chemistry	12.9%	16.1%	11.3%	0%	100%
Discipline - Health	5.3%	10.2%	10.0%	0%	100%
Discipline - Human sciences	13.5%	7.6%	12.5%	0%	100%
Discipline - Social sciences	0.6%	10.4%	3.8%	0%	100%
Discipline - Engineering	14.6%	25.5%	8.8%	0%	100%
Discipline - Agronomy	3.5%	4.4%	6.3%	0%	100%
Discipline - TIC	40.4%	18.8%	33.8%	0%	100%
<i>Dependent</i>					
At least 1 publication	72.5%	77.9%	86.3%	0%	100%
At least 1 top journal publication	48.5%	51.6%	63.8%	0%	100%
At least 1 patent	25.7%	11.5%	22.5%	0%	100%
At least 1 patent and 1 publication	19.3%	9.9%	21.3%	0%	100%
At least 1 patent and 1 top journal pub.	12.9%	7.6%	16.3%	0%	100%
Ph.D. Prize	15.2%	12.8%	25.0%	0%	100%

Notes: comp.: company, nbr: number, cand.: Ph.D. candidate, Univ.: University, Dpt.: department, IP: Intellectual Property, multi. lab.: more than one University laboratory involved, TIC: Technology of Information & Communication

Table 3 – Summary statistics

Nevertheless, those results are only descriptive. We need to control both the projects' characteristics (e.g. type and size of companies) and conditions of completion (e.g. conflict

occurrence, frequency of meetings) of the Collaborative Ph.D. projects as they might influence project's performances, and the three types of research orientations are dissimilar regarding control variables. For example, MPO projects are more conducted by start-up companies, universities non-Paris area-based, universities with more significant experience working with industry, candidate less science-oriented and, by a higher share of foreign Ph.D. candidate.

4.2. Estimation

4.2.1. Estimation strategy

To measure the influence of ex-ante research directions on scientific discoveries and invention, we adopt a similar estimation strategy to Goldstein and Narayanamurti (2018). Hence, we measure first the influence of research directions on the likelihood to obtain both outputs jointly, and we then analyze in more depth each scientific and innovation outputs separately. To consider the characteristics and conditions of projects' completion, we rely on a set of 25 unique control variables. We model the probability of binary output variables using both logistic regression and linear regression (**Equation 1**). Y_{ij} is the outcome of the project i ; X_i the research orientation (SDI, MPO, RPO); φ_i a vector of control including the 25 control variables, ω_j a fixed effect for the research orientation type.

$$\text{logit} \left(P(Y_{ij}) \right) = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 \varphi_i + \omega_j$$

Equation 1

Figures from logit regressions in tables are exponentiated coefficients that correspond to the odds ratio for obtaining a giving outcome (e.g. at least one top-journal publication), compared to the two other types of research orientations (except for linear regression models used for control purposes). To consider count variables (e.g. number of top-journal publications per project), we model the expected value by using negative binomial regression. In those models, exponentiated coefficients are incidence rate ratios compared to the two other types of research orientations. Due to the considerable heterogeneity in project performances per discipline (see **Appendix A2**), robust standard errors are clustered at discipline level. In the table below, we test three model specifications: a first with no control variables, a second with only control variables highly and significantly correlated to one of the project direction types, a third one with the full set of control variables.

4.2.2. Joint output performances

As Collaborative Ph.D. programs mainly claim that they favor both scientific and innovative impacts, it is interesting to begin our analysis by reviewing the probability of getting a joint output through the CIFRE program (ie. at least one scientific publication, and one patent). Descriptive statistics indicate that obtaining both a publication and a patent remains a rare event, on average roughly in one project out of ten. Nevertheless, RPO projects, on average, underperform when looking at this criteria (9.9% of the projects), while MPO and SDI projects lead to approximately similar results (20.0%).

First, estimations' results (**Table 4**) show that SDI projects have odds ratios closer to one when compared to MPO projects, and the ratios are non-statistically significant (at $p < 0.1$ level). We interpret the latter result as that MPO projects are as likely as SDI projects to generate at least one journal publication and at least one patent. Those results hold when taking into account top journal publications only.

Dependent Variable: At least 1 publication and at least 1 patent				
	(1)	(2)	(3)	(4)
Model:	Logit	Logit	Logit	Linear
SDI Ph.D.	1.128 (0.478)	1.210 (0.540)	1.167 (0.417)	0.0269 (0.0534)
Research-push-oriented Ph.D.	0.459*** (0.0687)	0.528*** (0.0942)	0.494*** (0.0922)	-0.0706** (0.0252)
Comp. nbr. employees			1.000 (0.00000283)	0.000000241 (0.000000403)
Comp. R&D dpt.		5.112** (3.697)	4.057** (2.881)	0.0828** (0.0341)
Comp. Start up		0.327*** (0.0628)	0.347*** (0.0728)	-0.0695** (0.0267)
Comp. nbr. Ph.D.			1.001 (0.00297)	0.000223 (0.000402)
Comp. Paris area			0.570** (0.134)	-0.0571 (0.0327)
Comp. excl. IP		1.953** (0.635)	1.887* (0.662)	0.101 (0.0705)
Comp. first CIFRE		0.247** (0.153)	0.287* (0.196)	-0.0663 (0.0418)
COMPMASTERED			1.089 (0.624)	0.0130 (0.0606)
COMPNEW			0.985 (0.628)	-0.00481 (0.0648)
Univ. Paris area			1.489 (0.455)	0.0387 (0.0438)
Univ. exp. with indus.			1.171 (0.391)	0.0196 (0.0338)
Univ. excl. IP		3.158 (3.361)	3.207 (3.033)	0.116 (0.142)
UNIVNEW			0.997 (0.264)	-0.00302 (0.0264)
UNIVMASTERED		1.055 (0.268)	0.974 (0.332)	0.00356 (0.0358)
Ph.D. Science oriented		0.489* (0.211)	0.487 (0.215)	-0.0540 (0.0331)
Ph.D. French nationality			0.562* (0.189)	-0.0594** (0.0263)
Ph.D. wage			1.000 (0.0000326)	0.00000355 (0.00000332)
Ph.D. contractual time with comp.		2.985 (2.682)	3.241 (3.273)	0.123 (0.0879)
Ph.D. effective time with comp.		1.624 (0.915)	1.337 (0.771)	0.0397 (0.0641)
Ph.D. diverted from research		1.103 (0.300)	1.299 (0.447)	0.0293 (0.0284)
Colab. multi. lab.			1.207 (0.353)	0.0146 (0.0329)
Colab. conflict			0.798 (0.191)	-0.0236 (0.0201)
Colab. new			0.548** (0.165)	-0.0489* (0.0256)
Colab. quarter meetings		1.318 (0.506)	1.144 (0.417)	0.0142 (0.0342)
Colab. annual meetings		0.627 (0.383)	0.457 (0.296)	-0.0442 (0.0538)
Constant				0.00134 (0.188)
Observations	635	635	635	635
(Pseudo) R ²	0.025	0.129	0.155	0.115

Notes: Robust standard errors in parentheses, clustered by discipline. Results are exponentiated coefficients (odds ratios). Base project type is MPO, COMPEQUIP, UNIVEQUIP.

* p<0.1. ** p<0.05. *** p<0.01.

Table 4 – Joint output in CIFRE Ph.D. collaborative projects

Regression analysis also show that RPO projects are less likely to generate at least one journal publication and one patent than MPO projects (**Table 4**). Hence, the odds ratios are significantly lower than 0, which matches the linear model's sign. The latter OLS model indicates that RPO projects have a 7.1% lower probability of generating both outputs compared to MPO projects. Again, those results hold when considering top journal publications only (see **Appendix A3**).

Therefore, we reject **Hypothesis H3** as MPO projects are as likely as SDI ones to lead to joint outputs, and the latter research orientation is not strictly over performing other project types when considering this criteria. As we only take into account the likelihood to obtain at least both output, we need to analyze in more depth each type of output separately.

4.2.3. Scientific performances

One of the key goals is to review the performances in terms of scientific outputs of Collaborative Ph.D. projects according to their research orientation. In particular, many projects ended up with at least one publication at completion (77.5%). However, SDI projects are more likely to produce at least one scientific publication, and the number of publications per project is higher than for other strategies (2.9 vs. 2.2). Those differences are still at play when focusing on top-journal publications only (1.3 vs. 1.8) or Ph.D. prize. The difference in terms of scientific performances between MPO and RPO projects appear limited in the descriptive statistics.

Regression analyses confirm those results. SDI projects are more likely to generate at least one publication than other projects at the highest confidence level (**Table 5**). Hence, the odds ratio of producing at least one publication for SDI projects is strictly superior to one with all model specifications. In those projects, Ph.D. candidates also tend to publish more scientific papers than for any other research direction, as shown in the Negative Binomial estimations. Those results also hold for top-journal publications, with even a greater and more significant effect on the number of published papers (see **Appendix A4**). As a robustness check, we also used as a dependent variable the probability of the Ph.D. student to receive an award at project completion. We found similar results than for publications (see **Appendix A5**).

Dependent Variable: At least 1 publication, number of journal publications						
Model:	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Logit	Logit	Logit	Negative Binomial	Negative Binomial	Negative Binomial
SDI Ph.D.	2.768***	2.378***	3.368***	1.294*	1.316**	1.381**
	(0.842)	(0.771)	(0.982)	(0.178)	(0.160)	(0.182)
Research-push-oriented Ph.D.	1.644*	1.333	1.807**	0.970	1.014	1.013
	(0.438)	(0.376)	(0.505)	(0.197)	(0.200)	(0.196)
Comp. nbr. employees			1.000**			1.000*
			(0.00000243)			(0.00000046)
Comp. R&D dpt.	1.838		1.788		1.225	1.194
	(0.877)		(0.707)		(0.266)	(0.213)
Comp. Start up	0.775		0.884		0.844	0.910
	(0.250)		(0.343)		(0.128)	(0.153)
Comp. nbr. Ph.D.			1.001			0.999
			(0.00296)			(0.00118)
Comp. Paris area			1.087			1.207
			(0.448)			(0.197)
Comp. excl. IP	1.750		1.661		1.024	0.948
	(0.602)		(0.612)		(0.110)	(0.0979)
Comp. first CIFRE	0.422*		0.491		0.623**	0.671*
	(0.219)		(0.239)		(0.128)	(0.138)
COMPMASTERED			1.433			1.227
			(0.622)			(0.170)
COMPNEW			1.277			1.139
			(0.278)			(0.151)
Univ. Paris area			0.827			0.996
			(0.219)			(0.102)
Univ. exp. with indus.			1.610***			1.261**
			(0.255)			(0.147)
Univ. excl. IP	0.767		0.601		0.532**	0.479**
	(0.664)		(0.564)		(0.142)	(0.142)
UNIVNEW			1.152			0.906
			(0.408)			(0.168)
UNIVMASTERED	0.936		1.019		0.895*	0.798
	(0.268)		(0.248)		(0.0550)	(0.121)
Ph.D. Science oriented	1.094		1.098		1.226**	1.199**
	(0.255)		(0.276)		(0.0994)	(0.0962)
Ph.D. French nationality			0.712			0.781***
			(0.232)			(0.0591)
Ph.D. wage			1.000*			1.000
			(0.0000290)			(0.00000956)
Ph.D. contractual time with comp.	3.320**		3.669***		1.327	1.262
	(1.639)		(1.450)		(0.306)	(0.251)
Ph.D. effective time with comp.	1.194		1.173		1.260	1.213
	(0.481)		(0.528)		(0.178)	(0.178)
Ph.D. diverted from research	0.679**		0.678**		0.981	1.033
	(0.113)		(0.117)		(0.0760)	(0.0882)
Colab. multi. lab.			0.932			0.960
			(0.188)			(0.0832)
Colab. conflict			0.693*			0.829***
			(0.146)			(0.0533)
Colab. new			1.331			0.988
			(0.507)			(0.135)
Colab. quarter meetings	1.636*		1.614**		1.093	1.056
	(0.415)		(0.378)		(0.131)	(0.109)
Colab. annual meetings	1.161		0.964		1.239	1.121
	(0.629)		(0.467)		(0.213)	(0.191)
Observations	635	635	635	635	635	635
(Pseudo) R2	0.071	0.009	0.103	0.003	0.018	0.031

Notes: Robust standard errors in parentheses, clustered by discipline. Results are exponentiated coefficients (odds ratios, incidence rate ratios). Base project type is MPO, COMPEQUIP, UNIVEQUIP.

* p<0.1. ** p<0.05. *** p<0.01.

Table 5 – Scientific publication output in CIFRE Ph.D. collaborative projects

On the opposite, the comparison between RPO and MPO projects is less straightforward. When focusing on all scientific publications only, RPO projects seem to be more likely to generate at least one publication than MPO ones, but with a low level of statistical significance, and the result does not hold for top-journal publications nor the probability to obtain a Prize at project completion. Indeed, the odds are roughly equal to one and are non-statistically significant (at $p < 0.1$) for both top journal publications and awards. When focusing on the number of published papers, performances between both types of projects' directions are similar as the odds ratios are also roughly equal to 1, and the difference is non-statistically significant, with similar results for top-journal publications. Hence, we reject **Hypothesis H1** as MPO projects have overall similar scientific performances than RPO ones.

4.2.4. Patenting performances

In this section, we review the performances in terms of filed patents by the company in relation to the Collaborative Ph.D. projects, depending on the research directions. We adopt a similar approach to scientific outputs.

First, descriptive statistics show that, on average, filling a patent during a RPO project is a rare event. The company file at least one patent in only one project out of ten, a much lower number than for other projects' orientations. Estimations confirm this result (**Table 6**). Both odds ratios and incidence rate ratios are significantly lower than zero when considering both the probability of filing at least one patent or even the number of filed patents, at the highest level of significance.

Dependent Variable: At least 1 patent, number of patents						
Model:	(1) Logit	(2) Logit	(3) Logit	(4) Negative Binomial	(5) Negative Binomial	(6) Negative Binomial
SDI Ph.D.	0.838 (0.367)	0.994 (0.426)	0.977 (0.365)	1.555 (0.652)	1.773 (0.803)	1.736* (0.523)
Research-push-oriented Ph.D.	0.374*** (0.0588)	0.442*** (0.0746)	0.426*** (0.0732)	0.474*** (0.0671)	0.581*** (0.0993)	0.541*** (0.0844)
Comp. nbr. employees			1.000 (0.00000305)			1.000 (0.00000195)
Comp. R&D dpt.		4.556** (3.357)	3.443 (2.614)		4.194** (2.793)	3.233** (1.533)
Comp. Start up		0.689 (0.254)	0.759 (0.301)		0.701 (0.238)	0.911 (0.323)
Comp. nbr. Ph.D.			1.002 (0.00271)			1.002 (0.00282)
Comp. Paris area			0.632** (0.113)			0.575*** (0.115)
Comp. excl. IP		1.831** (0.482)	1.754** (0.495)		1.634** (0.347)	1.499 (0.397)
Comp. first CIFRE		0.268** (0.147)	0.323* (0.206)		0.436 (0.238)	0.587 (0.314)
COMPMASTERED			0.688 (0.279)			0.490*** (0.118)
COMPNEW			0.692 (0.324)			0.424** (0.175)
Univ. Paris area			1.304 (0.337)			1.233 (0.310)
Univ. exp. with indus.			1.275 (0.500)			2.012** (0.707)
Univ. excl. IP		6.342** (5.586)	5.661** (3.818)		3.041** (1.664)	1.186 (0.503)
UNIVNEW			0.885 (0.271)			0.876 (0.263)
UNIVMASTERED		1.005 (0.239)	0.852 (0.280)		0.839 (0.204)	0.689 (0.190)
Ph.D. Science oriented		0.376** (0.160)	0.376** (0.159)		0.437** (0.171)	0.478** (0.139)
Ph.D. French nationality			0.551*** (0.120)			0.605** (0.120)
Ph.D. wage			1.000 (0.0000296)			1.000* (0.0000370)
Ph.D. contractual time with comp.		1.521 (1.160)	1.543 (1.294)		1.230 (0.698)	1.605 (1.031)
Ph.D. effective time with comp.		1.692 (1.128)	1.530 (1.025)		3.827** (2.440)	2.727* (1.577)
Ph.D. diverted from research		1.089 (0.257)	1.251 (0.352)		0.996 (0.240)	1.059 (0.295)
Colab. multi. lab.			0.813 (0.264)			1.089 (0.394)
Colab. conflict			0.878 (0.195)			0.933 (0.184)
Colab. new			0.616** (0.139)			0.690** (0.119)
Colab. quarter meetings		1.270 (0.395)	1.099 (0.336)		1.244 (0.228)	1.036 (0.190)
Colab. annual meetings		0.889 (0.614)	0.733 (0.529)		1.237 (0.760)	1.001 (0.415)
Observations	635	635	635	635	635	635
(Pseudo) R2	0.033	0.115	0.141	0.019	0.075	0.106

Notes: Robust standard errors in parentheses, clustered by discipline. Results are exponentiated coefficients (odds ratios, incidence rate ratios). Base project type is MPO, COMPEQUIP, UNIVEQUIP.

* p<0.1. ** p<0.05. *** p<0.01.

Table 6 – Patent output in CIFRE Ph.D. collaborative projects

In comparison, descriptive statistics showed that, on average, SDI and MPO projects lead roughly to a similar number of filed patents: around one project out of four filed at least one patent. Results from estimation showed that SDI projects have roughly the same odds of generating at least one patent as the MPO projects, and results are not statistically significant. Furthermore, we showed that SDI projects tend to generate more patents on average than the others type of projects according to the incidence rate ratios. However, results are only statistically significant at $p < 0.05$ level. Hence, we accept **Hypothesis H2** as MPO projects are likely to lead to higher patenting performances than RPO ones.

5. Discussion

In this paper, we review how university-industry research projects' scientific and commercialization performances are contingent on their initial research orientation (MPO, RPO, or SDI) in the context of the CIFRE Collaborative Ph.D. program in France. We claim that research orientation is a crucial variable, highly significant to determine a project's performances despite a large control variables' set. First, our analysis confirms the straightforward hypothesis that when a university-industry research project has an orientation towards industry needs, it develops more IP than projects oriented towards research push objectives. However, orientation towards industry needs leads to similar scientific performances as in projects oriented towards scientific discovery. Third, while projects with an orientation towards simultaneous discovery-invention were claimed to be more performant than others, we show that in the CIFRE program context, they record higher scientific performances but similar commercialization performances than projects oriented towards industry needs. As a result, similar performances between those two research orientations are observed in terms of the likelihood to generate joint-output.

Our findings contribute to the literature on academic engagement in two main ways. First, while engagement with the industry is considered important in various disciplines, contexts, and geographies, there was very little evidence on engagement at the Ph.D. training stage. Indeed, senior scientists were considered to be more prone to engage as they are able to share expertise that had been cumulated after years of research (e.g. Levin & Stephan, 1991; Schuelke-Leech, 2013). Hence, in the context of the CIFRE program, we showed that some Ph.D. students might be very successful in producing novel scientific knowledge, with potential for commercialization through academic engagement. While it is now clearly established that there is a positive relationship between academic engagement and scientific productivity (see

Perkmann et al., 2021, 2013), and because engagement is engendered by previous engagement, early positive exposure to the industry can be considered as promising for those (future) academics and open rooms for further studies. In particular, reviewing how the particular set of those types of collaboration could favor transfer of specific competencies from the Ph.D. supervisor to the Ph.D. students regarding how to scientifically manage those collaborations could be of interest. Second, our results complement those from Callaert et al. (2015) who showed that the scientific performance of scientists engaged with industry was contingent on the scientists strategies. Furthermore, while Goldstein and Narayanamurti (2018) showed that SDI research orientation was very effective in the US Department of Energy's particular institutional context, we extend those results by showing its effectivity into a broader range of university-industry projects. We hope that our contribution will encourage others to investigate this understudied area, in other geographical or institutional contexts or through qualitative studies.

Our paper also contributed to review the performances of MPO projects from a broader university-industry collaboration perspectives. Those projects are often viewed as a risky strategy for the global scientific ecosystem as applied research is often not considered as fruitful as basic research (e.g. Toole & Czarnitzki, 2010). But our results strengthen theoretical views that focusing on a company's product, process, or service as a starting point of the research activity can leverage access to original knowledge components that could be combined with more traditional research elements to favor breakthrough discoveries (Fleming et Sorenson, 2004). Learning from the industry is mainly the primary motivation of academic engagement (D'Este et Perkmann, 2011 ; Lee, 2000 ; Siegel, Waldman et Link, 2003a) and focusing on companies' products, processes or services can conduct the company to be more involved in the research and then favor a significant labor division with academics (Bikard, Vakili et Teodoridis, 2019). Further studies may focus on disentangling those effects and exploring why MPO projects lead to such scientific outcomes.

Our findings also contributed to the literature on Ph.D. students' training. Indeed, we extend Buenstorf and Heinisch (2020) finding that the early access to Ph.D. research can be of importance for firms. Indeed, companies involved in Collaborative Ph.D. projects, and particularly, when relying on SDI or MPO research directions, can file patents directly related to the project. As some projects led to joint-output, it may favor inventions based on cutting edge research. Our contribution also echoes Butcher & Jeffrey (2007) as results obtained from the analysis of the control variables call for additional research on how to favor interactions

with start-up companies in Collaborative Ph.D. projects without harming the Ph.D. student scientific productivity.

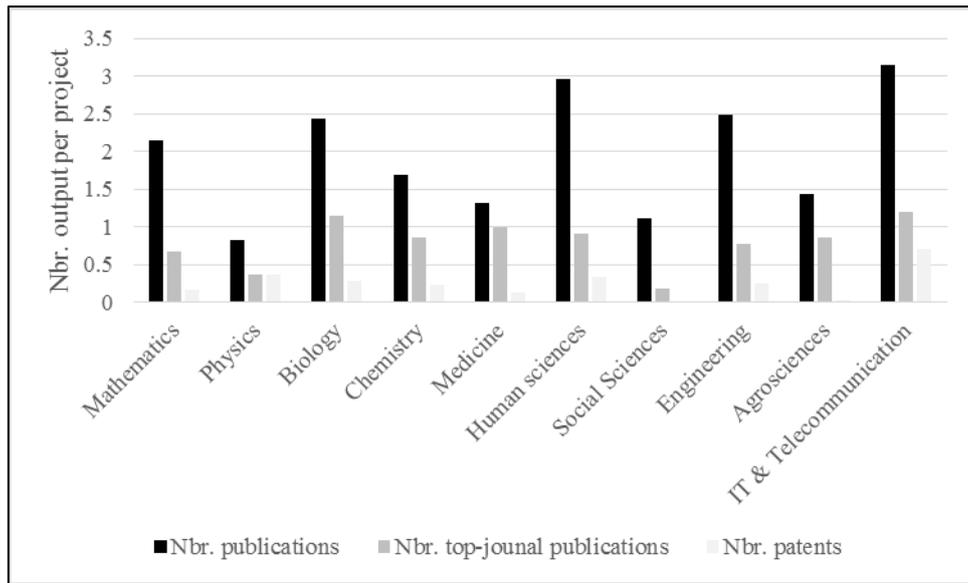
Finally, our study is subjected to some limitations. First, it relies on a specific Collaborative Ph.D. program, involving a company's financial subsidy for the research, and an in-depth review of the project's content that ensures a certain level of selectiveness, a variable associated with more significant research performances (Callaert *et al.*, 2015). Studying other Collaborative Ph.D. programs, which do not imply such a level of research commitment, would be of interest. Furthermore, some Ph.D. students might be engaged with the industry without being involved in such a program and it would be interesting to compare their scientific and inventive outputs. Second, our approach to compute strategy is based on a careful, at least double-blinded analysis following criteria that we set for the study. Further research may be conducted to define more fine-grained strategies at play in such university-industry collaborations. Third, data regarding performances were self-reported, and are based on a limited proxy of scientific and inventive contributions: patents and scientific publications (e.g. Jaffe & de Rassenfosse, 2010). Additional studies can be conducted to review how new scientific knowledge was absorbed by the company and how a given Collaborative Ph.D. project contribute to the company's innovation process. Fourth, while we control (based on the survey), on whether or not the company or the university was already involved in the CIFRE program, we were not able to control for the complete picture regarding to what extent their innovation process relies on the CIFRE program. Indeed, companies more largely involved may adopt a portfolio approach with projects covering the three types of strategies.

6. Appendix

	SDI projects average	Non SDI projects average	t-test 99% confidence interval.
Nbr. publications	2.91	2.21	2.42**
Nbr. top journals publications	1.29	0.83	2.67***
Nbr. patents	0.70	0.29	1.70*
Ph.D. Prize	0.25	0.14	2.26**

Legend: * p<0.1. ** p<0.05. *** p<0.01.

Appendix A1 – t-test analysis with unequal variance



Appendix A2 – Output performances per discipline

Dependent Variable: At least 1 top journal publication and at least 1 patent				
	(1)	(2)	(3)	(4)
Model:	Logit	Logit	Logit	Linear
SDI Ph.D.	1.314	1.530	1.461	0.0434
	(0.691)	(0.808)	(0.748)	(0.0604)
Research-push-oriented Ph.D.	0.553***	0.652***	0.611***	-0.0356**
	(0.0875)	(0.0777)	(0.0997)	(0.0127)
Comp. nbr. employees			1.000	-1.69e-08
			(0.00000410)	(0.000000381)
Comp. R&D dpt.		3.456*	2.680	0.0472*
		(2.240)	(1.688)	(0.0237)
Comp. Start up		0.534***	0.515***	-0.0342**
		(0.0783)	(0.121)	(0.0141)
Comp. nbr. Ph.D.			1.001	0.000179
			(0.00354)	(0.000387)
Comp. Paris area			0.458***	-0.0653*
			(0.109)	(0.0321)
Comp. excl. IP		1.580	1.564	0.0568
		(0.453)	(0.545)	(0.0527)
Comp. first CIFRE		0.156***	0.191***	-0.0628*
		(0.105)	(0.120)	(0.0281)
COMPMASTERED			1.103	0.0107
			(0.585)	(0.0451)
COMPNEW			0.850	-0.0164
			(0.529)	(0.0501)
Univ. Paris area			1.856**	0.0517
			(0.506)	(0.0385)
Univ. exp. with indus.			1.333	0.0240
			(0.475)	(0.0264)
Univ. excl. IP		4.903	4.149	0.138
		(5.963)	(4.852)	(0.166)
UNIVNEW			0.810	-0.0183
			(0.256)	(0.0349)
UNIVMASTERED		1.052	0.795	-0.0114
		(0.265)	(0.212)	(0.0269)
Ph.D. Science oriented		0.470	0.457	-0.0472
		(0.219)	(0.226)	(0.0296)
Ph.D. French nationality			0.524**	-0.0576***
			(0.159)	(0.0151)
Ph.D. wage			1.000*	0.00000345*
			(0.0000249)	(0.00000160)
Ph.D. contractual time with comp.		1.882	2.177	0.0585
		(2.106)	(2.645)	(0.0883)
Ph.D. effective time with comp.		1.749	1.430	0.0425
		(1.776)	(1.480)	(0.0918)
Ph.D. diverted from research		1.064	1.247	0.0195
		(0.482)	(0.674)	(0.0364)
Colab. multi. lab.			1.146	0.00751
			(0.209)	(0.0115)
Colab. conflict			0.759	-0.0243
			(0.275)	(0.0261)
Colab. new			0.505**	-0.0464*
			(0.139)	(0.0209)
Colab. quarter meetings		1.456	1.248	0.0161
		(0.552)	(0.491)	(0.0260)
Colab. annual meetings		0.638	0.455	-0.0379
		(0.554)	(0.437)	(0.0582)
Constant				0.0299
				(0.122)
Observations	635	635	635	635
(Pseudo) R ²	0.017	0.091	0.134	0.081

Notes: Robust standard errors in parentheses, clustered by discipline. Results are exponentiated coefficients (odds ratios). Base project type is MPO, COMPEQUIP, UNIVEQUIP.

* p<0.1. ** p<0.05. *** p<0.01.

Appendix A3 – Joint output with top-journal publications only

Dependent Variable: At least 1 top journal publication, number of top journal publications						
Model:	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Logit	Logit	Logit	Negative Binomial	Negative Binomial	Negative Binomial
SDI Ph.D.	1.865***	1.826***	1.984***	1.643***	1.623***	1.652***
	(0.361)	(0.313)	(0.414)	(0.154)	(0.191)	(0.204)
Research-push-oriented Ph.D.	1.129	1.131	1.192	1.080	1.109	1.125
	(0.260)	(0.238)	(0.271)	(0.153)	(0.146)	(0.160)
Comp. nbr. employees			1.000			1.000
			(0.00000118)			(0.00000049)
Comp. R&D dpt.		1.976**	2.158**		1.551*	1.526**
		(0.652)	(0.690)		(0.377)	(0.280)
Comp. Start up		0.660	0.629		0.839	0.851
		(0.272)	(0.300)		(0.186)	(0.192)
Comp. nbr. Ph.D.			0.999			1.000
			(0.00215)			(0.000946)
Comp. Paris area			1.015			1.017
			(0.250)			(0.149)
Comp. excl. IP		1.101	1.065		1.128	1.091
		(0.231)	(0.275)		(0.138)	(0.123)
Comp. first CIFRE		0.522**	0.523***		0.628*	0.674
		(0.151)	(0.125)		(0.167)	(0.176)
COMPMASTERED			1.438**			1.413***
			(0.245)			(0.188)
COMPNEW			1.241***			1.253**
			(0.104)			(0.117)
Univ. Paris area			1.074			1.103
			(0.284)			(0.144)
Univ. exp. with indus.			1.312			1.257**
			(0.225)			(0.134)
Univ. excl. IP		0.682	0.499		0.542*	0.475
		(0.427)	(0.417)		(0.198)	(0.237)
UNIVNEW			0.574***			0.724**
			(0.121)			(0.0991)
UNIVMASTERED		1.162	0.713		0.983	0.741***
		(0.280)	(0.174)		(0.122)	(0.0453)
Ph.D. Science oriented		1.707***	1.649**		1.378***	1.310***
		(0.333)	(0.341)		(0.135)	(0.109)
Ph.D. French nationality			0.678			0.758***
			(0.194)			(0.0680)
Ph.D. wage			1.000			1.000**
			(0.0000245)			(0.00000921)
Ph.D. contractual time with comp.		1.069	1.008		0.986	0.957
		(0.570)	(0.470)		(0.396)	(0.355)
Ph.D. effective time with comp.		1.023	1.098		1.240*	1.259*
		(0.318)	(0.273)		(0.161)	(0.172)
Ph.D. diverted from research		0.841	0.855		0.906	0.949
		(0.196)	(0.206)		(0.118)	(0.110)
Colab. multi. lab.			0.913			0.936
			(0.266)			(0.152)
Colab. conflict			0.717**			0.736***
			(0.100)			(0.0444)
Colab. new			1.094			0.964
			(0.311)			(0.156)
Colab. quarter meetings		1.296*	1.316		1.081	1.062
		(0.186)	(0.248)		(0.111)	(0.149)
Colab. annual meetings		1.497	1.389		1.443	1.309
		(0.732)	(0.719)		(0.407)	(0.365)
Observations	635	635	635	635	635	635
(Pseudo) R2	0.006	0.043	0.064	0.006	0.025	0.044

Notes: Robust standard errors in parentheses, clustered by discipline. Results are exponentiated coefficients (odds ratios, incidence rate ratios). Base project type is MPO, COMPEQUIP, UNIVEQUIP.

* p<0.1. ** p<0.05. *** p<0.01.

Appendix A4 – Scientific publication in top-journal in CIFRE Ph.D. collaborative projects

Dependent Variable: at least a Ph.D. Prize				
	(1)	(2)	(3)	(4)
Model:	Logit	Logit	Logit	Linear
SDI Ph.D.	1.859***	1.916***	2.298***	0.107**
	(0.402)	(0.433)	(0.608)	(0.0413)
Research-push-oriented Ph.D.	0.816	0.774	0.811	-0.0238
	(0.192)	(0.191)	(0.206)	(0.0277)
Comp. nbr. employees			1.000**	0.000000687*
			(0.00000245)	(0.000000349)
Comp. R&D dpt.		0.524**	0.455**	-0.0952
		(0.168)	(0.157)	(0.0530)
Comp. Start up		1.085	1.334	0.0428
		(0.508)	(0.617)	(0.0664)
Comp. nbr. Ph.D.			1.004	0.000397
			(0.00365)	(0.000409)
Comp. Paris area			0.714	-0.0378
			(0.160)	(0.0289)
Comp. excl. IP		0.871	0.674	-0.0437
		(0.207)	(0.190)	(0.0342)
Comp. first CIFRE		2.022***	2.653***	0.112***
		(0.458)	(0.492)	(0.0258)
COMPMASTERED			0.487**	-0.0734
			(0.177)	(0.0420)
COMPNEW			0.757	-0.0207
			(0.384)	(0.0582)
Univ. Paris area			2.772**	0.124
			(1.412)	(0.0696)
Univ. exp. with indus.			1.832***	0.0609**
			(0.239)	(0.0190)
Univ. excl. IP		1	1	-0.173*
		(.)	(.)	(0.0942)
UNIVNEW			1.142	0.00876
			(0.338)	(0.0291)
UNIVMASTERED		1.186	1.261	0.0194
		(0.213)	(0.367)	(0.0294)
Ph.D. Science oriented		0.585	0.531*	-0.0586
		(0.240)	(0.196)	(0.0337)
Ph.D. French nationality			0.579***	-0.0622*
			(0.118)	(0.0297)
Ph.D. wage			1.000	-0.00000190
			(0.0000229)	(0.00000275)
Ph.D. contractual time with comp.		0.880	0.916	-0.0126
		(0.546)	(0.519)	(0.0743)
Ph.D. effective time with comp.		0.912	1.072	0.0111
		(0.373)	(0.524)	(0.0602)
Ph.D. diverted from research		1.441	1.668	0.0547
		(0.520)	(0.552)	(0.0408)
Colab. multi. lab.			1.513*	0.0454
			(0.340)	(0.0300)
Colab. conflict			1.029	0.000665
			(0.264)	(0.0294)
Colab. new			1.720*	0.0615
			(0.512)	(0.0365)
Colab. quarter meetings		1.163	1.186	0.0187
		(0.411)	(0.475)	(0.0421)
Colab. annual meetings		1.616	1.809	0.0455
		(0.928)	(1.002)	(0.0571)
Constant				0.159
				(0.106)
Observations	635	630	630	635
Pseudo R2	0.013	0.039	0.101	0.083

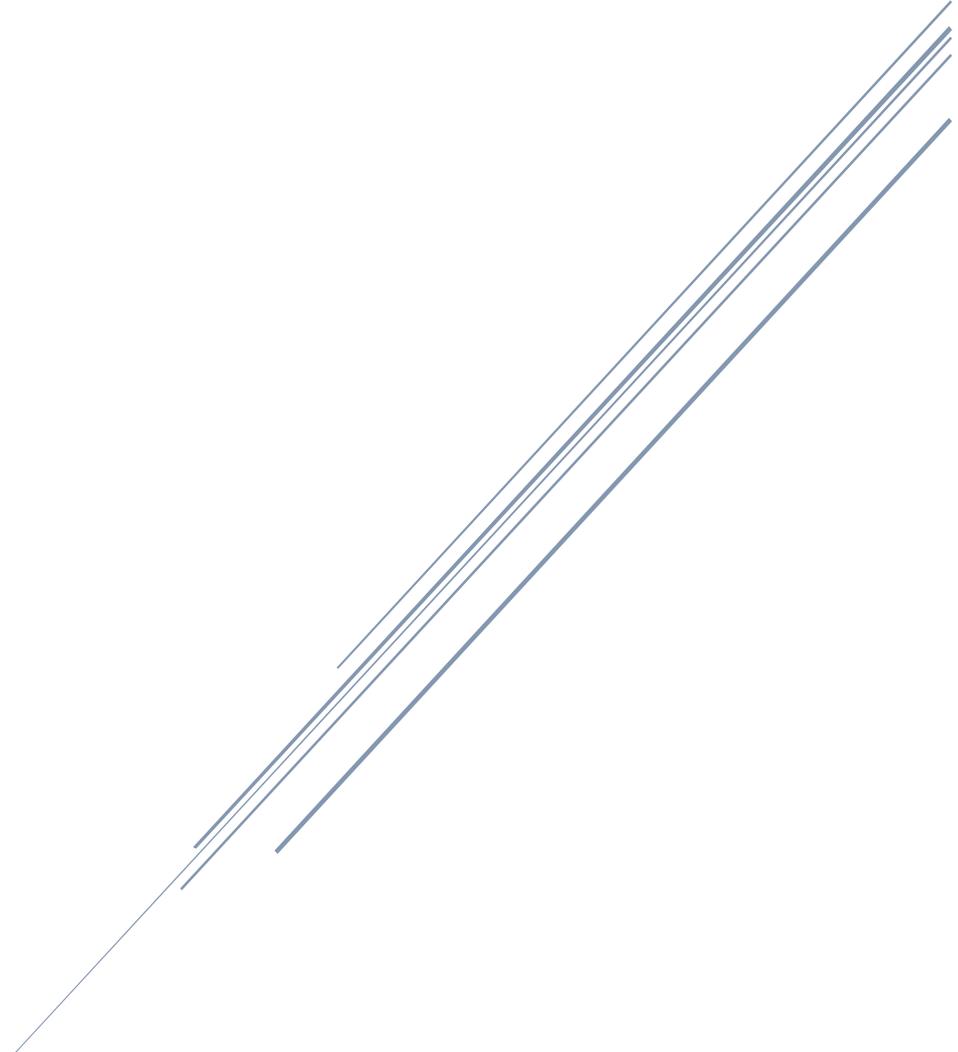
Notes: Robust standard errors in parentheses, clustered by discipline. Results are exponentiated coefficients (odds ratios). Base project type is MPO, COMPEQUIP, UNIVEQUIP.

* p<0.1. ** p<0.05. *** p<0.01.

Appendix A5 – CIFRE Ph.D. collaborative projects that received an Award

ESSAI N°3

Impact of knowledge search practices on the originality of inventions: a study in the oil & gas industry through dynamic patent analysis



Thème	Détail
Auteurs	• Quentin Plantec, Pascal Le Masson, Benoît Weil
Présentations conférences	• V1 : Conférence <i>Academy of Management 2020</i> , Vancouver ed. (en ligne)
Soumission	• <i>Technological Forecasting & Social Change</i> (en cours de révision)
Langue	• Anglais

IMPACT OF KNOWLEDGE SEARCH PRACTICES ON THE ORIGINALITY OF INVENTIONS: A STUDY IN THE OIL & GAS INDUSTRY THROUGH DYNAMIC PATENT ANALYSIS

Quentin PLANTEC, Pascal LE MASSON & Benoit WEIL

ABSTRACT: The paper suggests a new taxonomy of knowledge search modes to describe the creative process of new invention design, in particular how firms combine knowledge components from their own knowledge base—taking into account both the components and the structures of knowledge bases—with those from newly acquired or newly internally developed. Using network theory techniques, we defined four knowledge search modes: (1) refinement, (2) clustering, (3) absorption and (4) recomposition. We conducted an exploratory study on the oil & gas industry, reviewing 50,776 utility patents filed by 16 major firms between 1989 and 2016. The results showed, first, that firms relied to varying extents on different knowledge search modes in their invention design processes. Second, reviewing the technological originality of the designed inventions showed that simply absorbing new knowledge components, without major changes in knowledge base structure, was associated with low technological originality, but constituted one of the main knowledge search modes used by the analyzed firms. In contrast, major changes in knowledge base structure favored technological originality, with or without new knowledge components, but were nevertheless the least used mode. Understanding organizational learning practices associated with the phenomena described here can foster innovation performance in firms.

KEYWORDS: Knowledge search, patent analytics, oil & gas industry, technological originality, knowledge base

ACKNOWLEDGMENT: We would like to thanks B. Cabanes (MINES ParisTech – PSL University), C. Sternberger (INPI), N. Sennequier (INPI), F. Caillaud (WIPO), C. Vahlibay (MINES ParisTech—PSL University), M. Wustmans (Bonn University), M. Chebre, J. Luo (IDC), S. Sarica (IDC) and the participants of the Academy of Management Conference 2020 and the Data & Algorithms for Science, Technology and Innovation Studies Conference 2019 organized by EPO and KU Leuven for their useful insights in relation to this research project.

To cite: Plantec, Q., Le Masson, P., Weil, B. (2021) ‘Impact of knowledge search practices on the originality of inventions: A study in the oil & gas industry through dynamic patent analysis’, in *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 168, July 2021, 120782. DOI: 10.1016/j.techfore.2021.120782

IMPACT OF KNOWLEDGE SEARCH PRACTICES ON THE ORIGINALITY OF INVENTIONS: A STUDY IN THE OIL & GAS INDUSTRY THROUGH DYNAMIC PATENT ANALYSIS

1. Introduction

Technological novelty is an important driver of innovation (Arthur, 2007 ; Fleming et Sorenson, 2004), which is presumed to have a large impact on organization competitiveness and market position (Cooper et Schendel, 1976 ; Henderson et Clark, 1990). However, innovation is a complex process with high uncertainty across different stages, from the front end to the launch of the newly developed product and its subsequent social adoption and market diffusion (Fleming, 2001). There is a crucial need to better understand a particular part of the latter process: the knowledge search supporting the design of new inventions (Arts et Fleming, 2018). In particular, a firm-level analysis must be conducted for this knowledge search process because inventors of firms are embedded in particular knowledge networks and have distinct design capabilities (Ahuja et Lampert, 2001 ; Nooteboom *et al.*, 2007).

Various streams of research on innovation have highlighted the importance of knowledge search activities (e.g., Chesbrough, 2003; Cohen and Levinthal, 1990; Hatchuel and Weil, 2003; Nelson and Winter, 1982; Nonaka, 1994). We rely here on the literature on recombinant innovation (Ahuja et Lampert, 2001 ; Fleming, 2001 ; Fleming et Sorenson, 2001 ; Rosenkopf et Nerkar, 2001): knowledge search activities aimed at selecting and combining knowledge components to design new inventions. As described by March (1991), firms combine knowledge components through an exploitative approach based on the firm's current knowledge and associated close opportunities (i.e., local search) and/or through an explorative approach based on new and distant possibilities (i.e., distant search). The set of knowledge components mastered by the firm is part of its knowledge base (Grant, 1996), **and these components are** referred to as **knowledge base components** here. The knowledge of the firm is embedded in its combinative capabilities because knowledge combination is involved in a recombinant innovation perspective as well (Kogut et Zander, 1992). Hence, the knowledge base has a particular structure; that is, different couplings exist among all knowledge components mastered by the firm based on the ability of the firm to combine them (Le Masson, Weil et Hatchuel, 2010b ; Yayavaram et Ahuja, 2008).

To what extent(s) firms need to rely on different combinations of newly sourced or already mastered knowledge components to support the design of original inventions is a key question for both innovation management and the analysis of technological dynamics. To help further the understanding of this issue, scholars have analyzed knowledge search practices from the perspective of the global technological landscape, exploring to what extent inventors were combining already known or new knowledge components and what the effects were of those practices on the value of the designed inventions (Arts et Fleming, 2018 ; Fleming, 2001 ; Lobo et Strumsky, 2019 ; Strumsky et Lobo, 2015 ; Verhoeven, Bakker et Veugelers, 2016). Since the 1990s, inventors have apparently been extensively relying on the refinement of the existing combinations of known knowledge (Strumsky et Lobo, 2015), while at the same time relying on very new knowledge have been associated with a higher probability of achieving a breakthrough invention (Arts et Fleming, 2018 ; Fleming, 2001), in particular when based on new scientific knowledge (Choi, Shin et Hwang, 2018 ; Verhoeven, Bakker et Veugelers, 2016). In addition, a few scholars have successfully reviewed the role of changes in a firm's knowledge base following knowledge search activities (integration of new components and/or new combinations) on the firm's innovation performances (Yayavaram et Ahuja, 2008 ; Yayavaram et Chen, 2015). They have shown that changes in the combinations between existing knowledge components of firms hurt innovation performance, while new combinations between new and established knowledge components favor innovation performance.

Our present contribution aims to investigate the plurality of knowledge search practices undertake by firms and their impacts on the technological originality of designed inventions by taking into account the firm's knowledge base (components and structures). Technological originality is marked by the significant difference between combinations of underlying knowledge components embedded in a particular invention and the predominant design. In that sense, we aim at bridging the literature on firms' knowledge base and that on inventors' knowledge search practices. Indeed, our approach acknowledges that inventors are embedded in firms that support their innovation efforts through distinctive innovation capabilities, team management practices, and exploration practices (Lawson et Samson, 2001 ; Le Masson, Weil et Hatchuel, 2010a). The combination of knowledge components examined by an inventor of the firm to design an invention is associated with the firm's knowledge base.

Hence, to help understand firms' innovation dynamics, this research's key objectives are the following. First, to provide a taxonomy of different knowledge search modes used by firms by considering firms' knowledge base structure and the potential acquisition of external

knowledge. Second, in a given industry (i.e., oil & gas), to operationalize the latter taxonomy to explore firms' practices related to knowledge search. Third, to explore how relying on a particular knowledge search mode favors technological originality. Therefore, we develop a taxonomy of four knowledge search modes that are used to support the design of novel inventions depending on the firm's knowledge base structure: (1) refinement, (2) clustering, (3) absorption, and (4) recomposition. Our taxonomy was implemented through an exploratory study of 16 major oil & gas firms involving a review of their patent portfolios between 1989 and 2016, comprising 50,776 utility patent applications. We show that, first, the knowledge search modes adopted by firms vary among time and across the firms in the sample. Second, however, refinement was the most used knowledge search mode in the oil & gas industry, but led to inventions with low technological originality. Third, the absorption mode, the second-most used, which focuses on the integration of new knowledge components without major changes in the firm's previous knowledge base structure, scored poorly in terms of technological originality. In contrast, the recomposition knowledge search mode, a design process that generates major changes in firms' knowledge base structure (with or without integration of new knowledge components), conduces to highly original inventions, but was nevertheless the least adopted among the analyzed firms, indicating a major organizational learning challenge. Fourth, firms somewhat rely on a clustering mode as its technological originality score is better than that of the absorption mode. Finally, the research opens up promising new research paths for the innovation field, emerging from the implication that technological originality, when integrating new knowledge components, depends on implied changes in the firm's knowledge base structure. This also has consequences for organizational learning and innovation design, as it calls for taking into account the dual status of knowledge component distance, that is, considering it both from the firm's and the firm's inventor's points of view.

2. Research questions

There is a consensus in the innovation literature that firms need to develop skills in both internal knowledge development and external knowledge sourcing (Helfat, 1994). The activities related to gathering knowledge components—either gained from internal development or sourced externally—to develop new inventions are referred to as knowledge

search practices.⁹⁹ They are closely linked to the firm's knowledge base (Ahuja et Katila, 2001). When analyzing both firms' knowledge base structures and components, it appears that there is a plurality of knowledge search practices that can be undertaken by firms depending on the extent to which they are relying on local or distant knowledge, respectively (Yayavaram et Chen, 2015). We address here the question of how to organize and choose among a plurality of knowledge search practices to efficiently design new, original inventions. The following research questions are addressed using patent analytics techniques, as a firm's patent applications are a proxy for the firm's knowledge base (Jaffe, 1986). Our research questions are then the following (analytical framework and research questions are synthesized in Figure 1):

- *QR1: How are knowledge search practices undertaken by firms to design novel inventions related to both their previous knowledge base—components and structures—and the sourcing of new external knowledge?*
- *QR2: How are knowledge search practices related to the technological originality of those inventions?*

where

Firm's knowledge search practices denote the different means employed by a firm to select and then combine diverse sources of knowledge components from the knowledge space in order to design a new invention.

A firm's knowledge base includes both (1) **the knowledge components** comprising expertise, knowledge and skills already acquired and mastered by the company and (2) **the structure** of the knowledge components describing interactions among these components. The structure describes how they have been combined together by the firm over time in order for improving design products, processes, or artefacts or for Research & Development purposes. A combination of two components is then considered a **knowledge coupling**.

and

Technological originality of an invention: there are many ways to measure technological originality of an invention. Here, it refers to the degree of difference between the underlying knowledge couplings embedded in a particular invention and a predominant design, which is conceptualized as a long-term and multi-industry technological knowledge base structure.

⁹⁹ Katila (2002) used "innovation search," but we refer here to "knowledge search," a term more commonly used in the literature.

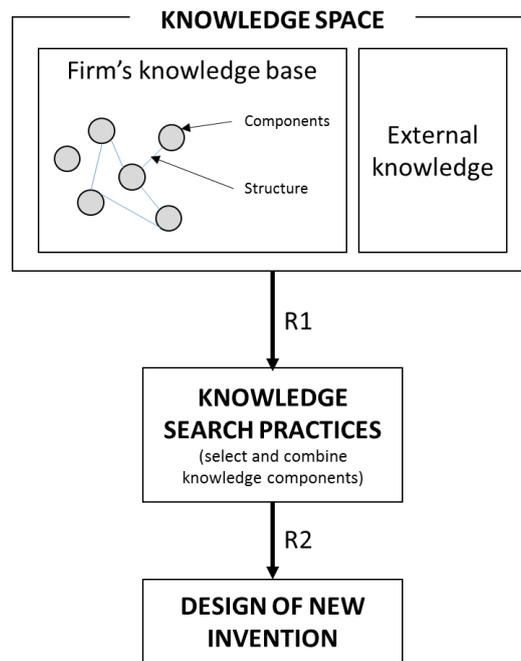


Figure 1 - Analytical framework and research questions

3. Literature review

As we are focusing on patent data as a proxy for firm's knowledge base, the following literature review aims to define the theoretical background with a particular emphasis on the patent analytics techniques that have been developed in the research field.

3.1. Knowledge search practices: (re)combination and the design of new inventions

Various streams of research on innovation have highlighted the importance of knowledge search activities, in areas such as organizational learning (e.g., Cohen and Levinthal, 1990; Nonaka, 1994), design science (e.g., Hatchuel and Weil, 2009), evolutionary theory (e.g., Nelson and Winter, 1982) or open innovation (Chesbrough, 2003 ; West *et al.*, 2014). To design new inventions, scholars mainly refers to the problem-solving logic inspired by the seminal Nelson and Winter (1982) book, under which firms' knowledge search activities aim at solving problems by combining knowledge components to create new products.

Hence, innovation scholars have mainly operated under the assumption that combining existing technological capabilities or knowledge components in novel ways (potentially including new knowledge for new combinations) is one of the principal sources of inventive novelty (Dosi, 1982; Fleming, 2001; Fleming and Sorenson, 2001; Hargadon and Sutton, 1997;

Henderson and Clark, 1990; Schumpeter, 1934; Teece, 1996). Fleming and Sorenson (2001) gave a few examples of combinatorial inventions: “*one might think of the automobile as a combination of the bicycle, the horse carriage, and the internal combustion engine. The steam ship can be characterized as combining the boat with steam power. Similarly, one might consider the microprocessor to be a conjunction of a computer’s central processing unit with integrated circuit fabrication processes*” (Fleming et Sorenson, 2001, p. 1020). Three main ways of combining knowledge can be identified: (1) combining new knowledge only, (2) designing new configurations of previously combined knowledge, and (3) mixing new knowledge with previously combined knowledge (Fleming, 2001 ; Yayavaram et Chen, 2015). In terms of innovation management, this implies that, first, firms need to develop combinative capabilities in order to create new configurations without becoming trapped in complexity issues (Fleming, 2001 ; Kogut et Zander, 1992). Second, firms have to develop organizational learning processes (e.g., routines) that foster the availability of the internal expertise that could be required in the design of new inventions (Ahuja et Lampert, 2001 ; Nonaka, 1994). Third, firms need to support internally developed new knowledge or to be involved in inside-in open innovation activities (Gassmann et Enkel, 2004) to access new knowledge components.

Thus, a firm is considered to be adopting local search practices when it is designing new inventions, in which majority of the technological content is similar to its prior search activities (Stuart et Podolny, 1996). This system was the main practice for much of the 20th century, while corporate research and development (R&D) labs were embedded in vertically integrated infrastructure in firms such as AT&T, DuPont, or IBM (Arora, Belenzon et Pataconi, 2018 ; Buder, 2000 ; West *et al.*, 2014). Firms also undertake distant search practices, in which knowledge created by other actors, such as competitors, consumers, or academic partners, is accessed and mastered by the firm to design new inventions (Ahuja et Lampert, 2001 ; Rosenkopf et Nerkar, 2001). Firms’ internal practices can foster distant knowledge search by reviewing competitors’ published patents, attending scientific or industry conferences, reviewing scientific articles, engaging in partnerships, etc. The literature on open innovation (Chesbrough, 2003) has opened new paths for in-depth analysis of external knowledge search processes (West et Bogers, 2014); in particular, many business approaches can be used to foster open innovation, such as outsourcing of R&D activities, joint development, purchase of external technology, or mergers and acquisitions (Cammarano *et al.*, 2017).

Based on these theoretical assumptions, scholars have developed techniques based on patent analytics to explore how inventions are designed. Indeed, the patent data’s richness favored fine-grained exploration of their contents and meta-data to provide insights on inventive

practices (for a review, see Abbas, 2014). For example, recent patent analysis techniques relied on forward and backward citations (for a review Jaffe and Rassenfosse, 2017, for example, see Daim & al., 2020), patent technological codes (e.g., Leydesdorff & al., 2014), aggregated indicators (e.g., OCDE), network of keywords (e.g., Choi and Hwang, 2014), semantic analysis (e.g., Arts, 2020, Wang and Zhao, 2020, Moehrle and Caferoglu, 2018), citations of scientific literature (e.g., Marx, 2020), natural language processing (e.g., Trappey & al., 2020), or even deep learning (e.g., Chung & Sohn). In our context, scholars mainly use Patent Classification Codes such as the International Patent Classification (IPC) system as a proxy for knowledge components. For example, Lobo and Strumsky (2019) and Strumsky and Lobo (2015) used four categories to describe novel inventions: (1) **origination** if all the IPC codes used in a given patent have never been used before, (2) **novel combination** if at least one pair of IPC codes in a given patent contains a code that has never been used before, (3) **combination** if at least one pair of IPC codes has never been used before in a given patent, and finally, (4) **refinement** for cases where all IPC codes have already been used before in other patents. They showed that from 1980 to 2014 for United States Patent and Trademark Office (USPTO) patents, combinations and refinements accounted for 47% and 52% of all patents respectively, while origination and novel combinations were very rare. Verhoeven et al. (2016) used another taxonomy: (1) **novelty in recombination**, when a patent contains at least one pair of IPC codes that was previously unconnected, (2) **novelty in technological origins**, when a patent contains at least one pair of IPC codes between the focal patent and the patent cited as literature (backward citation) that was previously unconnected, and (3) **novelty in scientific knowledge**, based on the pair of IPC and Web of Science category classifications of scientific articles cited as literature in the patent (i.e., Non-Patent Literature). By using a sample of European Patent Office (EPO), USPTO and World Intellectual Property Organization (WIPO) patent families, they showed that 7% of patent families scored on novelty in recombination, 22% scored on novelty in technological origins, and 11% of patent families that cited at least one scientific article scored on novelty in scientific knowledge. Overall, 25% of all patent families scored on at least one novelty criteria.

These valuable techniques help us better understand the nature of the knowledge search practices used by inventors to design new inventions and their occurrence in the global technological landscape. Furthermore, still based on patent analytics, scholars have also developed more applied research conducting analyses at firm level, in order to help a given firm identify what new knowledge components could be combined with their established knowledge to design new inventions (e.g., Nakamura et al., 2015; Sarica et al., 2019). Thus, the design of

new inventions is closely related to a firm's knowledge base, whose structure matters in this regard.

3.2. Firm's knowledge base—components and structures—and its interface with knowledge search practices

The firm's knowledge base describes what the firm knows (Grant, 1996 ; Jaffe, 1986 ; Kogut et Zander, 1992). Knowledge base theory has established that knowledge components are the preeminent resource of innovation activities of firms (Grant, 1996). Nevertheless, not only the knowledge components themselves matter: the structure of the knowledge base is also a key element (Kogut et Zander, 1992). Hence, the knowledge base *“can be characterized by the set of knowledge elements that it possesses and the relationships that it has forged between the knowledge domains to which these elements belong”* (Yayavaram et Chen, 2015, p. 377-378). As a result, firms' knowledge search practices are mainly linked to the firm's knowledge base: local knowledge corresponds to the firm's knowledge base at time t , while accessed distant knowledge components fuel the firm's knowledge base and are integrated at time $t+1$, as well as internally developed new knowledge generated through the local space (Kogut et Zander, 1992 ; Yayavaram et Ahuja, 2008 ; Yayavaram et Chen, 2015). It has to be highlighted that there are many possibilities for combining ancient local knowledge, newly developed local knowledge, and distant knowledge in order to design a novel invention.

Developed patent techniques also exist to explore firms' knowledge base components and structures. At the adopted starting point, scholars used Patent Classification Codes to reveal the knowledge components used by a given firm. For example, Fleming and Sorenson (2001) used USPTO subclass references for all patents filed by a given firm to compute knowledge components of the firm's knowledge base. They also explored couplings between knowledge components in the knowledge base, but from a global market perspective and not from that of the focal firm. Yayavaram and Ahuja (2008) and Yayavaram and Chen (2015) provided a more advanced representation of a firm's knowledge base by focusing on knowledge components and couplings at a firm-level analysis. *“[It] suggests that for several reasons it is beneficial to conceptualize knowledge bases as networks of knowledge elements in which even the ties between knowledge elements are important, rather than as simply sets of individual elements.”* (Yayavaram et Ahuja, 2008, p. 357-358). Yayavaram and Ahuja (2008) focused on the link between firms' knowledge structure and the usefulness of inventions using network theory techniques, revealing a firm's knowledge base by computing all pairs of knowledge

components sourced from the firm's patent applications. First, they showed that there is an inverse-U-shape between continuums of structures—from fully decomposed to an integrated knowledge base—and inventions' usefulness as measured through patent citations. Second, they highlighted that firms are pursuing two types of strategies: (1) adding new knowledge components and (2) adding new combinations of existing knowledge components (i.e., new couplings). Furthermore, Yayavaram and Chen (2015) explored the extent to which changes in knowledge component couplings between (1) familiar knowledge components only and (2) both new knowledge and familiar knowledge components affects innovation performance, using knowledge base complexity as a moderating variable. By reviewing financial and patent data for 1,750 firms between 1976 and 2004, they showed that changes in coupling of knowledge with which the firm is familiar (i.e., local knowledge) hurt the firm's innovation performance, while new couplings, using both local and distant knowledge components, increase the firm's innovation performance. Drawing on the literature in architectural innovation (Henderson et Clark, 1990), they highlighted that changing couplings between local knowledge components in highly complex environments reflects that the firm has overcome interdependency issues and uncertainty regarding which couplings are valuable. This phenomenon then leads to improved innovation performance.

It has to be noted that the usage of network theory techniques with patent data, as in Ahuja's (2008) approach using those data as a proxy knowledge base, is a familiar approach in the innovation research field. Nevertheless, those techniques have been extensively used mainly for other purposes: to build a global map of technological proximity (see Alstott et al., 2017a; Leydesdorff et al., 2014 for extended discussions), as well as to represent knowledge dynamics through inventor networks (e.g., Fleming and Frenken, 2007), partner networks (e.g., Grigoriou and Rothaermel, 2017), or citation networks (Li, Garces et Daim, 2019). In contrast, to our knowledge, very few studies have combined the usage of Patent Classification Codes and network theories tools in order to reveal firms' knowledge structure in the management science field, with the only known exceptions being Yayavaram and Ahuja (2008) and Yayavaram and Chen (2015). Although scholars have computed global maps of technological proximity based on Patent Classification Codes and used a few focal examples to illustrate their insights (e.g., Sarica & al., 2019), their research has not focused on individual firms. Furthermore, while reviewing IPC lists at a firm level is a common indicator of firm competitiveness (e.g., Jaffe, 1986)—in particular in the economics field—it has not been extensively used supported by network theory or to focus on invention design and scientific or technical evaluation. We also note that in another context, Cabanes (2017) used advanced network theories (matroid theory)

techniques to model firm expertise dynamics based on knowledge independencies. Nevertheless, those techniques relied on a qualitative data coding scheme that is not applicable to large-scale quantitative patent data.

3.3. Sourcing knowledge locally or distantly and the quality of invention

As firms rely on different knowledge search modes to source and combine knowledge components in order to design new inventions, with various implications and dependencies regarding firm's knowledge base, one key question is: to what extent does a given firm need to rely on its previous stock of knowledge to foster the design of new inventions (Katila, 2002), that is, to what extent does it hold that "*old is gold*" (Nerkar, 2003)?

A wide stream of research argues that radical innovation necessarily presupposes the utilization of very recent knowledge (Henderson et Clark, 1990 ; Katila, 2002 ; O'Connor, 2008) and knowledge from different industries and technological domains (Dahlin et Behrens, 2005 ; Dosi, 1982 ; Katila et Ahuja, 2002 ; Nooteboom *et al.*, 2007). In principle, such knowledge has not yet been integrated into the firm's knowledge base. By reviewing novelty through patent citations, Ahuja and Lampert (2001) effectively showed that having no backward citations, which can be interpreted as only using new knowledge components, is associated with more radical invention. Furthermore, Arts and Fleming (2016), relying on semantic analysis of patent data, showed that inventors who change fields are more likely to create novel patents due to their exposure to new knowledge components. In addition, drawing on state-of-the-art new scientific knowledge is also associated with the exploration of completely new innovation paths, such as the use of spintronic theories developed by 2007 Nobel laureate Albert Fert for semiconductors and the current industrial development on graphene by Nobel laureate Andre Geim (e.g., Fleming and Sorenson, 2004; Hatchuel et al., 2013). By measuring scientific article novelty and utilization in patent literature, Veugelers and Wang (2019) showed that utilizing more original scientific articles conduces to more novel patents (through patent citation evaluation). Finally, firms that build on newly developed knowledge components more frequently are able to better predict future technological advances and thereby design more novel inventions (Cohen et Levinthal, 1989). The frequent exposure to newly developed knowledge helps firms to sustain their cognitive capabilities, thereby helping future innovation (March, 1991).

Although relying on external knowledge is positively related to the originality of the design of a given invention, extensive reliance on local knowledge has been proven to be detrimental

to the global innovation process of firms. First, prior learning and existing paradigms can cause learning myopia or learning traps (Levinthal et March, 1993) and constrain the direction of search due to cognitive path dependence, specific historical pathways, or fixation effects (Agogué *et al.*, 2014 ; Kaplan et Tripsas, 2008 ; Sydow, Schreyögg et Koch, 2009). Nevertheless, it has been underlined by many researchers that firms should exploit and build upon their knowledge and expertise (i.e., their knowledge base) to innovate; indeed, as technological progress is cumulative, inventors inevitably need to draw on their prior knowledge and expertise (Kline et Rosenberg, 1986). Using knowledge components which the firm is familiar with enhances the reliability of the design and its uniqueness, in particular if the firm has a distinctive knowledge base (Katila, 2002 ; March, 1991). Following a combinatorial logic, a larger knowledge base evidently give more rooms for combinatorial possibilities, but it can also enhance complexity due to interdependency of knowledge components (Fleming, 2001 ; Yayavaram et Ahuja, 2008).

March (1991) characterizes the essential problem as a choice between exploiting known knowledge or exploring new and distant possibilities. Literature on “innovation ambidexterity” has drawn on those two concepts, advocating for simultaneously pursuing both exploration and exploitation (e.g., Andriopoulos and Lewis, 2010; O’Reilly and Tushman, 2008; Raisch et al., 2009), but mainly through pursuing different projects on similar timeframes. There is also room for the combination of both new and old knowledge components at an invention level and not at a portfolio level (Hatchuel et Weil, 2009 ; Le Masson, Weil et Hatchuel, 2010b ; Strumsky et Lobo, 2015 ; Yayavaram et Chen, 2015).

3.4. Research gap

To design novel inventions, firms need to combine knowledge components based on a continuum of search practices, depending on the extent of their reliance on familiar knowledge components. In our approach, we are bridging the literature on inventor’s knowledge search and firm’s knowledge base, focusing solely on invention originality but taking into account that the inventor is embedded in a given firm with distinct innovation practices and knowledge base (Le Masson, Weil et Hatchuel, 2010b). The combination of knowledge searched for to design a given invention is then related to the components, the structure of the knowledge base, and in particular, the distance between knowledge components in the knowledge base. Thus, what would previously have been considered “local” knowledge from a firm’s perspective is not necessarily local for a given inventor in that firm.

To our knowledge, we are the first to provide a **formal model describing in-depth how** firms are designing new inventions depending on their knowledge base structure and the combination of local and distant knowledge components. As noted by Yayavaram and Ahuja (2008): “*The problem of structuring organizational knowledge represents a significant frontier for organizational research with immense and exciting possibilities*” (Yayavaram et Ahuja, 2008, p. 358). In particular, a better understanding of firms’ knowledge search practices helps answer the question of what knowledge search practices may best foster the probability of designing an invention with high technological novelty.

We acknowledge that Nakamura et al. (2015) developed a formal model of combinational process based on combining knowledge *breadth* and *depth* (Laursen et Salter, 2006) and based on IPC analysis. Nevertheless, they did not rely on firm’s knowledge base structure and dynamics, as their research question was driven by the identification of the most suitable sub-domain for a given technological path. Here, we emphasize that the knowledge space of a given company has a particular structure that should be taken in account to explore firm’s knowledge search (Hatchuel et Weil, 2003, 2009 ; Yayavaram et Ahuja, 2008 ; Yayavaram et Chen, 2015). **We thus provide here a formal taxonomy of knowledge search modes** based on both the firm’s knowledge base structure and the combination of knowledge components of various distances, with the support of network theory techniques. In that sense, we also help explore questions identified by Phelps et al. (2012) in their literature review on knowledge networks: “*When, why, and how does the intraorganizational knowledge network structure of an organization affect an organizational unit’s knowledge creation and the organization’s knowledge creation?*” (Phelps, Heidl et Wadhwa, 2012, p. 137). Then, going a step further, the exploitation/exploration paradigm gives us a chance to measure which knowledge search practices lead to the most novel inventions in terms of technological originality.

Our formal model is computed on the basis of knowledge component couplings and then operationalized through patent data analysis. Taking into account the firm’s knowledge base structure—particularly knowledge component distance and newly absorbed components—and evaluating its implications for designing inventions necessarily entails a new research design. Firms’ knowledge base structures were modeled according to techniques in the literature techniques (Yayavaram et Chen, 2015), but we then used advance network theory tools (e.g., geodesic distance, graph components, weighted edges) to design the overall model. The taxonomy was implemented and tested through a case study of the oil & gas industry.

4. Taxonomy of innovation search practices: formal model and implementation through patent analysis

4.1. Firm's knowledge base definition

In order to define a firm's knowledge base, we drew on the common assumption that to design a given invention, firms need to combine knowledge components (e.g., Katila, 2002; Nelson and Winter, 1982). Hence, to design invention i , a given firm needs to combine n -tuples of knowledge components (referring to the sequence of all knowledge components that have to be mobilized to produce the invention). We adopted a pairwise logic, following the methodologies of Strumsky and Lobo (2015), Verhoeven et al. (2016), Yayavaram and Ahuja (2008), and Yayavaram and Chen (2015).¹⁰⁰

Knowledge component couplings can be reinterpreted through (undirected) network theory (Yayavaram et Ahuja, 2008 ; Yayavaram et Chen, 2015). We acknowledge that a wide stream of literature has used network theory to explain knowledge dynamics (cf. Phelps et al., 2012, for a review) but those were mainly focusing on either inventor level or invention citations level (e.g., Grigoriou and Rothaermel, 2017); here, instead, we followed a similar approach to Yayavaram and Ahuja (2008) and Yayavaram and Chen (2015), who used knowledge component networks for firm-level analysis. Graph G_i for invention i is comprised of vertex $V(G_i)$, representing the **knowledge components** that have to be mobilized to design the invention and edges $E(G_i)$, representing the **knowledge couplings** of the n -tuple = components (i.e., structure). At a given time t , the firm may have developed multiple inventions; we are then able to map the **knowledge base** generated by all those inventions at given time by simply unifying the different graphs of each invention. We made the assumption that, following this operation, the weight of each existing vertex and edge can be considered equal to 1.¹⁰¹

Over time, a given firm produces diverse inventions by combining previously existing components from time t and newly accessed knowledge components at time $t + 1$.¹⁰² Figure 2 represents an example of a given firm's knowledge base at time $t + 1$, in which the firms could have designed, for example in time t , the following inventions: {A,B}, {B;C;D}, {D;E}, {D;F}.

¹⁰⁰ The number of knowledge component pairs (KPs) for invention i is then: $KP_i = C_{n_i}^2 = \frac{n_i!}{2(n_i-2)!}$

¹⁰¹ There is no escalation for knowledge accumulation, as we only focused on knowledge base structure and components.

¹⁰² New vertex and combinations in time $t+1$ are then: $NEW\ EDGE_{t+1} = E(G_{t+1}) - (E(G_{t+1}) \cap E(G_t))$ and $NEW\ VERTEX_{t+1} = V(G_{t+1}) - (V(G_{t+1}) \cap V(G_t))$

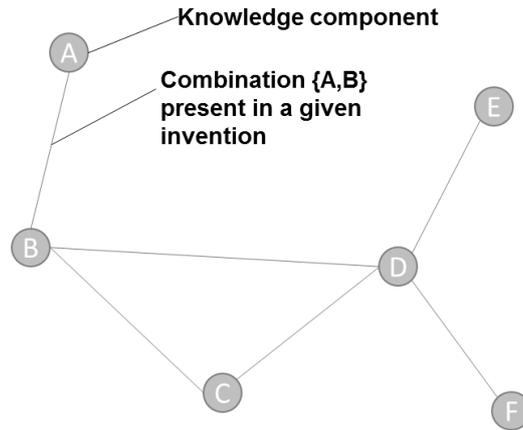


Figure 2 - Knowledge base example following inventions {A,B}, {B,C,D}, {D,E}, and {D,F}

4.2. Taxonomy of knowledge search modes

To help in the understanding of knowledge search practices, we developed a taxonomy based on backward reasoning: what would be the effects of a newly designed invention at time $t+1$ on the previous knowledge base at time t . The taxonomy was designed based on three key dimensions: (1) the integration, or not, of new knowledge components in the firm's knowledge base; (2) the creation, or not, of new combinations of pre-existing knowledge components; and (3) the distance between the knowledge components in the firm's knowledge base.

- **Refinement mode**

Inventions relying on the **refinement mode** are entirely based on the firm's previous efforts to acquire and combine knowledge. Hence, refinement inventions do not add any new vertex or edge to the previous knowledge structure, as those inventions are only reemploying existing knowledge and combination of knowledge. This definition is in line with Strumsky and Lobo (2015). Inventions designed through this mode are related to local search and can be viewed as a proxy for *knowledge depth*: the firm is incrementally improving its knowledge in an already known and mastered technical discipline or area of expertise. Formally, for a new combinatorial invention $I_{t+1} = \{1, \dots, n\}$ designed at time $t + 1$, with d_t^{i-j} the shortest path at time t between components i and j :

$$\begin{aligned} V(G_{t+1}) - V(G_t) &= 0 \\ E(G_{t+1}) - E(G_t) &= 0 \\ \max (d_t^{i-j}) &= 1, \forall i, j \in [1, n] \end{aligned}$$

- **Clustering mode**

Inventions relying on **clustering mode** are based on combining knowledge components searched locally, already present in the firm's knowledge base, but not yet combined by the firm. Hence, the design leads to at least one new combination of already "close" existing knowledge components. To operationalize the knowledge structure, we computed geodesic distance for each pair of vertexes.¹⁰³ We consider that the geodesic distance between two knowledge components constitutes an indicator of what can be considered local throughout the firm's knowledge base. For instance, combining knowledge components that have a geodesic distance strictly equal to 2 can be considered local from a firm's inventor's standpoint; the combination is then creating a knowledge cluster.¹⁰⁴ Grigoriou and Rothaermel (2017) followed a similar approach by using average lengths between nodes to proxy the capacity of an inventor to access and recombine existing knowledge. We made the assumption that those elements could describe new product development projects involving, for example, two divisions of a given business unit; this would also guarantee higher modularity for future projects. Formally, for a new combinatorial invention $I_{t+1} = \{1, \dots, n\}$ designed at time $t + 1$, with d_t^{i-j} the shortest path at time t between components i and j :

$$\begin{aligned} V(G_{t+1}) - V(G_t) &= 0 \\ E(G_{t+1}) - E(G_t) &\geq 1 \\ d_t^{i-j} &= 2, \exists i, j \in [1, n] \\ \max(d_t^{k-l}) &\leq 2, \forall k, l \in [1, n] \end{aligned}$$

- **Absorption mode**

Inventions based on **the absorption mode** are those that draw on new knowledge components that were not part of the knowledge structure at time $t-1$ and that do not imply new combinations of previously unconnected existing components in the firm's knowledge structure, except for local components (i.e., geodesic distance strictly equal to 2). Hence, those inventions can either be based on a combination of new knowledge components that are completely unconnected to the main knowledge structure, which leads to creation of a new component in the graph (case 1), or they can be based on new knowledge components that are combined with only one existing knowledge component (case 2). This mode refers to the

¹⁰³ The path with the minimum number of edges (Kolaczyk, 2009).

¹⁰⁴ It could also be viewed as a circuit from a matroid perspective.

situation in which the firm is sourcing knowledge outside of its knowledge base to complete the design of the invention; most probably, those new distant knowledge components are the results of an explorative knowledge search practice with external partners or of completely new greenfield research projects. Formally, for a new combinatorial invention $I_{t+1} = \{[1, \dots, m], [n, \dots, o]\}$ designed at time $t + 1$, with d_t^{i-j} the shortest path at time t between components i and j :

$$V(G_{t+1}) - V(G_t) \geq 1$$

$$E(G_{t+1}) - E(G_t) \geq 1$$

Case 1: absorption by additional knowledge component:

$$V(I_{t+1}) \cap V(G_t) = \emptyset$$

Case 2: absorption by connection with existing knowledge structure:

$$d_t^{i-j} \begin{cases} = \emptyset, \exists i, j \in [1, \dots, m] \\ \leq 2, \forall i, j \in [n, \dots, o] \end{cases}$$

- **Recomposition mode**

Inventions based on the **recomposition mode** comprise new combinations of existing knowledge that are not considered local in the firm's knowledge base (i.e., that entail major changes in the structure). Potentially, this category also includes combinations involving new knowledge components. This practice is particularly challenging, as the firm needs to combine knowledge components that are already mastered within the firm but are not considered local from the inventor's point of view. This can occur because of fixation effects (Agogué et Le Masson, 2014) or lack of communication between silos, for example. This redefinition of the links between familiar and mastered knowledge components can be generated through access to new knowledge components. Formally, for a new combinatorial invention $I_{t+1} = \{1, \dots, n\}$ designed at time $t + 1$, with d_t^{i-j} , the shortest path at time t between components i and j :

$$V(G_{t+1}) - V(G_t) \geq 0$$

$$E(G_{t+1}) - E(G_t) \geq 1$$

$$d_t^{i-j} \in [3; +\infty[, \exists i, j \in [1, n]$$

	Initialization	Refinement mode	Clustering mode	Absorption mode	Recomposition mode
Invention	NA	$I_{t+1} = \{1, \dots, n\}$	$I_{t+1} = \{1, \dots, n\}$	$I_{t+1} = \{[1, \dots, m], [n, \dots, o]\}$	$I_{t+1} = \{1, \dots, n\}$
Period	t	$t+1$	$t+1$	$t+1$	$t+1$
Vertex properties	NA	$V(G_{t+1}) - V(G_t) = 0$	$V(G_{t+1}) - V(G_t) = 0$	$V(G_{t+1}) - V(G_t) \geq 1$	$V(G_{t+1}) - V(G_t) \geq 0$
Edge properties	NA	$E(G_{t+1}) - E(G_t) = 0$	$E(G_{t+1}) - E(G_t) \geq 1$	$E(G_{t+1}) - E(G_t) \geq 1$	$(G_{t+1}) - E(G_t) \geq 1$
Geodesic distance properties	NA	$\max(d_t^{i-j}) = 1, \forall i, j \in [1, n]$	$d_t^{i-j} = 2, \exists i, j \in [1, n]$ $\max(d_t^{k-l}) \leq 2, \forall k, l \in [1, n]$	Case 1: $V(I_{t+1}) \cap V(G_t) = \emptyset$ Case 2: $d_t^{i-j} \begin{cases} = \emptyset, \exists i, j \in [1, \dots, m] \\ \leq 2, \forall i, j \in [n, \dots, o] \end{cases}$	$d_t^{i-j} \in [3; +\infty[$ $\exists i, j \in [1, n]$
Stylized example					

Table 1 - Knowledge search modes taxonomy

4.3. Implementation of the taxonomy through patent analysis

In this section we detail the implementation of the knowledge search modes taxonomy developed above, using patent data and network theory techniques. We used Patent Classification Codes to compute knowledge base components for a given firm at time t and applied co-classification data to build the network (i.e., the structure of the knowledge base).

We relied on the International Patent Classification (IPC) codes from the World Intellectual Property Organization, which are more suitable for assessing the recombinant nature of invention than the United States Patent Office Classification (Gruber, Harhoff et Hoisl, 2013), as the IPC system uses complete technological information contained in a given patent application while the USPOC system uses only technologies embedded in the claims. Each IPC code is a hierarchical symbol denoting section, class, subclass, main group, and subgroup (WIPO, 2019). The IPC list was first published in 1971; we referred to the 2019 version, which contains 131 classes and 645 subclasses. It has to be highlighted that a patent can be classified in more than one subclass; indeed, for example, in the 2000–2014, period only 15% of USPTO-issued patents can be described as having only one technological functional (Strumsky et Lobo, 2015).

To design the firm's knowledge base, we relied on the IPC subclasses (i.e., IPC-4) as we considered that we only need to account for consequential knowledge components and combinations. This assumption is consistent with practices in the field (e.g., Verhoeven et al., 2016). To model the base, we looked at all the patent applications of a given firm at time t ; due to issues related to international extensions and other patenting specificities, we do not account for patents individually but for families of patents, to analyze inventions per se (Martínez, 2011). We used all patent applications, including for patents that were not granted, under the assumption that if the firm is willing to apply for a patent, due to the costs of application procedures, the knowledge components involved in the given invention have been mastered by the company. We interpret it that if a given patent is not issued, it is due to competitors' previous applications, procedural issues, or incomplete review of the previous state of the art, none of which interferes with what knowledge components are mastered or not by the firm.

In this situation, for a given invention I at time t , the invention graph would be represented as follows:

- Vertex $V(G_t^I)$: each IPC code of the given invention family;
- Edge (G_t^I) : each combination of IPC codes of the given invention family (i.e., co-occurrence).

Then, the complete knowledge structure for a given firm is calculated through the unification of all patent families with edge simplification.

To compute the final version of the model, we had to specifically deal with both (1) time constraints, to implement the network dynamic, and (2) mono-class patents. Regarding the former, we needed to compute whether each vertex at time $t+1$ was new or existed in the previous knowledge base at time t . To avoid a binary model and to take into account time-lag due to investment and research duration required to master given new knowledge, a new vertex would be considered new for a period of 3 years (e.g., Yayavaram and Ahuja, 2008). On the other hand, it has been shown that knowledge comprising of filed patents is depreciated over time (Park, Shin et Park, 2006) and that the depreciation rate is industry dependent. We defined a depreciation cycle d_f that differed depending on studied industry f ; a given knowledge component's or combination's lifetime in industry f is equal to d_f . The lifetime of all knowledge components or combination of different industries are depreciated at different rates. Vertices and edges were deleted from the knowledge base if there was no other patent family filed during the period with a similar IPC code or combination of IPC codes. Others have also referred to a knowledge component lifetime to analyze dynamic knowledge absorption or usage by firms or inventors (e.g., Grigoriou and Rothaermel, 2017; Yayavaram and Chen, 2015).

As for mono-class patents, some inventions only comprise a unique IPC code; studies focusing on combinatorial innovations do not take in account those patents (e.g., Verhoeven et al., 2016). Our approach is different, as in the initial phase mono-class patents are taken into account for knowledge base computation, knowledge component newness, and lifetime duration calculation. Nevertheless, mono-class patent families are not consistent with our approach to take into account technological originality, and thus are excluded from the final studied sample after knowledge base computation.

5. Methodology

In this section, we present the methodology used to cope with our research questions. To do so, we proceed in five main steps from choosing a given sector (i.e., oil & gas) to the computation of knowledge search practices and technological originality measurement. An overview of the methodology stages is available in Figure 3.

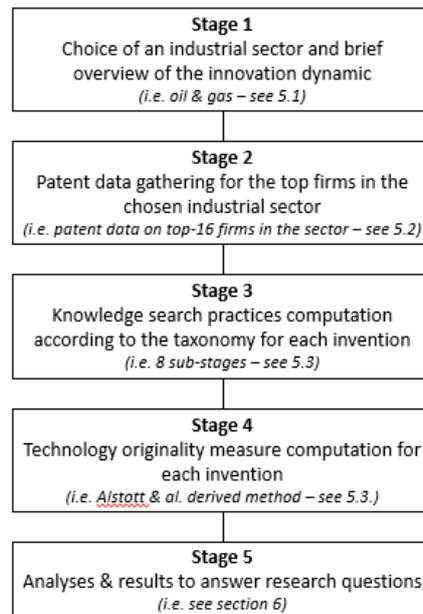


Figure 3 – Methodology overview

5.1. Industrial sector specifics: Oil & gas

We conducted an exploratory study on the energy sector, in particular the oil & gas subsector. The oil & gas industry is key to almost all modern economies because of its major dependency on fossil fuel, significance in the global energy mix and impacts on societies (Korotayev *et al.*, 2018). In this study we are focusing on oil & gas industry innovation practices. In this subsector, R&D efforts are dynamically increasing due largely to three major shifts in the market. First, the decreasing stock of oil & gas resources requires the development of new technologies to find and produce hydrocarbons as they become more difficult to source. For example, the industry engaged significant efforts to develop new technologies to support biodiesel production (Mahlia & al., 2020). Second, major disasters such as Exxon Valdez (1989), Brent Spar (1995), or Deepwater Horizon (2010) have led to increasing R&D efforts to sustain human and environmental safety. Finally, diversification of major players towards more renewable energy alternatives is observed (cf. Perrons, 2014 for a detailed review of R&D trends in the sector). For example, efforts to strengthen Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS), Enhanced Oil Recovery (EOR), or Enhanced Coal-Bed Methane (ECBM) technologies mainly increased since 2013 according to patent analysis (Norhasyima and Mahlia, 2018).

Regarding our research questions, on the one hand, firms in the oil & gas industry have shown a dynamic innovation trend over the last decades (Iyer, 2016, Pasqualini and Bassi, 2014), while on the other hand, some actors are old, very well-established companies we can

assume have accumulated a large knowledge base over time. The subsector thus constitutes a good candidate for research on knowledge search and the design of new inventions.

5.2. Data sample

We only focused on major firms in the worldwide market, as we wanted to select firms with a large knowledge base. Firms were selected using the Thomson Reuters Top 100 Energy Report (Thomson Reuters, 2017) subsection on the top 25 companies for the oil & gas subsector. This sample includes five most prominent oil- & gas-integrated companies: companies operating in upstream (exploration and exploitation), midstream (transportation, storage, and processing) and downstream (refining, purifying and marketing and commercial distribution of various products, such as natural gas, kerosene, asphalt and other petrochemicals materials)¹⁰⁵. We retrieved patent data using the *Clarivate Derwent* database, which includes patents filed in major patent offices (EP, WO, and US); we used the “Optimized Assignee” function to retrieve patents for the top 25 oil & gas companies. *Clarivate Derwent* conducted in-depth analyses for the 21,000 top worldwide companies in terms of patents, to retrieve filed patents, identify major subsidiaries, and correct company name spelling issues. We were able to retrieve 16 companies’ patent portfolios from among the 25 selected in the sample.¹⁰⁶ With the help of experts from the Technological Intelligence Unit and the Global R&D Patent Unit of one of the major Oil & Gas companies present in the sample, we were able to obtain more fine-grained data due to corrections on subsidiaries; non-completely integrated subsidiaries were excluded from the sample. Patent data were initially retrieved for applications between January 1, 1980 and September 9, 2019.

Ultimately, our sample comprises 16 firms accounting for 125,465 unique patents¹⁰⁷ and 48,662 International Patent Documentation (INPADOC) families (i.e., inventions). Breakdown per company, invention, and patent is available in Appendix 1.

5.3. Implementation of the taxonomy on the data set

¹⁰⁵ The five most prominent industries include: Exxon Mobil, Royal Dutch Shell, Chevron, BP and Total Group

¹⁰⁶ Excluded companies included Bharat Petroleum, Gazprom, Hess Corporation, MOL, Lukoil, PKN Orlen, PTT Public Company Limited, Thai Oil, and S-Oil, as for these companies *Clarivate Derwent* did not perform in-depth analysis (i.e., did not have optimized assignee functionality); therefore, we considered that patent data for those companies were not reliable enough to be included.

¹⁰⁷ The total number of patents is 125,465, but the breakdown per company is higher, as some are counted multiple times because of partnerships between companies in the sample.

Using the detailed data sample, we implemented our model to define knowledge search modes. We followed the steps described in Figure 4 and detailed below. The model was developed using R code (through an R Studio Interface) developed by the authors specifically for this study.

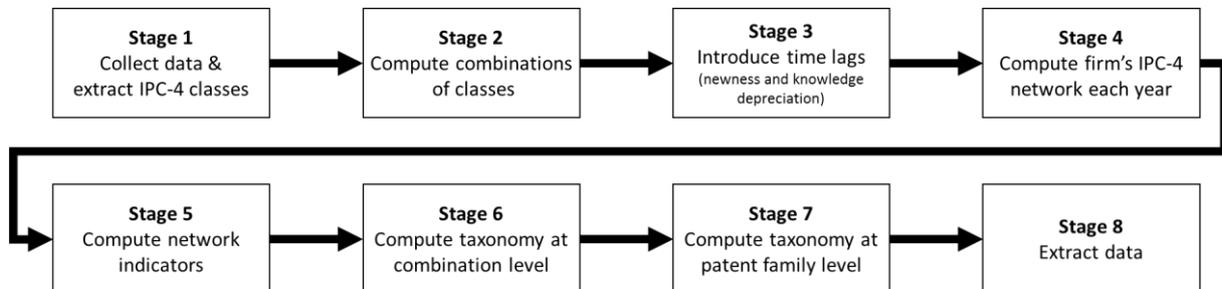


Figure 4 - Stages of model implementation

- **Stage 1: Collect data & extract IPC-4 classes**

IPC-4 classes that were part of a given patent were aggregated at INPADOC patent family level; we computed IPC-4 data for the 48,662 INPADOC patent families. The date used for the INPADOC patent family is the earliest date for any of the patents in the family. Each INPADOC patent family including application year and IPC-4 n-tuples, was assigned to a company portfolio.

- **Stage 2: Compute combination of classes**

Based on the list of IPC-4 n-tuples of each INPADOC patent family, a list of IPC-4 pairwise combinations was built. A total of 83,970 combinations and INPADOC patent family pairs were retrieved from the sample.

- **Stage 3: Introduce time lags**

Time lags are introduced to take into account newness of knowledge components and knowledge stock depreciation. Each new IPC-4 or IPC-4 pairwise combination in a firm's patent portfolio is considered new to the firm for a duration of 3 years (cf. section 0). Park et al. (2006) analyzed knowledge depreciation over different industries; according to their computation, the depreciation rate for the chemical industry is 13.10% on average, while that

for non-metallic minerals is 12.84% in average (Park et al., 2006, p. 125)¹⁰⁸. We set a knowledge components and combinations lifetime of 8 years;¹⁰⁹ if a given IPC-4 or pairwise combination of IPC-4s was not filed again through another INPADOC patent family in that time, it was deleted from the firm's knowledge base after 8 years. Following the application of time lags, 204,239 combinations of IPC codes were computed. It has to be noted that for a given company, if an IPC-4 is deleted after 8 years due to no further applications but is then filed again after 8 years, it is treated as a new one.

- **Stage 4: Compute firm's IPC-4 network each year**

Based on IPC-4s extracted from mono-class INPADOC patent families and IPC-4 pairwise combinations extracted from multi-class INPADOC patent families, with the application of time lags, IPC-4 networks were computed to design firms' knowledge base. A network graph was generated each year from 1980 to 2019 for each firm in the sample. Because of variations regarding the first year of patenting due on different dates of firm establishment, 558 graphs were generated. An example is given for the company Total S.A. in 1995 in Figure 5 below.¹¹⁰

¹⁰⁸ The oil & gas industry does not have a dedicated sector in Park et al. (2006). Because of a high reliance of this industry on the chemical industry for downstream activities and on nonmetallic minerals for upstream activities, we relied to the latter.

¹⁰⁹ We computed the average between 13.10 % and 12.84% and computed the time for complete depreciation of a given knowledge component, yielding 8 years.

¹¹⁰ IPC-4 short descriptions are sourced from Alstott et al. (2017a).

- IPC-4 pairwise combinations with only non-new IPC-4s and with a previous geodesic distance strictly equal to 2—*knowledge cluster enhancement pairwise combinations*.
- New combinations of IPC-4s not related to the principal component—*strict external absorption pairwise combinations*.
- New IPC-4 pairwise combinations with a geodesic distance strictly superior to 2, with interactions only with principal components and including both a new and a non-new IPC-4—*non-strict external absorption*.
- New IPC-4 pairwise combinations with a geodesic distance strictly superior to 2, with interactions only with principal components and including two non-new IPC-4s—*recomposition pairwise combination*.

Furthermore, because of newness lag, the first level of the taxonomy was applied for a duration of 3 years, meaning that, for example, if the combination $\{A, B\}$ was designated in the year 1980 as an *absorption* combination, this was also the case for years 1981 and 1982.

- **Stage 7: Compute taxonomy at patent family level**

As INPADOC patent families may comprise multiple combinations depending on the size of the IPC-4 n-tuples, we defined an algorithm to apply the complete taxonomy. The steps are applied successively to the stock of IPC-4 pairwise combinations per INPADOC patent family.

- Step 1: At least one *strict external absorption pairwise combination* → **absorption INPADOC patent family**;
- Step 2: At least one *recomposition pairwise combination* (entailing no *absorption pairwise combination*) → **recomposition INPADOC patent family**;
- Step 3: At least one *non-strict external absorption pairwise combination* (entailing no *strict external absorption pairwise combination* or *recomposition pairwise combination*) → **absorption INPADOC patent family**;
- Step 4: At least one *knowledge cluster enhancement pairwise combination* (entailing no step 1 to 3 combinations) → **knowledge cluster enhancement INPADOC patent family**;
- Step 5: other cases leading to at least one *refinement pairwise combination* → **refinement INPADOC patent family**.

- **Stage 8: Data extraction**

The final data set was extracted to analyze the different knowledge search modes throughout the top 16 companies in our sample of the oil & gas subsector. As we were focusing on knowledge bases that were dynamically changing over time, we needed to account for time to allow network stabilization. We thus used the sample of patent families only after one complete cycle of knowledge depreciation (i.e., 8 years); furthermore, INPADOC patent families filed between 2017 and 2019 were deleted due to the delay between the moment of patent publication and submission to ensure data consistency. After these restrictions, the sample contains 32,594 INPADOC patent families. Finally, in line with previous studies (see section 0), we excluded INPADOC patent families with only a single class, as we were focusing on combinations. The final sample contained 19,825 INPADOC patent families

5.4. Invention technological originality measurement

The measure of technological invention originality is a complete innovation management field in itself, and it is not our objective here to provide an exhaustive assessment (see Squicciarini et al., 2013 for a review). Generally, when using patent data, scholars are accounting for patent citations in order to proxy the value of the invention, such as its commercial potential, usefulness, or social welfare benefits (Hall, Jaffe et Trajtenberg, 2000 ; Harhoff *et al.*, 1999 ; Jaffe et de Rassenfosse, 2010 ; Trajtenberg, 1990). It has nevertheless been shown that patent citation is subject to several biases (such as time lag, variations in citations by firm size, auto-citation, etc.); in order to overcome those issues, authors have used semantic analysis techniques to measure the novelty of a given invention (e.g., Arts and Fleming, 2016; Hain et al., 2018). In this study, our focus was on patent classification classes and then the combinatorial originality of combinations; as a result, we looked for a technological originality proxy using patent classification classes. One of the main advantages of this approach is that the measure would not be affected by citations time lag and helping it would be recognized as a valuable invention.

We chose to rely on global Patent Classification Class mapping (Leydesdorff, Kushnir et Rafols, 2014 ; Schoen *et al.*, 2012). Specifically, we used an indicator derived from Alstott et al. (2017a, 2017b), who developed a methodology to compute technology network structure and draw a measure of proximity between each pairwise technological combination at IPC-4 level. In more detail, the technology network was computed by reviewing 3,911,050 utility

patents issued from 1976 to 2010 by the United States Patent and Trademark Office. The measure of technological proximity aggregated multiple proximity indicators: direct citations, co-citation, cosine similarity, co-occurrence and co-classification, along with several normalization measures in order to correct impinging factors. In particular, the authors showed that on one hand, the technology network is sparse, as very few pairs of technology classes are significantly related, while on the other hand, the network is very stable over time. We called this the *Alstott Score*: the proximity between two IPC-4 patent classes, which was normalized between [0; 1].

In our study, we used an *Alstott Derived Originality Indicator* (ADOI). As the technology network is considered stable, we made the assumption that combining two IPC-4 classes that were not close in Alstott et al.'s network was an adequate indicator of technological originality. Thus, the ADOI for the pairwise combination of IPC-4s i and j was computed as follows:

$$ADOI^{i-j} = 1 - Alstott\ Score^{i-j}$$

As an INPADOC patent family can comprise several pairwise combinations, we used an arithmetic mean to compute the ADOI score. The Alstott Score database was sourced from a file made publicly available by those authors following their publication.¹¹¹

Our sample contained 496 single IPC-4s, of which 9 had not been computed by Alstott et al. (2017a). A total of 48 INPADOC patent families were impacted by those 9 classes and were excluded from our sample. The final sample thus comprised 61,901 IPC-4 pairwise combinations, of which 7,261 were unique IPC-4 pairwise combinations.

6. Results

6.1. Firm's knowledge base features

The final sample comprised 19,863 INPADOC patent families representing 50,776 patent applications filed between 1989 and 2016. We reviewed the list of IPC-4 classes present in the sample's applications and found it consistent with the oil & gas industry (Appendix 2). It has to be noted that the number of INPADOC patent family applications in the sample varied over time (Appendix 3); this is presumably because firms employ different patenting practices and some started to patent only after 1989. We noted an increase in patent family applications since 1998, in line with Perrons' (2014) work on innovation effort acceleration in an oil & gas firm R&D.

¹¹¹ <https://doi.org/10.5281/zenodo.1035448>

The 16 firms in our sample also recorded variations in terms of the number of applications filed per year and of knowledge base features (Appendix 1). The total number of INPADOC patent family applications varies from 5,596 for Exxon to 65 for Suncor Energy. Exxon Mobil is a highly established company formerly called the Standard Oil Company, founded in 1870,¹¹² and is highly integrated in the oil & gas supply chain (upstream, midstream, and downstream). Exxon Mobil employed more than 70,000 people worldwide in 2017. On the opposite end, Suncor Energy, a Canadian company established in 1917, operates almost exclusively upstream and employed 12,480 people in 2019.¹¹³ Those differences in the firm size and financial capacity impact patenting practices and subsequently the firm's knowledge base features, such as potential number of knowledge components and maximum number of potential combinations. Variations can also be explained by a firm's intellectual property unit's internal practices and can be subject to major variations over the years. Hence, the average size of the knowledge base and its structure varies between the different companies (Table 2; see also Appendix 4 & Appendix 5 for more details). Knowledge base structure and components have been derived from patent data and computed similarly to literature's practices (e.g. Yayavaram and Ahuja, 2008, Yayavaram and Chen, 2015).

	Average no. patent families filed per year	<i>Standard deviation</i>	Average no. IPCs in the knowledge base	<i>Standard deviation</i>	Average no. IPCs pairwise combinations in the knowledge base	<i>Standard deviation</i>	Total number of patent families in the sample
Exxon Mobil	199.9	47.1	235.3	26.2	1,174.4	191.5	5,596
Royal Dutch Shell	139.0	31.5	228.2	30.2	982.6	261.1	3,891
Chevron	74.5	32.0	166.4	24.5	580.7	132.8	2,087
BP	58.9	32.3	185.1	51.2	598.0	224.2	1,648
Saudi Basic Industries Corp.	65.5	78.2	75.0	74.0	348.0	417.4	1,638
Total Group	57.5	28.9	129.2	43.3	435.2	244.8	1,609
ConocoPhillips	40.6	24.7	139.1	38.1	387.7	132.3	1,138
Eni	36.3	14.3	102.7	34.3	323.1	146.2	1,017
Equinor	14.1	6.7	53.7	30.2	95.9	69.7	380
SK Innovation Corp.	41.0	13.3	69.4	42.5	255.7	161.5	246
Reliance Industries	9.5	11.7	28.2	34.7	69.0	101.4	181
PetroChina	9.0	6.2	27.9	19.3	35.9	33.3	117
Repsol	4.9	2.9	33.1	14.5	49.9	25.7	88
Indian Oil Corp.	5.7	5.5	21.3	16.1	32.9	31.9	86
INPEX Corp.	6.3	6.6	12.2	9.6	30.6	28.6	76
Suncor Energy	3.1	2.0	22.0	8.0	42.7	34.6	65
Average / Total	47.9	54.4	95.5	76.2	340.1	350.3	19,863.0

Table 2 – Firm's knowledge base features breakdown

¹¹² Company's corporate website.¹¹³ Company's corporate website.

6.2. Knowledge search practices

As per our newly developed taxonomy for the purpose of this study, we estimated the proportions of the respective knowledge search mode in the sample: (1) refinement, (2) clustering, (3) absorption, and (4) recombination. Results are presented in Table 3. The refinement knowledge search mode was the most used (47% of the sample), consistent with the results of our expert interviews. This indicates that firms in this industry are mainly developing in-depth knowledge in applying existing scientific and technological disciplines to incrementally develop new inventions. The second most common knowledge search mode was the absorption mode (38% of the sample). This was also consistent with our expert interviews, reflecting the promotion of open innovation projects across the industry as well as pointed out in the literature (Chesbrough, 2003; West et al., 2014). As noted, due to major changes in the field and the increase in firm innovation efforts, companies are looking more to greenfield projects; impacts on invention may be driven, for example, by new start-up acquisitions that became fully integrated in the organization, bringing non-traditional research areas for the company. Finally, clustering and recombination modes were the least used modes, again consistent with the expert interviews. Those knowledge search modes face particular silo issues because they require new combinations of the mastered knowledge components in the firm's knowledge base, which probably indicates that the knowledge components are mastered by a different team or business unit and not by the one currently handling the invention.

	No. patent families	Repartition
Refinement mode	9,336	47.0%
Absorption mode	7,534	37.9%
Clustering mode	2,304	11.6%
Recomposition mode	689	3.5%
Total	19,863	100%

Table 3 - Knowledge search modes in the sample

We also looked at the breakdown of knowledge modes by firm and at representations of each mode in terms of patent family application portfolios. As a result, we were able to highlight huge variations in knowledge search practices across the firms in the sample, as shown in Figure 6. As, there was variation in the number of patents filed each year per firm, we also detailed

total number of patent families filed through each knowledge search mode and total number of associated INPADOC patent family applications in Table 4.

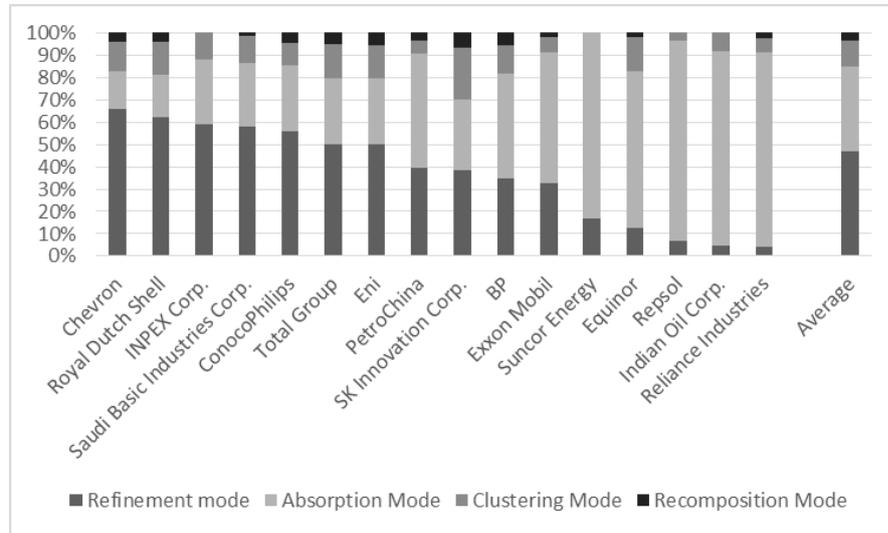


Figure 6 - Firm's INPADOC patent family applications per Knowledge Search Mode

	Refinement mode		Clustering mode		Absorption mode		Recomposition mode		Total no. patent families
	No. patent families	% of firm's portfolio	No. patent families	% of firm's portfolio	No. patent families	% of firm's portfolio	No. patent families	% of firm's portfolio	
Exxon Mobil	1,818	32.5%	387	6.9%	3,295	58.9%	96	1.7%	5,596
Royal Dutch Shell	2,422	62.2%	587	15.1%	726	18.7%	156	4.0%	3,891
Chevron	1,371	65.7%	270	12.9%	359	17.2%	87	4.2%	2,087
BP	570	34.6%	206	12.5%	779	47.3%	93	5.6%	1,648
Saudi Basic Industries Corp.	945	57.7%	196	12.0%	470	28.7%	27	1.6%	1,638
Total Group	804	50.0%	245	15.2%	476	29.6%	84	5.2%	1,609
ConocoPhillips	636	55.9%	114	10.0%	335	29.4%	53	4.7%	1,138
Eni	508	50.0%	148	14.6%	301	29.6%	60	5.9%	1,017
Equinor	48	12.6%	57	15.0%	267	70.3%	8	2.1%	380
SK Innovation Corp.	94	38.2%	57	23.2%	79	32.1%	16	6.5%	246
Reliance Industries	8	4.4%	11	6.1%	157	86.7%	5	2.8%	181
PetroChina	46	39.3%	7	6.0%	60	51.3%	4	3.4%	117
Repsol	6	6.8%	3	3.4%	79	89.8%	-	0.0%	88
Indian Oil Corp.	4	4.7%	7	8.1%	75	87.2%	-	0.0%	86
INPEX Corp.	45	59.2%	9	11.8%	22	28.9%	-	0.0%	76
Suncor Energy	11	16.9%	-	0.0%	54	83.1%	-	0.0%	65
Total	9,336	47.0%	2,304	11.6%	7,534	37.9%	689	3.5%	19,863

Table 4 - Repartition of the knowledge search modes in the sample (thousands of INPADOC patent families)

6.3. Invention technological originality & knowledge base innovative potential

We computed the ADOI score for each patent family in the sample, a measure derived from Alstott et al. (2017a) but to our knowledge, not utilize in the previous literature to measure technological originality and innovative potential. There were only a few patent families with high ADOI scores: 2.1% had an ADOI score of higher than 0.9, which indicates high technological originality (Appendix 6). Very low scores were common: 59.3% of the patent families had an ADOI score below 0.2 (Figure 7). This is consistent with the findings of Alstott et al. (2017a), which show using a large set of patents that only a few classes are connected together.

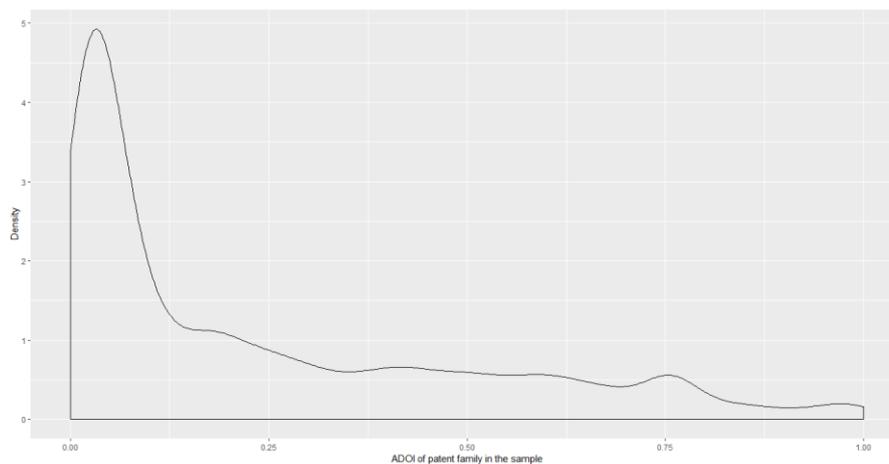


Figure 7 - ADOI density in the sample

Furthermore, it has to be noted that firms recorded high variations in terms of the overall ADOI average score based on patent application families filed each year (Table 5). Suncor Energy and Equinor led the portfolio ADOI score ranking, while Saudi Basic Industries Corp. and INPEX Corp had the lowest scores. The traditional top 5 companies were led by Chevron and Total Group, while Exxon Mobil scored more poorly. However, it has to be highlighted that standard deviation was very high for this measure and that there were substantial yearly variations for some firms, such as Suncor Energy, Equinor, and Indian Oil Corp. (Appendix 7).

	ADOI of firms' filed patent families	95% confidence interval	
		min.	max.
Suncor Energy	0.391	0.324	0.459
Equinor	0.299	0.272	0.326
SK Innovation Corp.	0.286	0.252	0.320
Chevron	0.281	0.269	0.293
Total Group	0.260	0.247	0.274
Royal Dutch Shell	0.258	0.250	0.267
Indian Oil Corp.	0.253	0.184	0.322
BP	0.253	0.240	0.266
Repsol	0.245	0.189	0.301
Exxon Mobil	0.231	0.224	0.238
Eni	0.230	0.214	0.245
Reliance Industries	0.223	0.185	0.261
PetroChina	0.216	0.169	0.263
ConocoPhillips	0.195	0.181	0.209
Saudi Basic Industries Corp.	0.187	0.175	0.199
INPEX Corp.	0.125	0.085	0.165
Average	0.242	0.238	0.246

Table 5 - Average ADOI score for patent family applications—breakdown per company

We also looked at the ADOI potential induced by the firm's knowledge base, which is less sensitive to patenting practices (Table 6) and can be interpreted as showing innovation potential related to the firm's knowledge base originality itself. The ranking is different from the ADOI average based on filed patent family; by the new measure, Exxon Mobil and Royal Dutch Shell were leading the market (more details are available Appendix 8).

	ADOI of firm's knowledge base average	95% confidence interval	
		min.	max.
Exxon Mobil	0.616	0.605	0.627
Royal Dutch Shell	0.609	0.597	0.620
Saudi Basic Industries Corp.	0.599	0.580	0.618
Chevron	0.590	0.575	0.606
BP	0.558	0.543	0.573
Total Group	0.555	0.537	0.573
Indian Oil Corp.	0.545	0.478	0.612
SK Innovation Corp.	0.529	0.496	0.562
ConocoPhillips	0.528	0.510	0.546
Eni	0.512	0.492	0.532
Reliance Industries	0.478	0.438	0.517
Equinor	0.469	0.435	0.503
Suncor Energy	0.468	0.417	0.519
INPEX Corp.	0.446	0.380	0.512
Repsol	0.446	0.391	0.500
PetroChina	0.350	0.286	0.414

Table 6 - Average ADOI score for firm's knowledge base—breakdown by company

6.4. Knowledge search modes and technological originality

In this section we analyzed what knowledge search mode derived from the taxonomy developed for the purpose of the article, conduced to the highest originality score for the designed inventions. We crossed the two variables *Knowledge search mode*, computed according to our taxonomy, and *ADOI per patent family applications*. The detailed analysis results and t-tests are presented in Table 7 and a synthesis in Figure 8.

	ADOI average score per filed patent families	95% confidence interval		p-value
		min.	max.	
Refinement mode	0.160	0.156	0.165	p < 0.001
Absorption mode	0.279	0.273	0.285	p < 0.001
Clustering mode	0.387	0.376	0.397	p < 0.001
Recomposition mode	0.466	0.448	0.484	p < 0.001

Table 7 - Analysis ADOI score and knowledge search mode

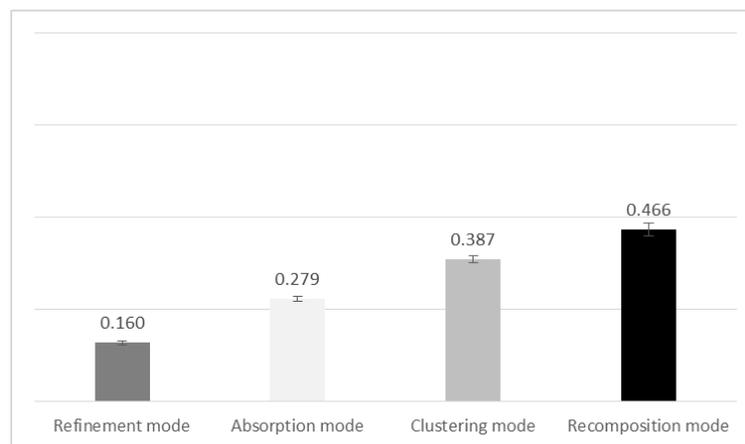


Figure 8 - Graph of ADOI score and knowledge search mode

Thus, for the oil & gas industry, we obtained a clear hierarchy for which knowledge modes gain the highest scores for technological originality. The refinement mode is the least helpful in this regard, with a very low average score of 0.16; at the opposite end, recomposition is the most helpful mode for technological originality in this industry, and is also the mode that accounted for the fewest patent families (3.5% of all the patent families in the sample). Clustering and absorption modes were respectively the second- and third-most helpful knowledge search practices in terms of outcome technological originality.

7. DISCUSSION & CONCLUSION

7.1. Theoretical implications

In this research, we examined firms' knowledge search practices to support the design of new inventions. We departed from the extant literature by (1) proposing a formal taxonomy of how firms combine knowledge components to design new inventions depending on their degree of reliance on their own knowledge base components and structure and (2) by exploring the relationship between the design of technologically original inventions and the selected knowledge search mode. The formal model was operationalized using patent data and network theory techniques and was applied to a set of companies in the oil & gas industry. The study findings have several important implications for research in the innovation and design field in this industry and in general, as explained next.

First, extant innovation literature shows that firms can combine knowledge components searched locally or distantly in order to design new inventions. Yayavaram and Ahuja (2008) and Yayavaram and Chen (2015) highlighted that firms need to focus both on finding new knowledge components and on reconfiguring the couplings between those components. However, in the literature, no in-depth analysis of how firms rely both on their previous knowledge base—components and structure—and on sourcing knowledge externally to design new inventions was found. We developed a taxonomy based on four knowledge search modes describing knowledge component combinations for a given invention: (1) refinement, (2) clustering, (3) absorption and (4) recomposition. The taxonomy was elaborated through backward reasoning by exploring the effects of a new invention on the firm's previous knowledge base structure. Our model sheds light on both the design of new inventions and the associated creative process in relation to the firm's knowledge base. The taxonomy was implemented by relying on patent data: we used the International Patent Classification (IPC) to proxy knowledge components and IPC patent co-classifications to proxy knowledge component structures.

Second, we showed to what extent firms relied on the four knowledge search modes in a specific industry, oil & gas. Based on the analysis of 16 key players in this market, we showed that firms mainly designed new inventions by relying solely on their already mastered knowledge components and pre-existing combinations, as the refinement mode accounted for 47.0% of our sample. This gives new insight on Strumsky and Lobo (2015), who found that, across all firms in all industries, 52% of designed inventions reuse a set of similar knowledge components and associated structures existing in the USPTO database. Here, we showed that

in addition, firms were reusing sets of similar knowledge components and associated structures existing in their own knowledge base. It has to be highlighted that innovation in the oil & gas industry has been driven by incremental innovation for a long time; it has even been considered an industry of “medium-low R&D intensity” (Moncada-Paternò-Castello *et al.*, 2010, p. 527). When reviewing the technological originality of the refinement knowledge search mode, we found that it scored the lowest of the four tested modes as well as very low in absolute terms (0.16). This means that the set of combined knowledge components used when designing new inventions had been already extensively used in global technological history as sourced through USPTO-filed inventions.

Third, we reviewed the absorption knowledge search mode, which consists in designing new inventions by integrating new knowledge components without major changes in the previous knowledge structure (apart from the new knowledge components themselves). As this implies, this knowledge search mode requires the usage of distant-searched knowledge. Either of two assumptions, or one assumption encompassing two alternatives, can be made regarding the source of this knowledge: either the new knowledge component has been developed through completely new greenfield research projects within the company, or it has been sourced externally by firm acquisitions or partnerships (academia, inter-industry or intra-industry). It is highly probable that the latter approach is more extensively used by firms, as developing new greenfield projects with almost no relations with an established firm’s previous expertise would be a rare event. The absorption mode was widely diffused among the 16 firms in our sample (at 37.9%). It echoes the concept introduced by Cohen and Levinthal (1990) of *absorptive capacity*, which assumes that firms (1) recognize and understand new external knowledge, (2) assimilate valuable external knowledge, and (3) apply assimilated external knowledge (Lane *et al.*, 2006). Among the top 5 oil & gas firms, Exxon Mobil and BP have particular expertise in this domain, as respectively 58.9% and 47.3% of their inventions are designed through this knowledge search mode (making it their most used design mode). Furthermore, as knowledge components in this mode are mainly sourced externally, it refers to open innovation practices (Chesbrough, 2003), practices that firms in the oil & gas industry in the sample have also extensively embraced, as highlighted by our expert interviews and by Perrons (2014). Nevertheless, on average, technological originality score is relatively low for this mode (i.e., 0.279), in particular compared to the recombination mode. This means that, on average, the knowledge components sourced and combined by firms using this mode have also previously been extensively combined in the global technical landscape. Firms that extensively rely on this mode could face difficulties recognizing radically new industry knowledge, as supported by Perrons' (2014)

finding that major firms in this sector prefer to be “fast followers” regarding new technology advancements due to high cost implications in case of failure. However, these firms could also face difficulties in the transformative learning stage when mirroring new knowledge components using more familiar firm components.

Fourth, the knowledge search mode that conduces to the highest technological originality score is the recomposition mode, which implies new inventions based on major changes regarding firm’s knowledge base structure, potentially associated with new knowledge components. This mode was the least represented on average in the sample, as it only accounted for 3.5% of the designed inventions. In fact, 7 firms out of 16 in the sample filed fewer than 10 INPADOC family patent applications through that knowledge search mode. Furthermore, it was consistently the least developed knowledge search mode among the 16 firms in the sample, and SK Innovation Corp., BP, and Total Group were only three firms with more than 5% of inventions designed through it in their portfolios. The low occurrence of this mode in our sample seems to show that designing new inventions through this mode is particularly challenging for firms. Indeed, our expert interviews showed that even in the top 5 companies, historical silos were strong (for example, between oil & gas exploration business units or refining & chemical business units). Mirroring knowledge components that the firm is familiar with but that have to be considered distant from the firm’s inventor would be a complex task, but it has been shown in the literature that combining knowledge the firm is familiar with and new knowledge components is generally associated with high innovation performances (Ahuja et Lampert, 2001 ; Katila et Ahuja, 2002 ; Yayavaram et Chen, 2015). Our results for inventions designed through the recomposition mode when specifically including new knowledge components, support these findings (Appendix). Furthermore, we also showed that inventions designed through the recomposition mode without including new knowledge components also recorded high technological originality scores (0.44 on average, higher than the three other modes—see Appendix). While combining knowledge components with which the firm is familiar has in the past been mainly associated with learning traps (Ahuja et Lampert, 2001), focusing on knowledge couplings and the distance between combined knowledge components is a promising new areas of research. The findings also highlight the fact that the distinction between local and distant knowledge at firm level should also be envisioned at firm’s inventor level.

7.2. Practical implications

The study helps us understand how firms combine knowledge either from their knowledge base or gained through new knowledge development or external sourcing. The methodology can be leveraged by firms to identify and understand their main modes of knowledge search in order to design new inventions and processes as well as to understand how these modes have evolved over time and how their competitors are designing new inventions in a given industry. It could also provide support to design organizational learning process and set strategic objectives in terms of the knowledge search modes that the firm may undertake in the future. Finally, it can be leveraged as a tool to better understand and predict invention dynamics in the sector.

The study also sheds light on silo issues in organization learning. As recomposition mode conduced to the highest technological originality score, this mode favors organizations that are able to share their expertise towards their silos, without necessarily accessing new external knowledge components. Furthermore, it also implies a challenge to the management of open innovation strategies, as we consider that open innovation is the main model associated with the access to new knowledge components. For example, external collaborations should be driven not only by absorbing external knowledge to develop a given invention or to answer temporary needs; in addition, to maximize technological originality, external collaborations should be managed by gathering multiple firms' expertise with the externally sourced new components. It should also be highlighted that open innovation strategies and organizational learnings could focus more on bridging firm's expertise among silos, potentially by the usage of external knowledge components.

7.3. Limitation and further research

The first limitation of the study concerns the generalizability of the results. The knowledge search taxonomy developed was applied only to one industry and to a restricted sample of firms. Nevertheless, we were able to perform the analysis on a large dataset of inventions (19,863), and we conducted explorative semi-structured expert interviews to validate the model's consistency. Extending our methodology through a larger sample of firms and industries will be a worthwhile avenue for future research. In particular, in-depth qualitative analysis of organizational implications of each knowledge search mode could help the understanding of knowledge search practices.

Second, we only focused here on the technological originality of the studied inventions, whereas other techniques could be applied to measure technological originality and examine whether similar results are found when using, for example, semantic analysis or citation data. In addition, other innovation performance indicators could be reviewed at firm level, in particular financial data or numbers of new launched products. We also see room for further research exploring mitigating variables, such as knowledge complexity, R&D intensity, spending, or reliance on basic science. Further research could also look at how mastering a combination of the four knowledge search modes at different levels could favor R&D efficiency.

Third, the findings contribute to the absorptive capacity and open innovation fields, as the various knowledge search modes encompass new knowledge components or combinations of knowledge components in the firm's knowledge base, some of which may have been sourced externally. We did not control for partnership effects or acquisitions. Looking at the extent to which these practices help the design of original inventions and how this relates to knowledge search modes could also be fruitful areas of research. Furthermore, heeding the call of Yayavaram and Ahuja (2008) to look closely at both the combination of knowledge and knowledge components, it would be interesting to look at whether open innovation practices favor new knowledge component sourcing or new combinations.

Fourth, our model is dependent on the usage of patents as a proxy for firm's knowledge base. Patenting activities, however, are subject to several biases, in particular related to competitive landscape and firm's intellectual property business units' practices. Other research could benefit from the usage of a different proxy for firm's knowledge base, such as academic publications, or from more fine-grained qualitative analysis. It could be promising in particular to explore the case of small firms with no or limited patent portfolios.

Fifth, the knowledge clustering mode received a high ADOI score, an intriguing research result. In particular, knowledge components combined were familiar from the firm's standpoint and the knowledge was considered local also from the firm's inventor's standpoint. The low share of the clustering knowledge mode in the firm's inventions portfolio could indicate that firms are highly fragmented and silos effects are impacting the design of new inventions at a sub-business-unit level. Further research could benefit from exploring this mode in depth to determine what causes this effect.

In summary, this study has yielded several findings that can be useful for both theory and practice. We have argued that an in-depth taxonomy of how firms are relying on their knowledge base and new knowledge acquisition to develop new inventions, focusing both on

knowledge components and knowledge structures and their effects, will help in the understanding of the innovation process. We also showed that designing inventions that combine knowledge components that the firm is familiar with but that are considered distant from a firm's inventor's perspective leads to high technological originality. A greater understanding of the organizational learning practices associated with this finding may offer great potential to understand firms' innovation performance.

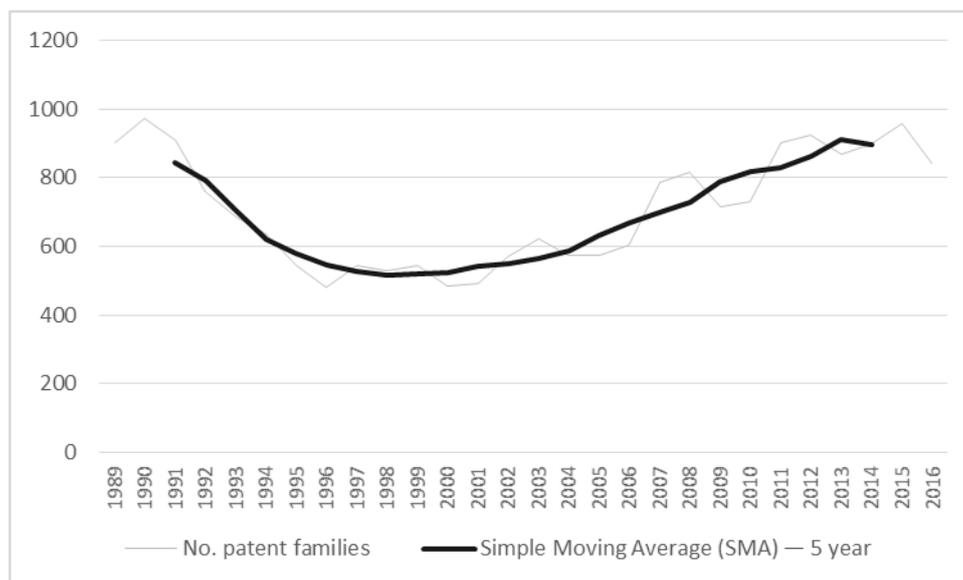
8. Appendix :

Company	Nationality	No. patent families	Breakdown no. patent families per decade					No. utility patents
			1980 — 1989	1990 — 1999	2000 — 2009	2010 — 2019		
BP	United Kingdom	5,406	2,509	1,592	816	489	12,437	
Chevron	United States of America	5,598	2,374	1,073	1,060	1,091	13,281	
ConocoPhillips	United States of America	4,060	1,991	1,107	505	457	8,492	
Eni	Italy	1,907	387	679	447	394	5,217	
Equinor	Norway	823	46	170	273	334	1,876	
Exxon Mobil	United States of America	14,113	5,389	3,681	2,693	2,350	40,122	
Indian Oil Corp.	India	173	-	15	37	121	350	
INPEX Corp.	Japan	93	1	2	33	57	363	
PetroChina	China	260	-	5	58	197	438	
Reliance Industries	India	360	4	10	52	294	841	
Repsol	Spain	185	-	51	44	90	436	
Saudi Basic Industries Corp.	Saudi Arabia	2,995	14	91	727	2,163	8,029	
Royal Dutch Shell	Netherlands	8,793	2,505	2,218	2,125	1,945	22,874	
SK Innovation Corp.	Korea	680	-	-	167	513	1,787	
Suncor Energy	Canada	123	37	18	28	40	286	
Total Group	France	3,093	388	640	871	1,194	9,359	
Total	-	48,662	15,645	11,352	9,936	11,729	126,188	

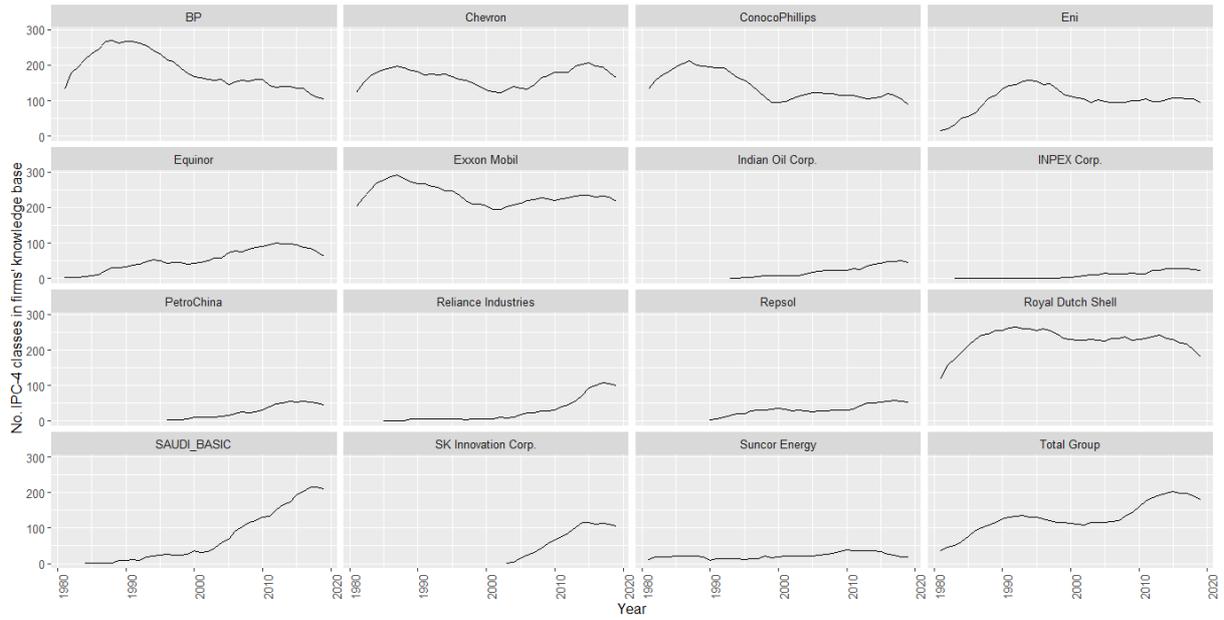
Appendix 1 - Original data set breakdown by firm

IPC-4 Class ID	Description	Occurrence
B01J	CHEMICAL OR PHYSICAL PROCESSES (CATALYSIS, COLLOID, etc.)	5,885
C07C	ACYCLIC OR CARBOCYCLIC COMPOUNDS	4,607
C10G	CRACKING HYDROCARBON OILS; PRODUCTION OF LIQUID HYDROCARBON MIXTURES	3,996
C08L	ORGANIC MACROMOLECULAR COMPOUNDS	2,664
C08F	MACROMOLECULAR COMPOUNDS OBTAINED BY REACTIONS ONLY INVOLVING CARBON-TO-CARBON UNSATURATED BONDS	2,400
B01D	CHEMICALS OF PHYSICAL PROCESSES OF SEPARATION	1,916
E21B	EARTH OR ROCK DRILLING	1,883
C10M	LUBRICATING COMPOSITIONS	1,646
C01B	NON-METALLIC ELEMENTS (FERMENTATION, ELECTROLYSIS, ELECTROPHORESIS)	1,615
C08G	MACROMOLECULAR COMPOUNDS OBTAINED OTHERWISE THAN BY REACTIONS ONLY INVOLVING CARBON-TO-CARBON UNSATURATED BONDS	1,383
C10L	FUELS NOT OTHERWISE PROVIDED FOR; NATURAL GAS; SYNTHETIC NATURAL GAS OBTAINED BY PROCESSES	1,379
C08K	USE OF INORGANIC OR NON-MACROMOLECULAR ORGANIC SUBSTANCES AS COMPOUNDING INGREDIENTS	1,359
C08J	WORKING-UP; GENERAL PROCESSES OF COMPOUNDING	1,181
C07B	GENERAL METHODS OF ORGANIC CHEMISTRY	1,067
C09K	CHEMISTRY MATERIALS FOR APPLICATIONS NOT OTHERWISE PROVIDED FOR	1,049
C10N	PETROLEUM, GAS, OR COKE INDUSTRIES; TECHNICAL GASES CONTAINING CARBON MONOXIDE; FUELS; LUBRICANTS; PEAT	984
G01V	GEOPHYSICS; GRAVITATIONAL MEASUREMENTS; DETECTING MASSES OR OBJECTS	786
B32B	LAYERED PRODUCTS, i.e., PRODUCTS BUILT-UP OF STRATA (FLAT OR NON-FLAT)	709
G01N	ANALYSING MATERIALS BY DETERMINING THEIR CHEMICAL OR PHYSICAL PROPERTIES	686
C07D	HETEROCYCLIC MACROMOLECULAR COMPOUNDS	682

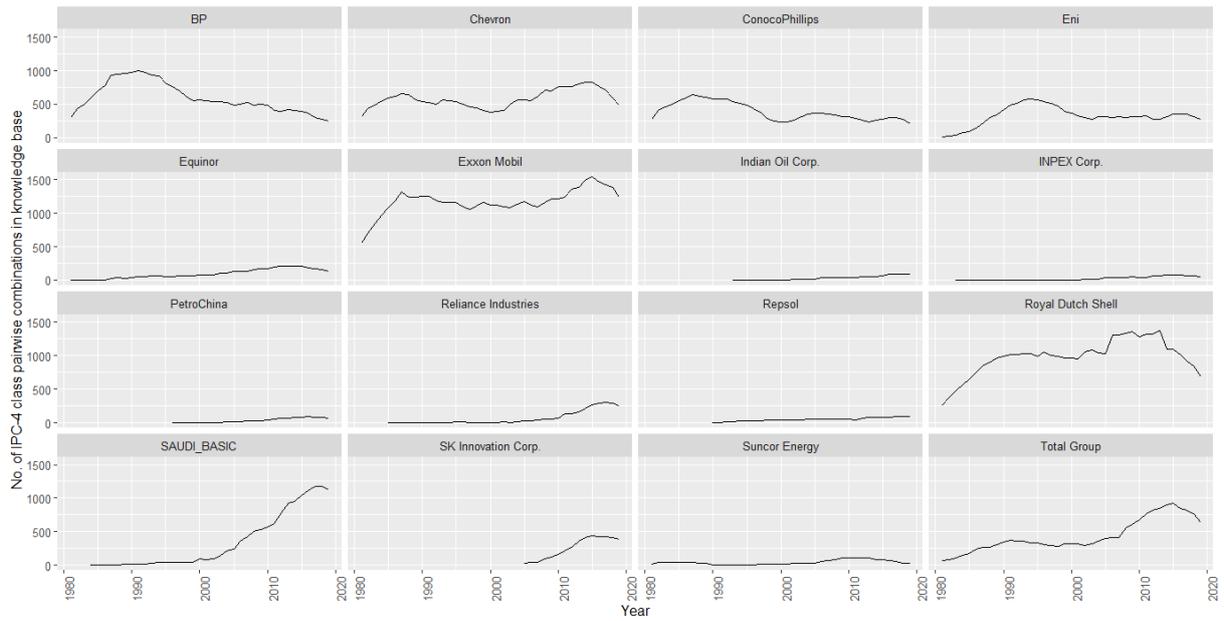
Appendix 2 - Top 20 IPC-4 classes and description in the sample



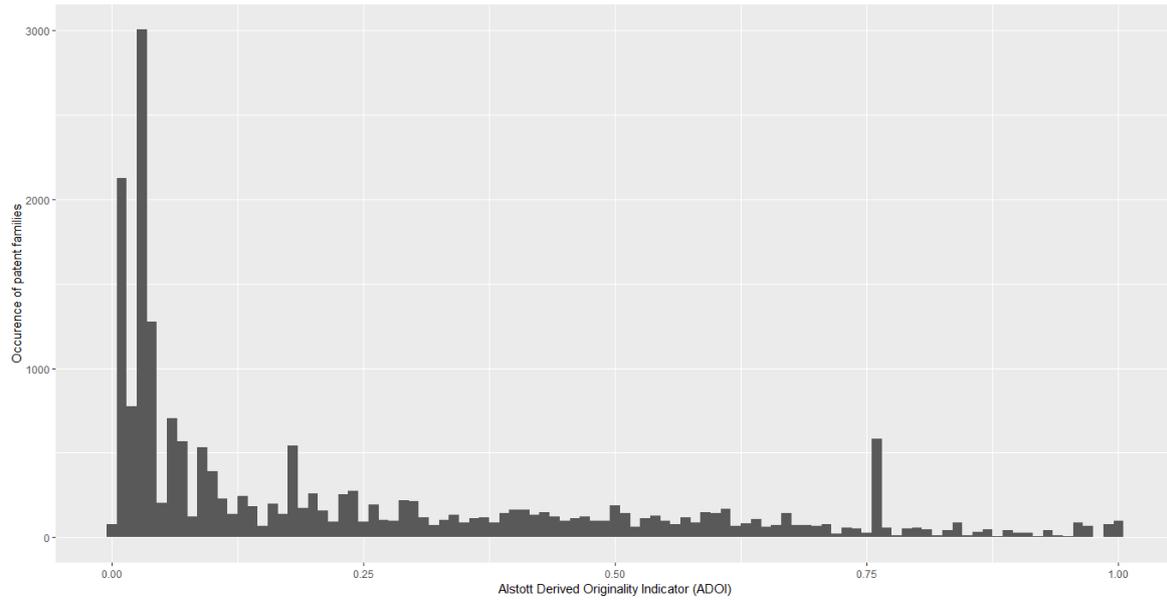
Appendix 3 - Number of INPADOC patent family applications in the sample per year



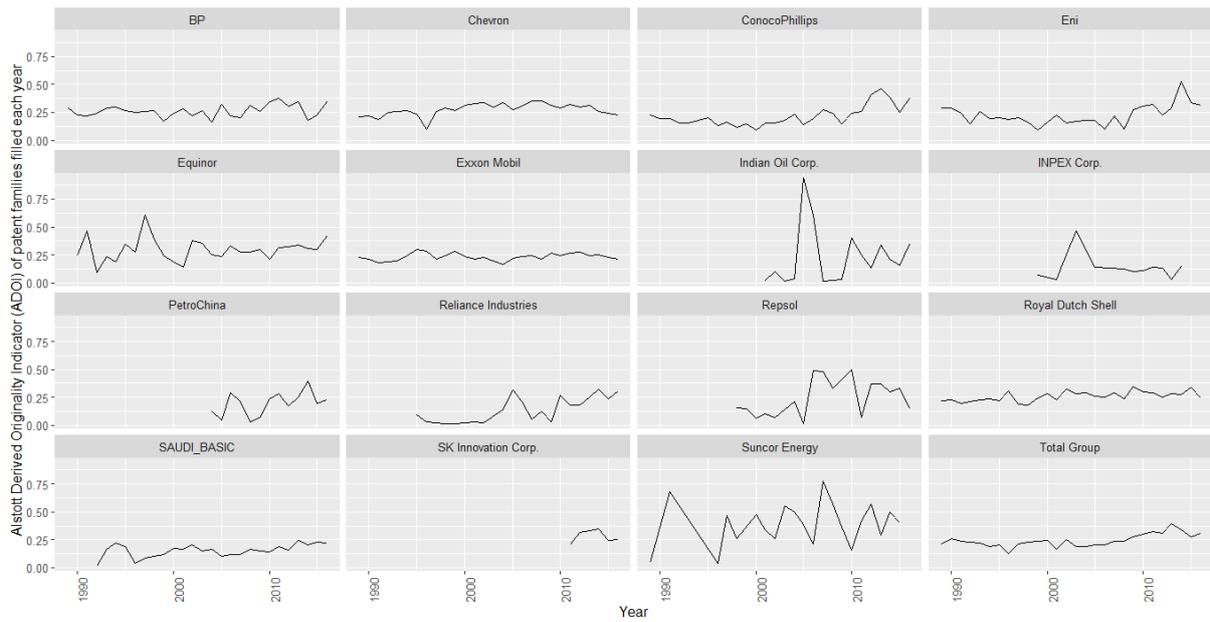
Appendix 4 - Number of IPCs per year in firm's knowledge base



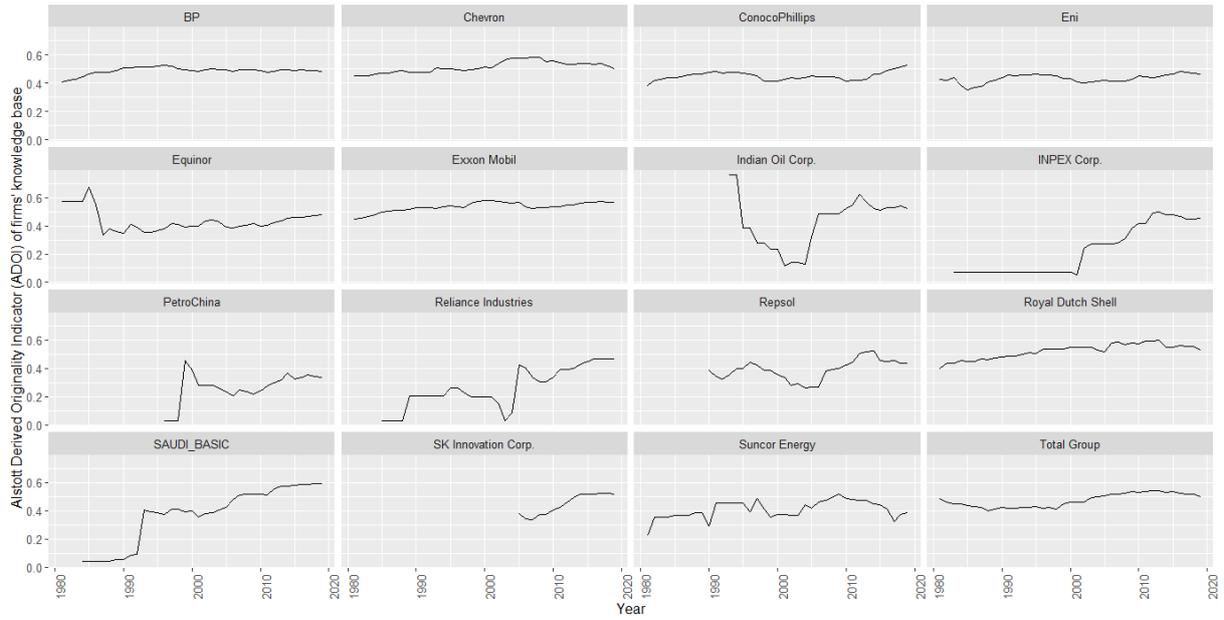
Appendix 5 - Number of IPC pairwise combinations in firm's knowledge base



Appendix 6 - ADOI histogram for the sample



Appendix 7 - ADOI of yearly patent family application average



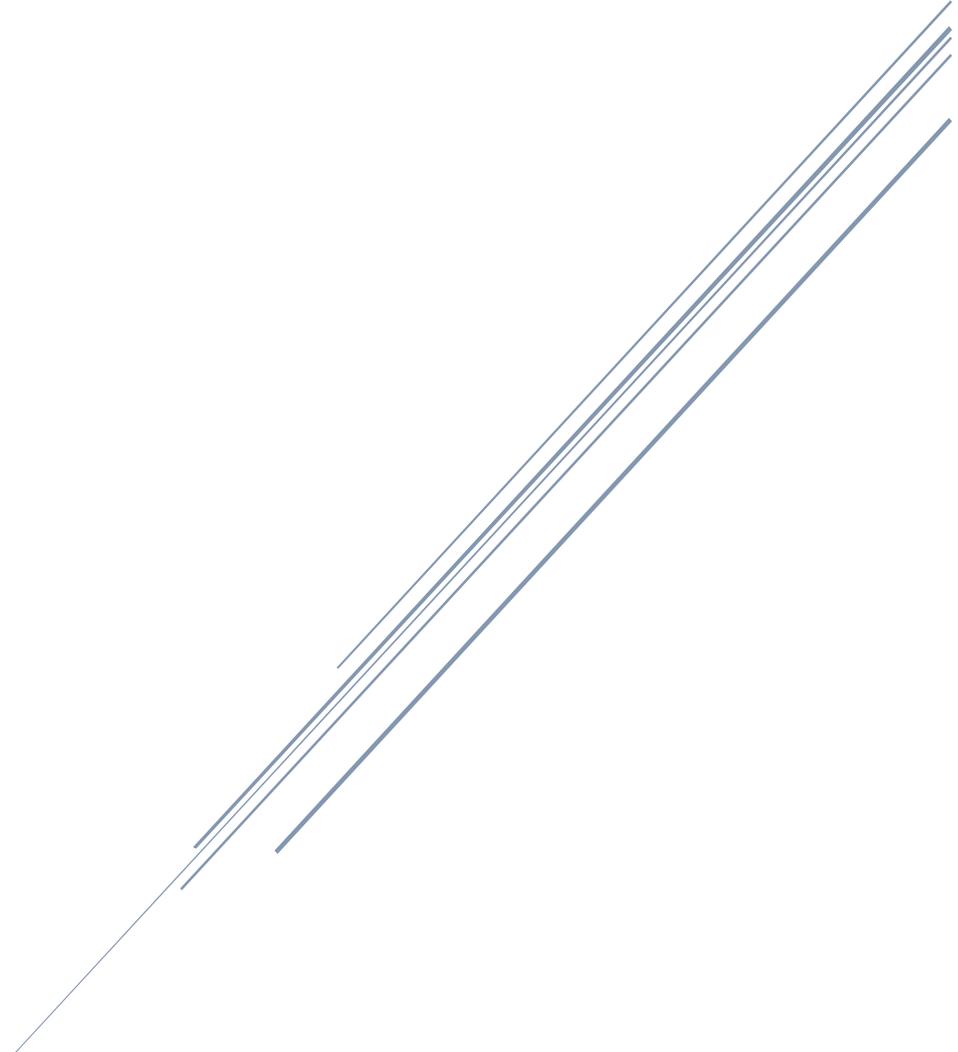
Appendix 8 - ADOI applied to firm's knowledge base

	ADOI of recombination mode inventions	95% confidence interval		Occurrence	Share of recombination mode	p-value
		min.	max.			
Recomposition mode - without new knowledge components	0.448	0.427	0.469	528	76.6%	p < 0.001
Recomposition mode - with new knowledge components	0.525	0.494	0.555	161	23.4%	p < 0.001
Recomposition Mode - average	0.466	0.448	0.484	689	100.0%	p < 0.001

Appendix 9 - Analysis ADOI score and recombination mode—details

ESSAI N°4

Crises sanitaires et contributions industrielles à la recherche scientifique : le cas des coronavirus



Thème	Détail
Auteurs	• Quentin Plantec, Clément Sternberger, Pascal Le Masson, Benoît Weil
Présentations conférences	• V1 : <i>Summer school on data & algorithms for science, technology and innovation studies</i> (KU Leuven, OEB), Louvain, Belgique (en ligne)
Soumission	• <i>La Revue Française de Gestion</i> (en cours de révision)
Langue	• Français

CRISES SANITAIRES ET CONTRIBUTIONS INDUSTRIELLES A LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE : LE CAS DES CORONAVIRUS

Quentin PLANTEC, Clément STERNBERGER, Pascal LE MASSON & Benoit WEIL

RESUME : Cette contribution vise à s’interroger sur le rôle des industriels dans la recherche académique en lien avec la lutte contre les crises, ici sanitaires. Alors que les industriels se sont largement désengagés de la publication académique depuis les années 1990, nous nous demandons si la survenue d’une crise est un catalyseur d’une ré-implication dans la recherche académique ouverte, qui vise à faciliter la circulation et le partage des connaissances scientifiques. Nous nous interrogeons également sur les régimes d’actions qui permettent à l’industrie de maximiser son impact scientifique. Dans cette étude, nous étudions sur longue période la contribution des industriels au champ de recherche sur les coronavirus et analysons les effets de trois crises successives : SARS-Cov1, MERS-Cov, Cov-19. Pour cela, nous nous appuyons sur environ 19 000 publication scientifique sur cette thématique, complété par l’analyse de environ 1 600 brevets et 270 projets de vaccins contre la covid-19. Nos résultats indiquent que les crises engendrent un afflux d’acteurs nouveaux et de nouvelles collaborations des industriels dans la recherche scientifique. Nous avons également identifié des leviers qui permettent de favoriser l’impact scientifique. Premièrement, la collaboration avec un OPR et un hôpital si et seulement si des relations existent avant-crise. Pourtant, la majorité des collaborations pendant les crises sont nouvelles. Deuxièmement, une contribution au champ académique avant-crise. Pourtant, là encore, la majorité des contributions industrielles pendant les crises sont réalisées par des primo-entrants. Nous concluons cette étude en discutant les leviers managériaux et organisationnels qui pourraient encourager l’impact industriel pendant les crises.

REMERCIEMENTS : Nous souhaitons remercier pour leurs conseils Nicolas Sennequier (INPI), Frédéric Caillaud (WIPO), ainsi que les participants de la *.Summer school for Data and Algorithms on ST&I studies 2020*

CRISES SANITAIRES ET CONTRIBUTIONS INDUSTRIELLES A LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE : LE CAS DES CORONAVIRUS

Si l'arrivée des premiers vaccins contre la Covid-19 fin décembre 2020, dans un temps record par rapport aux standards de l'industrie, permet d'entrevoir la fin de la crise sanitaire, c'est aussi le résultat d'efforts colossaux de recherche scientifique pour comprendre et lutter contre cette maladie nouvelle. Dès le début de la crise, les Organismes Publics de Recherche (OPR) — c'est-à-dire les laboratoires de recherche financés par les Etats, ou en lien avec des universités ou des écoles — se sont mobilisés avec une rapidité jusqu'alors inégalée. Un accent particulier a été mis sur une science académique plus ouverte, facilitant la circulation rapide des connaissances. Par exemple, la séquence complète du virus a été partagée par des scientifiques chinois de Wuhan dès le 11 janvier 2020¹¹⁴, les revues scientifiques de référence comme *Nature* ou *Science* ont ouvert l'accès à leurs articles et données sur la Covid-19, et l'usage des pré-imprimés s'est fortement développé.

Bien sûr, les OPR ne sont pas seuls à mener des activités de recherche scientifique : les entreprises privées s'y investissent également largement¹¹⁵. Sans surprise, de nombreux industriels se sont mobilisés très tôt pour produire les connaissances scientifiques nécessaires au développement et à la production d'un vaccin ou d'un médicament contre la Covid-19¹¹⁶. Leurs profils et leurs modes d'actions sont cependant étonnamment variés : *Moderna* la biotech américaine qui développe de nouveaux vaccins à ARN messagers et qui travaille pour la première fois sur les coronavirus, *British American Tobacco*¹¹⁷ l'industriel éloigné de la pharmacie qui mobilise ses ressources sur les molécules de tabac comme solution de lutte contre le virus, ou encore *Merck*¹¹⁸ un *Big Pharma* déjà impliqué dans la lutte contre le SARS-Cov1 et le MERS-Cov et qui s'était associé à l'Institut Pasteur pour son projet de vaccin.

Si les activités de recherche des OPR mettent l'accent sur une science « ouverte » (par la publication académique et la revue par les pairs) et la circulation rapide des connaissances, la recherche industrielle est souvent vue comme adepte du secret, des barrières à la publication

¹¹⁴ <https://www.pasteur.fr/fr/espace-presse/documents-presse/institut-pasteur-sequence-genome-complet-du-coronavirus-sars-cov-2>

¹¹⁵ En France en 2018, les dépenses intérieures françaises de Recherche et Développement (R&D) des industriels étaient +32% plus élevées que celles des OPR (source MESRI). S'il peut être argué que ce chiffre s'explique par des activités de développement plus coûteuses, les chiffres américains (qui autorisent une classification plus fine) montrent que 20% des dépenses totales des entreprises en R&D en 2017 étaient dédiées aux activités de recherche pures (source NSF).

¹¹⁶ En compte plus d'une cinquantaine d'industriels différents s'impliquant dans la production de vaccins, chiffres à décembre 2020, <https://www.raps.org/news-and-articles/news-articles/2020/3/covid-19-vaccine-tracker>

¹¹⁷ « Coronavirus : vers un vaccin grâce à des feuilles de tabac », *Les Echos*, ed. 01/04/2020

¹¹⁸ « L'Institut Pasteur s'allie au géant pharmaceutique américain MSD pour développer un vaccin contre le Covid-19 », *L'Usine Nouvelle*, ed. 26/05/2020

(Blumenthal *et al.*, 1996), avec des résultats néfastes à long terme sur la production de connaissances (Toole et Czarnitzki, 2010). L'éthique de la recherche des industriels est parfois même mise en doute, ce qui fut malheureusement le cas du scandale de *Surgisphere* (entreprise impliquée dans une publication fallacieuse dans *The Lancet* sur la Covid-19¹¹⁹). Toutefois, les industriels sont également des contributeurs majeurs de la recherche scientifique, y compris par la publication d'articles académiques dans des revues classées. Disposant parfois de moyens financiers, techniques et matériels supérieurs à leurs pairs des laboratoires publics, les industriels peuvent être en mesure de faire des découvertes scientifiques d'importance (Gulbrandsen et Smeby, 2005), notamment lorsqu'ils travaillent en collaboration avec des OPR (Bikard, Vakili et Teodoridis, 2019).

Face à des crises d'ampleurs, nous pouvons chercher à mieux comprendre leurs effets sur les travaux de recherche scientifique menés par les industriels. Ce questionnement a d'abord un intérêt théorique pour les sciences de gestion. Si l'apport de connaissances scientifiques des OPR à l'industrie est systématiquement plébiscité¹²⁰ malgré des difficultés d'absorption, à minima, la contraposée pose question (Perkmann *et al.*, 2021). D'une part, l'effet positif des collaborations entre industriels et OPR sur la génération de découvertes scientifiques conduit à des oppositions théoriques fortes¹²¹. D'autre part, la capacité de l'industrie à prendre part à des travaux de recherche fondamentale sans recourir à la collaboration est discutable compte tenu d'un désengagement massif dans ces activités depuis les années 1980 (Arora, Belenzon et Pataconi, 2018). Ici, nous contribuons à cette littérature en apportant une perspective nouvelle et d'actualité à ces questionnements : celle de l'effet des crises sur les contributions des industriels à la recherche scientifique. En effet, elles appellent nécessairement les acteurs à engager un renouveau stratégique (Tannery, 2009) par la prise de décisions et des adaptations rapides face à un environnement changeant. Comme l'indique Mithani (2020), d'une part, ces décisions stratégiques peuvent conduire à des changements pérennes dont il est utile d'étudier la genèse face à cette « nouvelle normalité » (*new normal*). D'autre part, analyser les régimes d'actions des organisations face aux crises permet d'en explorer la résilience et de mieux préparer les crises futures.

Notre démarche est également d'intérêt pour les praticiens et les décideurs publics. La question de l'efficacité des industriels pour favoriser des découvertes scientifiques pose la

¹¹⁹ « Covid-19 : les dessous de Surgisphere, l'entreprise de données dans la tourmente avec l'affaire du Lancet », Sciences & Avenir, ed. 11/06/2022

¹²⁰ Voir les théoriciens de la croissance endogène par exemple comme les travaux de P. Aghion.

¹²¹ Pour une synthèse, voir la revue de littérature dans Bikard & al. (2019) ou Perkman & al. (2021)

question de la répartition des fonds publics entre industriels et OPR. Pendant la crise du Covid-19, alors que certains scientifiques ont relayé des difficultés de financement¹²², des industriels se sont vus accorder des aides étatiques massives pour financer leurs travaux de recherche pourtant encore à des stades très amont¹²³. Nous pouvons également nous interroger sur des outils de gestion qui soutiendraient les régimes d'actions les plus propices aux découvertes scientifiques pendant les crises. Ce sujet est d'importance notamment en France où le manque d'une réponse industrielle à la crise du Covid-19 est pointé du doigt¹²⁴.

Ainsi, nous analysons le cas de la recherche scientifique sur les coronavirus, sur longue période, et mettons en exergue les effets des crises du SARS-Cov1, du MERS-Cov et de la Covid-19. Nous commençons par étudier à partir de la littérature en sciences de gestion les régimes d'actions qui pourraient être adoptés par les industriels en période de crise. Nous utilisons ensuite des méthodes issues de la bibliométrie pour analyser la dynamique de leurs contributions en étudiant sur 20 ans près de 20 000 publications scientifiques sur les coronavirus. Ces données sont complétées par l'analyse de 267 projets de vaccins contre la Covid-19 et de près de 1 600 brevets déposés sur les coronavirus. Ces choix méthodologiques permettent d'étudier au niveau mondial, les régimes adoptés par les industriels en crise et hors crise, et d'en évaluer la performance. Nous discuterons ces résultats au regard des sciences de gestion et tenterons de définir des outils pour favoriser les découvertes scientifiques des industriels en période de crise.

1. Recherche scientifique et pandémie : quelle place et quels effets sur l'industrie ?

Cette section vise, en s'appuyant sur la littérature en sciences de gestion, à déterminer le régime nominal à l'œuvre hors crise (1.1), et à discuter le potentiel d'une intervention accrue de l'industrie en période de crise (1.2), et ses formes (1.3).

1.1. Hors crise : la prévalence du modèle linéaire

À partir des années 1980, l'industrie s'est massivement désengagée de la science pour se focaliser sur les activités de développement (Arora et al., 2018). Dans la pharmacie, l'apparition

¹²² « Face aux coronavirus, énormément de temps a été perdu pour trouver des médicaments », *Le Monde*, ed. 29/02/2020

¹²³ Voir le cas Johnson & Johnson qui a obtenu 546 millions de dollars par le gouvernement américain pour supporter ses recherches sur un hypothétique vaccin. « Vaccin contre le Covid-19 : qui sont les laboratoires engagés dans la course avec Sanofi ? », *Cellule investigation de Radio France*, ed. 14/05/2020

¹²⁴ « Vaccin : comment expliquer le fiasco français », *Libération*, ed. 02/03/2021

à cette période des biotechnologies et de médicaments adaptés aux spécificités génétiques de chaque patient a conduit à une augmentation des taux d'échecs et un accroissement des coûts de R&D (Deroy, 2008) dans un contexte budgétaire défavorable aux *big pharmas* (Abecassis et Coutinet, 2008). L'industrie pharmaceutique s'est alors davantage tournée vers le développement de médicaments, plutôt que la recherche amont. Les OPR, aux côtés des hôpitaux, ont donc une place tout à fait hégémonique dans les activités scientifiques de ce secteur, par nature plus incertaines et donc plus coûteuses (Bonhomme et al., 2005 ; Hamdouch et Perrochon, 2000).

Les OPR et l'industrie pharmaceutique s'inscrivent ainsi dans une division séquentielle de la recherche sur les pathogènes (Hamdouch et Perrochon, 2000). D'abord (1) des activités de création de nouvelles connaissances scientifiques (études épidémiologiques, séquençage ADN, etc.) qui donnent lieu à des publications académiques et qui sont menées principalement par les OPR ; puis (2) des activités de développement de nouveaux produits (vaccins, médicaments) qui donnent lieu à des brevets et qui sont menées principalement par les industriels. Ce système, qui fait écho au *modèle linéaire* de V. Bush (1945)¹²⁵, apparaît de plus en plus marqué : avec l'émergence des biotechnologies, la plupart des entreprises leaders n'ont pas internalisées ces nouvelles pratiques dans leurs propres capacités de recherche et sont contraintes de s'appuyer plus largement sur la recherche publique (Abecassis et Coutinet, 2008). Il faut souligner que dans un tel système, c'est bien le cloisonnement des activités qui favorise les percées scientifiques qui alimenteront ensuite les activités de développement. En effet, cette division du travail permet de préserver la recherche amont de l'urgence et des besoins industriels à court terme qui s'avèreraient potentiellement sclérosants pour la recherche (Merton, 1973) : « *La science ne peut fonctionner qu'en élaborant elle-même ses propres questions, à l'abri de l'urgence et de la déformation inhérente aux contingences économiques et sociales* » (Rapport des états généraux de la recherche, 2004, p. 14). Mais qu'en est-il justement lorsqu'il y a urgence, face à une crise nouvelle ?

1.2. La crise comme catalyseur d'une contribution renforcée de l'industrie à la recherche scientifique

Plusieurs arguments théoriques justifient de l'intérêt singulier des contributions industrielles pour la recherche scientifique. Premièrement, l'industrie peut être une source

¹²⁵ Bush V. (1945). « *Science, the endless frontier; a report to the President on a program for postwar scientific research* ».

d'équipements, de ressources, de matériel, d'idées et de questions de recherches inédites (Gulbrandsen et Smeby, 2005). Deuxièmement, l'approche des problématiques de recherche par les industriels diffère de celle des OPR (orientation des travaux, type d'exploration, façons d'organiser les interactions entre chercheurs) ce qui favorise l'exploration de concepts scientifiques nouveaux, intégrables rapidement dans le processus de développement de produits (Evans, 2010a). Troisièmement, Stokes (1997) suggère que la poursuite de questions de recherches fondamentales tout en s'intéressant à l'usage des résultats peut favoriser les percées scientifiques. En recourant aux théories de la conception, Plantec et al. (2019) ont également montré que les interactions entre activités de développement et activités scientifiques peuvent conduire à l'identification d'anomalies scientifiques originales permettant de dépasser les fixations cognitives d'une discipline scientifique donnée, dans le contexte des biotechnologies. Quatrièmement, dans le cas de collaborations entre OPR et industriels, une division du travail féconde entre les acteurs peut favoriser les productions scientifiques à fort impact (Bikard, Vakili et Teodoridis, 2019).

Ainsi, dans certains cadres, les industriels peuvent contribuer à des percées scientifiques qui alimentent le stock des connaissances de la science par la publication académique ouverte, avec des effets positifs sur leur propre capacité à développer des produits nouveaux (Narayanamurti et Odumosu, 2016), comme des vaccins. Or, cette logique semble particulièrement intéressante en période de crise où il est nécessaire de produire rapidement de nouveaux savoirs et des outils pour sortir des crises (Le Masson, 2020). Mais nous pouvons nous interroger plus spécifiquement sur les régimes d'actions adoptés par les industriels.

1.3. La crise et ses effets sur les régimes d'actions des industriels pour la recherche scientifique

Les crises peuvent être définies comme des chocs perçus par les membres des organisations comme soudains, inattendus, et particulièrement violents, et dont l'intensité et l'origine peut varier, mais qui ont en commun un potentiel dévastateur pour les individus, la société, l'économie ou l'environnement (Pearson et Clair, 1998). En ce sens, les crises sont nécessairement un catalyseur du changement : par exemple, des décisions en gestation qui auraient été prises à moyen ou long terme peuvent être prises par anticipation, ou réévaluées avec un regard nouveau (Mithani, 2020 ; Tannery, 2009).

Wenzel, Stanske et Lieberman (2021) suggèrent qu'en période de crise, les organisations peuvent mener quatre types de stratégies : le *retranchement* qui passe par la

rationalisation des activités, la *persévérance* en poursuivant le développement initialement prévu de l'organisation, *l'innovation* en opérant un renouveau stratégique dans l'environnement incertain, ou la *sortie* du marché. Dans le cadre de la recherche scientifique, quelques études récentes dans le contexte de la Covid-19 permettent d'illustrer certaines de ces stratégies. Guderian *et al.* (2020) montrent par exemple comment certaines firmes de secteurs à haute intensité technologique ont adopté de nouveaux outils d'analyses de leurs portefeuilles de brevets pour les rationaliser (ie. *retranchement*). D'autres études ont également insisté sur le renouveau stratégique : Hanisch et Rake (2021) et Ardito, Coccia et Messeni Petruzzelli (2021) ont montré comment certaines entreprises avaient adopté de nouveaux régimes d'actions en réorientant leurs efforts de R&D vers la recherche sur le Covid-19 par l'adaptation de traitements préexistants comme le *Remdesivir*.

A notre connaissance, peu d'études analysent les effets des crises sur les régimes d'actions des industriels dans leurs activités scientifiques. Nous pouvons notamment étudier l'effet des crises sur deux caractéristiques clés de l'implication des industriels dans ces activités : le recours à la collaboration avec des OPR ou des hôpitaux, et le rôle de l'expertise préalable. Premièrement, nous avons indiqué que les industriels s'appuyaient de plus en plus sur des OPR pour leurs travaux de recherche, avec des effets positifs sur leurs performances (Bikard, Vakili et Teodoridis, 2019). Nous pouvons nous questionner sur l'impact des crises sur les collaborations, sur leur capacité à renforcer des collaborations préexistantes ou à en générer de nouvelles, et leurs effets sur les performances. Deuxièmement, la gestion de l'expertise joue un rôle clé dans les stratégies de recherche scientifique des industriels (Cabanes, Le Masson et Weil, 2020). Les experts d'un domaine sont mieux armés pour développer des savoirs scientifiques et produits associés robustes, mais de nouveaux entrants favorisent des approches plus créatives (Arts et Fleming, 2018), un élément crucial en période de crise. On peut ainsi s'interroger sur l'impact des crises sur la mobilisation d'industriels avec des expertises préalables, ou plutôt de nouveaux entrants dans la recherche scientifique sur la thématique de la crise.

Ainsi, dans cette démarche qui explore le champ de la recherche scientifique sur les coronavirus sur longue période, nous nous interrogeons d'abord sur **l'effet des crises sur les contributions des industriels à la recherche scientifique et les régimes d'actions qu'ils adoptent** (QR1), puis nous nous questionnons sur **les régimes d'actions les plus propices pour générer des percées scientifiques et de nouveaux médicaments ou vaccins** (QR2).

2. Recherche scientifique et coronavirus : organisation nominale et crises répétées

La découverte du premier coronavirus humain est ancienne et date de 1965. Les chercheurs anglais Tyrrell et Bynoe travaillent alors à l'identification des causes du rhume et réussissent à isoler une nouvelle souche virale : le premier coronavirus humain observé. Le champ de recherche académique va alors peu à peu se structurer et les travaux de recherche vont s'intensifier : plus d'une centaine de coronavirus ont aujourd'hui été découverts, dont sept affectant l'humain. En plus des besoins en production de remèdes pour l'homme, certains coronavirus affectent les élevages et les animaux domestiques : autant de marchés qui assurent une présence importante d'industriels. Par ailleurs, les acteurs de la recherche sur les coronavirus ont dû faire face à plusieurs épidémies humaines notables : SARS-Cov-1 entre 2003 et 2005 (env. 8,000 cas et 800 morts), MERS-Cov entre 2013 et 2015 (env. 1,200 cas et 450 morts) et Covid-19 en 2019-2021 (env. 125 millions de cas et 2,8 millions de morts au 27 mars 2021). Mais il faut souligner qu'il existe bel et bien un champ de recherche académique structuré sur les coronavirus qui investigate ces pathogènes dans divers contextes et situations en dehors des crises précédemment citées.

Notre objectif est d'étudier la dynamique et les formes des contributions industrielles à la recherche scientifique sur les coronavirus. Pour cela, nous avons extrait l'ensemble des publications scientifiques dans des revues à comité de lecture qui traitent de ce sujet sur la période 2000-2020. Ce choix méthodologique permet d'obtenir une vision globale et mondiale de la dynamique du champ scientifique, et le corpus comprend des publications de chercheurs affiliés à des OPR, des hôpitaux et des industriels. Or, il faut souligner ici que les industriels n'ont pas les mêmes incitations à publier que d'autres types d'acteurs. Toutefois, l'analyse de leurs publications scientifiques est intéressante, car les entreprises qui s'investissent dans ce type d'activité ont des performances en termes d'innovations et de retombées financières supérieures (Arts et Fleming, 2018 ; Basse Mama, 2018), et il existe un lien direct entre qualité des publications scientifiques et qualité des brevets (Poege *et al.*, 2019). De plus, la publication académique facilite l'adoption et la diffusion des inventions, notamment en période de crise¹²⁶. Toutefois, l'analyse ce type de données pour étudier les dynamiques de recherche des industriels n'est pas exempte de biais (délais de publications, secrets, etc.) et l'analyse de la

¹²⁶ On soulignera par exemple dans la crise actuelle les retards de déploiement créés par le manque de publications scientifiques sur l'efficacité de certains vaccins. Voir par exemple : « Vaccins à ARN messenger anti-Covid-19 : "On manque de recul, on n'a toujours pas les publications scientifiques", déplore le professeur Caumes », France Informations, ed. 08/12/2020

période récente sur la crise du Covid-19 est rendue difficile par le manque de recul. Pour pallier ces difficultés, premièrement nous avons vérifié que dans le champ de recherche sur les coronavirus, il y avait bien un lien entre engagement dans les publications académiques des industriels et quantité et impact des dépôts de brevets sur les coronavirus. Ce lien étant vérifié (voir encadré méthodologique), cela signifie qu'il est pertinent d'explorer les données de publications académiques pour mieux comprendre le rôle et les formes de contributions de l'industrie dans la recherche scientifique¹²⁷. Deuxièmement, pour permettre une analyse plus fine de la crise actuelle, nous testons la validité et raffinons les résultats issus de notre analyse à l'aune des 267 projets de vaccins répertoriés pour lutter contre la Covid-19.

Les publications scientifiques ou les brevets parus pendant les années de crises sont dits en *période de crise*, tandis que les autres sont dits en *période hors crise*, et leur évolution par année est présentée dans la **Figure 1** ci-dessous. Nous pouvons observer que comme attendu, en période de crise, compte tenu de l'urgence liée à l'émergence d'un nouveau pathogène, le nombre de publications académiques et des brevets publiés chaque année augmente, avec un effet plus ou moins marqué selon l'intensité des crises.

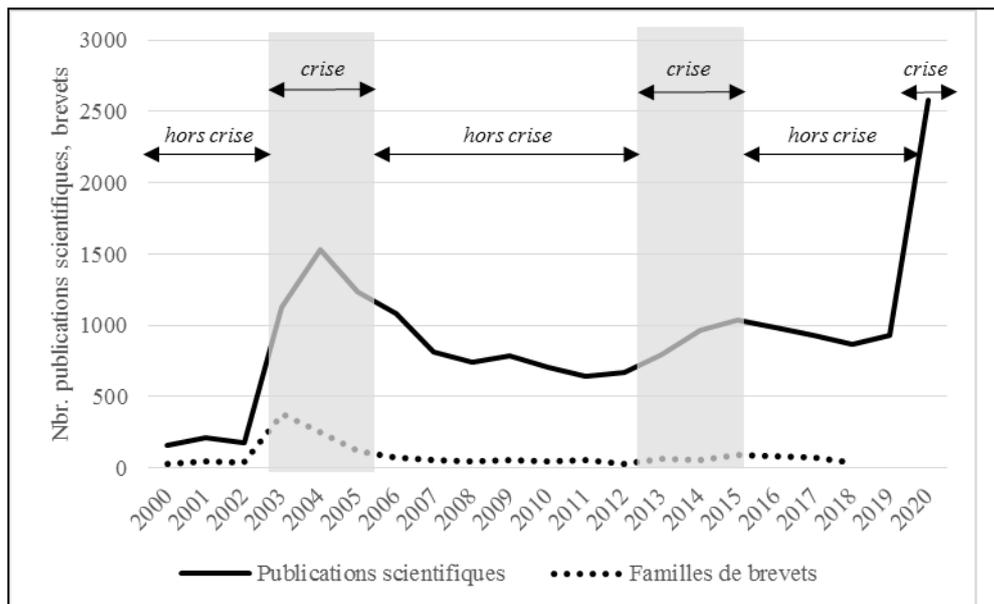


Figure 1 – Publications scientifiques et brevets par année sur les coronavirus en période de crise et hors crise

¹²⁷ Nous soulignons également que compte tenu du nombre peu élevé de brevets à date sur les coronavirus et le manque de recul temporel important sur la période du covid-19 (lié au délai de traitement par les offices), ces données ne nous apparaissent pas suffisamment riches pour explorer directement nos questions de recherche

ENCADRE METHODOLOGIQUE

Nous utilisons ici un corpus de publications scientifiques portant sur les coronavirus composé de 18 954 articles publiés dans des revues scientifiques entre le 01/01/2000 et le 15/05/2020¹²⁸. Nous avons développé un algorithme, basé sur des mots clés, pour classifier l'origine des publications : (1) *OPR* s'il s'agit d'universités ou d'instituts de recherche publics ; (2) *Industrie* pour les entreprises commerciales privées ; (3) *Hôpital* pour les hôpitaux, centres hospitaliers universitaires (CHU) ou cliniques. Il est ensuite possible de qualifier les collaborations (par exemple Industrie – OPR). Cette méthode pour évaluer l'implication de l'industrie dans la recherche est usuelle en bibliométrie (cf. Arora et al., 2018).

Pour estimer le potentiel des percées scientifiques, nous utilisons le nombre de citations reçues par une publication 3 ans après sa parution. Cet indicateur, bien qu'imparfait et soumis à certains biais (réputations, géographiques, etc.), est le plus utilisé en bibliométrie (voir pour une revue de littérature et l'exposition des biais : Tahamtan et Bornmann, 2019). Dans nos analyses, nous traitons à part la crise du Covid-19 car celle-ci n'est pas terminée et les données sont donc incomplètes (en particulier, la revue des citations est peu pertinente à ce stade).

Les données de brevets portant sur les coronavirus ont également été extraites pour vérifier en amont l'hypothèse du lien entre publication académique des industriels et qualité des médicaments et traitements dans le champ des coronavirus (Poegel et al., 2019). 1 622 brevets portant sur les coronavirus dont le dépôt a été publié entre le 01/01/2000 et le 15/05/2020 ont ainsi été extraits de la base de données PATSTAT. Cette hypothèse est vérifiée : nos données montrent qu'en période de crise, un industriel qui participe à la recherche académique dépose environ deux fois plus de brevets dans ces périodes que les industriels qui n'y participent pas, et ses brevets reçoivent en moyenne +70% de citations supplémentaires à 3 ans, un indicateur classique de la qualité des dits brevets.

Enfin, les données détaillées (dépôt du vaccin, phase de tests, etc.) sur 267 projets de vaccins contre la Covid-19 répertoriée par l'OMS ou le Milken Institute ont été extraites au 01/03/2021. Le même procédé que pour les affiliations des publications a été utilisé.

3. L'industrie dans la recherche académique sur les coronavirus

Dans cette section, nous explorons d'abord les effets des crises sur les contributions scientifiques industrielles et les régimes d'actions associées (3.1), puis nous étudierons les régimes les plus performants en période de crise (3.2).

¹²⁸ Extraites sur Lens.org

3.1. Une contribution scientifique renforcée de l'industrie en période de crise tirée par de nouveaux acteurs et de nouvelles collaborations :

Nous pouvons d'abord analyser la productivité scientifique des industriels à travers le nombre de publications scientifiques publiées annuellement en crise et hors crise (*Figure 2*). Nous observons que l'industrie participe à l'élan scientifique imposé par l'urgence des crises : les industriels publient en moyenne +47% d'articles scientifiques supplémentaires en crise que hors crise, un effet très marqué pendant celle de la Covid-19 où les publications ont augmenté de 87%. Toutefois, il faut souligner qu'au global, la part des industriels dans les publications reste modeste (5% environ – données hors figure) car celles-ci sont d'abord l'apanage des OPR et des hôpitaux.

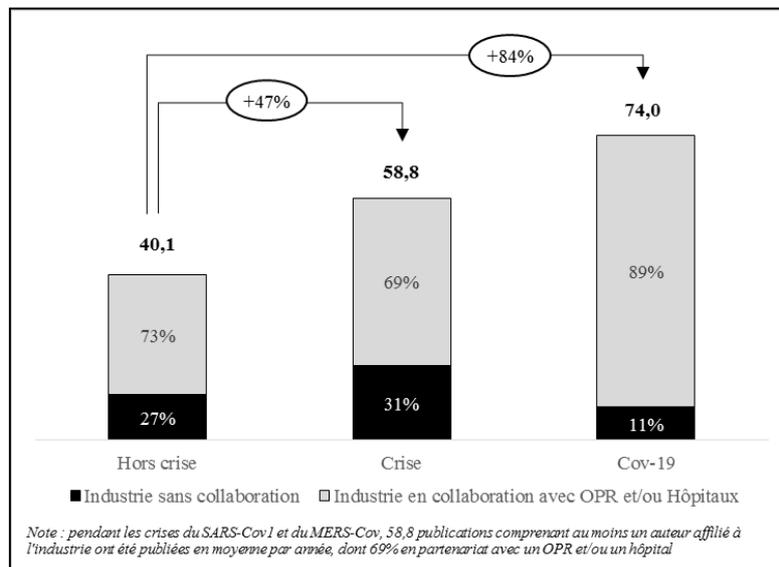


Figure 2 – Nombre d'articles publiés en moyenne par an par les industriels et part des collaborations (OPR et/ou Hôpitaux)

Si les industriels participent davantage à la recherche académique pendant les périodes de crise, il est nécessaire de s'interroger sur les effets de ces crises sur les régimes d'actions adoptés. Premièrement, nous pouvons souligner que les industriels recourent très largement à des collaborations avec des OPR et des hôpitaux pour leurs publications académiques (*Figure 2*). Il semble toutefois que les crises du SARS-Cov1 et du MERS-Cov n'aient pas eu d'effet majeur sur la manière dont les industriels recourent à la collaboration : les deux tiers des contributions se font par cette voie sans variation entre les périodes. Toutefois, on constate que d'après les données provisoires sur les publications pendant la crise du Covid-19, les industriels se sont moins souvent engagés seuls dans ces activités. Nous pouvons raffiner notre analyse et déterminer si ces collaborations étaient préexistantes aux crises ou ont été initiées pendant celles-ci. Les résultats sur les publications scientifiques, enrichis par l'analyse des vaccins

contre la Covid-19, indiquent que la grande majorité des collaborations sont nouvelles : un élément qui semble peu varier en crise et hors crise (*Tableau 1*). Deuxièmement, nous pouvons caractériser les acteurs industriels qui se mobilisent pendant les crises en déterminant s'il s'agit de nouveaux acteurs pour lesquels la crise constitue un catalyseur de leur mobilisation, ou bien si ces acteurs disposaient d'une expertise préalable sur le champ de recherche. Nos résultats (*Tableau 1*) montrent que les crises attirent en moyenne annuelle davantage de nouveaux acteurs qu'en période hors crise : 85% des industriels qui travaillent sur un vaccin candidat au Covid-19 n'ont aucune expérience scientifique dans ce domaine de recherche. L'effet est toutefois plus faible sur les données provisoires sur les publications scientifiques pendant cette crise où la part des industriels avec expertise préalable est plus élevée.

		Collaborations avec OPR et/ou hôpitaux (nbr. dyades OPR / hôpitaux – industriel en moyenne annuelle)			Expertise scientifique préalable coronavirus (nbr. acteurs industriels contributeurs en moyenne annuelle)		
		Anciennes	Nouvelles	Part des nouvelles collab.	Avec	Sans	Part des nouveaux acteurs
Publications scientifiques sur les coronavirus	Hors crise	32,4	47,6	60%	7,6	20,9	73%
	Crise	33,0	71,8	69%	8,3	33,2	80%
	Cov-19	104,0	116,0	53%	22,0	39,0	64%
Vaccins covid-19 ¹²⁹	Cov-19	21,0	39,0	65%	28,0	139,0	85%

Légende : en période de crise (SARS-Cov et MERS-Cov), 71,8 collaborations nouvelles par an en moyenne se sont formées pour des publications scientifiques avec au moins un auteur affilié à l'industrie, et au moins un autre affilié à un OPR ou un hôpital, ce qui représente 69% des collaborations de cette période. Par ailleurs, 33,2 industriels publient pour la première fois un article académique dans le champ de recherche des coronavirus, soit 80% des acteurs du champ dans cette période.

Tableau 1 - Collaborations et expertise des industriels en crise et hors crise

Ainsi, nous avons pu caractériser l'effet des crises sur les contributions et les régimes d'actions de l'industrie dans la recherche scientifique sur les coronavirus. D'une part, nous montrons que **l'industrie est capable de se mobiliser davantage pendant les périodes de crise** principalement par le biais collaborations inédites avec des OPR et des hôpitaux et par l'arrivée de nouveaux acteurs. Le développement des vaccins candidats au Covid-19 constitue une illustration forte de ce phénomène : 139 projets sont menés par des industriels qui s'intéressent pour la première fois au sujet des coronavirus (par exemple *Moderna*), et parmi les projets menés en collaborations, 65% ont été initiées pendant la crise. D'autre part, **si les crises ont un impact sur le volume des contributions, nous n'observons pas de bouleversement majeur sur les régimes d'actions adoptés par l'industrie, à l'exception de la tendance plus marquée des industriels pendant la crise du Covid-19 à mener leurs projets de publications scientifiques de façon plus collaborative et avec davantage**

¹²⁹ L'expertise préalable est basée sur l'existence d'une publication scientifique antérieure au champ de recherche sur les coronavirus

d'acteurs avec une expertise préalable. Si ces éléments nous permettent de caractériser la dynamique des différents régimes d'actions des industriels pour contribuer à la recherche scientifique en période de crise, nous pouvons nous intéresser plus spécifiquement à caractériser les performances de ces régimes.

3.2. L'expertise préalable et les collaborations anciennes comme leviers de performance de la recherche scientifique en période de crise :

Pour étudier les régimes qui permettent de favoriser des résultats de recherche impactant, nous explorons dans quelles mesures un régime d'actions particulier permet de maximiser le nombre de citations reçues dans les trois ans par une publication scientifique industrielle (un indicateur classique de la littérature en bibliométrie). Ces données sont complétées par une analyse des projets de vaccins contre la Covid-19 qui ont atteint les essais cliniques de phases III et IV, c'est-à-dire les projets à haut potentiel ou déjà sur le marché.

Premièrement, on peut s'interroger sur l'impact du recours à la collaboration, par exemple avec un OPR ou un hôpital en période de crise, et son impact sur les performances (Figure 3). On constate que le recours à des collaborations avec ces institutions permet aux industriels de publier des travaux scientifiquement plus impactant, quelle que soit la période. En période de crise par exemple, l'impact moyen d'un article scientifique publié par un industriel qui ne recourt pas à la collaboration est six fois plus faible que s'il avait collaboré avec un OPR. On notera que le recours à des collaborations tripartites avec des OPR et des Hôpitaux, bien que rare, est le mécanisme qui renforce le plus l'impact de l'industrie. Pourtant, bien que les acteurs qui ont déjà collaboré ensemble par le passé soient minoritaires, ils obtiennent des résultats scientifiques en moyenne deux fois plus impactant que les collaborations nouvellement initiées (Tableau 2), que ce soit en période de crise (20,3 citations en moyenne vs. 9,9) ou hors crise.

Deuxièmement, nous pouvons nous questionner sur l'impact scientifique des nouveaux entrants, qui proposent potentiellement des méthodes plus innovantes dans le champ de recherche. Si hors période de crise, les deux types d'acteurs ont un impact scientifique similaire, en période de crise ce sont les industriels avec une expertise préalable qui obtiennent des performances significativement supérieures en termes d'impact scientifique (Tableau 2 également).

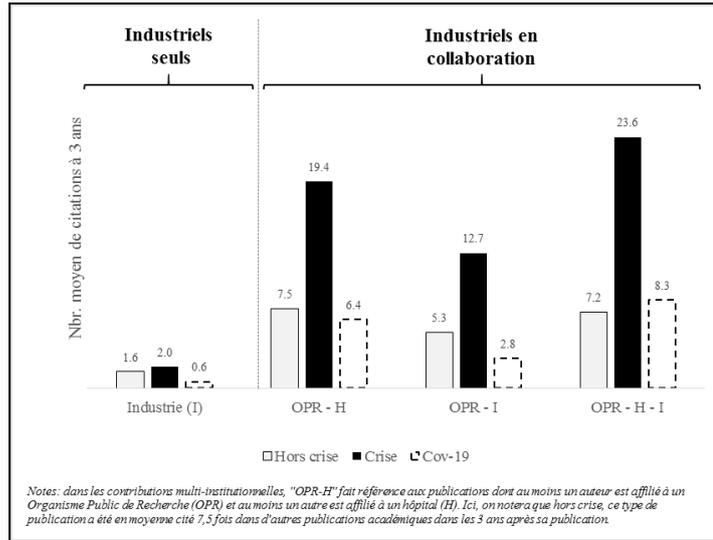


Figure 3 – Nombre moyen de citations reçues en 3 ans en période de crise et hors crise par les industriels

	Collaborations avec OPR et/ou hôpitaux			Expertise scientifique préalable coronavirus		
	Anciennes	Nouvelles	Sign. statistique	Avec	Sans	Sign. statistique
Hors crise	6,9	3,6	***	6,5	5,3	Non sign.
Crise	20,3	9,9	***	15,0	9,6	***
Cov-19	4,8	3,3	Non sign.	5,6	2,5	Non sign.

Légende : en période de crise, les articles scientifiques publiés par des industriels avec des partenaires d'OPR et/ou d'hôpitaux qui avaient déjà collaboré ensemble par le passé ont été cités en moyenne 20,3 fois dans des articles scientifiques postérieurs. Le test de Wilcoxon permet de tester la significativité de la différence avec la moyenne des publications des articles publiés par des partenaires dans le cadre d'une collaboration inédite aux seuils suivants: *** : $p > 0,01$; ** : $p > 0,05$; * : $p > 0,1$; Non sign : différence non significative. Il en va de même pour l'analyse de l'expertise préalable.

Tableau 2 – Impact sur les citations à 3 ans des collaborations et de l'expertise dans les publications scientifiques

Nous pouvons discuter nos résultats à l'aune des projets de vaccins contre la Covid-19 et pilotés par des industriels. Tout d'abord, concernant l'ancienneté des collaborations (Tableau 3), on constate un très fort taux d'attrition des collaborations initiées pendant la crise du Covid-19 et qui sont actuellement en phase finale de développement (8% en phase III / IV vs. 14% pour les collaborations antérieures). Ces éléments sont convergents avec nos résultats, bien que nous pouvons souligner qu'il y a désormais autant de projets en phase finale avec des collaborations nouvelles qu'anciennes, ce qui invite à creuser des leviers managériaux plus fins liés au management de ces collaborations. Concernant l'expertise (Figure 4), il apparaît que la part des projets en phase III et IV pour lesquels les industriels ont une expertise préalable de recherche sur les coronavirus est surreprésentée. En effet, 4 industriels sur 10 avec les projets de vaccins candidats les plus avancés avaient déjà une expertise préalable dans le domaine des coronavirus par le passé (contre moins de 2 sur 10 au démarrage), ce qui est également convergent avec nos résultats. De plus, nous pouvons mettre en lumière un autre phénomène : les industriels qui ont un vaccin en phase avancée, mais qui n'avaient pas d'expertise sur le

sujet des coronavirus, se sont majoritairement associés avec des OPR qui disposaient de cette expertise.

		Anciennes collaborations	Nouvelles collaborations
Vaccins covid-19 (projets incluant des industriels en partenariat avec un OPR)	Tous projets	21	39
	Phase III / IV	3	3
	Taux de succès	14%	8%

Légende : dans l'ensemble des projets de vaccins contre la covid-19 menés en collaboration par des industriels, 21 projets sont menés par des industriels et des OPR qui avaient déjà collaboré ensemble par le passé (analyse des publications scientifiques).

Tableau 3 – Collaborations nouvelles et anciennes dans les projets de vaccins contre le Covid-19

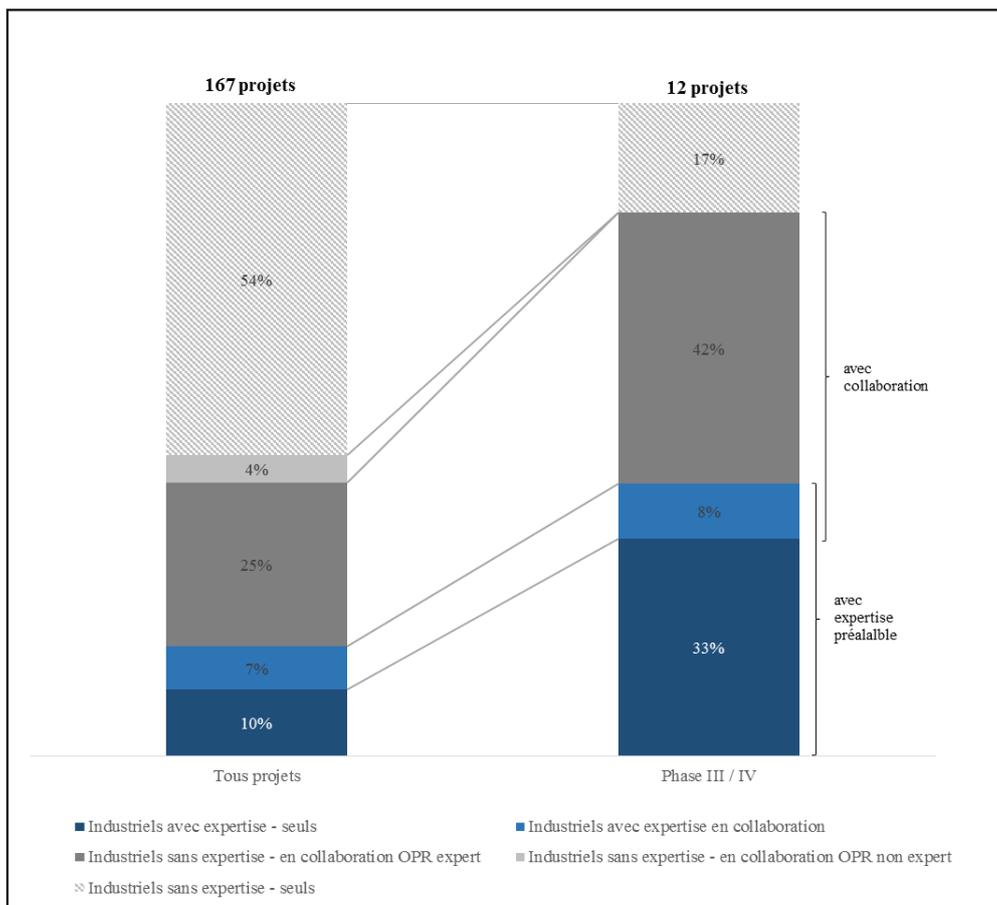


Figure 4 – Part des projets de vaccins contre la covid-19 et effets de l'expertise préalable

Ainsi, nos analyses permettent de mettre en exergue certains catalyseurs de la performance scientifique des industriels en période de crise. Premièrement, **la collaboration avec un OPR ou un hôpital permet de favoriser les percées scientifiques, mais le recours à une collaboration préexistante permet des résultats plus impactant**. Deuxièmement, les nouveaux entrants qui n'ont pas d'expertise scientifique sur le champ de recherche, bien que largement majoritaires en période de crise, font face à des difficultés pour aboutir à des percées scientifiques : une caractéristique exacerbée en période de crise alors que ce n'est

pas un élément différenciant hors crise. Nos résultats sur les projets de vaccins Covid-19 montrent que le recours à la collaboration avec des OPR ayant pour leur part, une expertise préalable, semble pouvoir permettre de pallier certaines de ces difficultés. Ces éléments permettent d'engager une réflexion plus profonde sur la résilience aux crises.

4. Perspectives pour l'impact scientifique industriel dans le contexte pandémique

Nos travaux indiquent tout d'abord que l'industrie est capable de se mobiliser en période de crise pour contribuer davantage à la recherche académique ouverte, avec des effets positifs pour le stock mondial de connaissances et pour leurs propres activités de développement de produits. Toutefois, si cette hausse est significative pour les crises du SARS-Cov1, MERS-Cov et Cov-19, le poids global de l'industrie dans la recherche académique reste marginal : les crises n'ont pas été le catalyseur d'un changement de paradigme et d'une remontée de filière des industriels vers des travaux de recherche plus fondamentaux, activité dans laquelle ils se sont désengagés au profit des OPR depuis plusieurs années. Alors qu'en dehors des crises, les industriels prennent part aux travaux de recherche académique majoritairement en s'appuyant sur des collaborations avec des OPR et des hôpitaux, principalement par le biais de collaborations inédites et par de nouveaux entrants sur le marché, les crises semblent avoir exacerbé ces phénomènes sans en inverser la tendance. Mais paradoxalement, nos travaux montrent que si la collaboration, en particulier si elle n'est pas inédite, est un levier de performance des activités scientifiques à la fois hors crise et en crise, l'expérience préalable sur la thématique de recherche (que ce soit l'industriel lui-même ou son partenaire de recherche) semble cruciale.

Premièrement, le recours à des collaborations des industriels avec des OPR ou des hôpitaux pour favoriser l'impact scientifique n'apparaît pas comme surprenant au regard de la littérature (Bikard, Vakili et Teodoridis, 2019), et corrobore les nombreux appels lancés pour favoriser les collaborations pendant la crise du Covid-19 (Chesbrough, 2003). Pourtant, le fait que les collaborations anciennes soient les plus performantes est intéressant : pour que la collaboration soit féconde, les acteurs doivent dépasser leurs barrières culturelles, développer un climat de confiance pour établir des relations stables permettant d'instaurer des « plateformes cognitives » (Créplet, Kern et Schaeffer, 2007) propices à l'innovation : en somme, apprendre à se connaître et travailler ensemble. Ces difficultés paraissent démultipliées durant

des crises comme celle que nous traversons, qui impactent fortement les capacités de travail (confinement, télétravail, etc.). De plus et en particulier en France, le manque structurel de relations pérennes entre OPR et industriels apparaît ici comme un élément de fragilité important. Certaines biotechs françaises ont notamment relayé leurs difficultés à s'associer rapidement à des OPR (Xenothera par exemple¹³⁰), alors que cet élément apparaît essentiel pour pallier un manque d'expertise préalable des industriels dans le domaine spécifique ici des coronavirus. Des approches plus structurées et mutualisées des explorations devraient être envisagées : l'exemple de la fondation Gates qui a cherché à fédérer OPR et industriels est à ce titre particulièrement éloquent¹³¹, tout comme la mobilisation des Instituts Carnots¹³² en France. Des incitations financières pourraient également être mises en place : alors que l'Agence Nationale de la Recherche française a lancé un « appel flash Covid-19 » pour financer en urgence des projets scientifiques des OPR¹³³, quid d'un « appel flash OPR-Industrie ». De même, l'hôpital constitue un lieu propice à la collaboration inter-institutions, un levier pourtant rarement sollicité. Par exemple, le concept de patient centrality pourrait devenir un outil fédérateur pour favoriser des collaborations scientifiques entre industriels, OPR et hôpitaux. Ces actions pourraient par exemple permettre, par une approche plus partenariale, d'accélérer le processus de publications scientifiques associées aux développements de vaccin.

Deuxièmement, nous avons montré que les industriels sans expertise préalable sur la thématique de recherche rencontraient des difficultés. Cet élément semble être une limite aux logiques d'*exaptation* (Andriani et Cohen, 2013) qui visent à réemployer une innovation dans un autre contexte que celle pour laquelle elle a été établie, une stratégie largement employée par les industriels pendant la crise du Covid-19 et qui peut se révéler particulièrement payante pendant les crises (Ardito, Coccia et Messeni Petruzzelli, 2021). Toutefois, ces stratégies doivent s'accompagner d'une montée en compétence, ici sur le sujet des coronavirus. Cela signifie également qu'en amont des crises, l'anticipation est un facteur déterminant et qu'il est nécessaire de faciliter des financements de la recherche scientifique pérennes, en particulier sur les pathogènes à risque et la recherche fondamentale (Kyle et Perrot, 2021).

¹³⁰ « Recherche pharmaceutique française : le rendez-vous manqué », La Méthode Scientifique, France Culture, ed. 04/03/2021

¹³¹ « Coronavirus : la Fondation Gates accroît son soutien pour accélérer l'arrivée d'un vaccin », Les Echos, ed. 6/04/2020

¹³² Covid-19 : les Carnot se mobilisent face à la crise sanitaire (<https://www.instituts-carnot.eu/fr/node/1758>)

¹³³ Appels ANR Flash et RA-Covid-19 : entretien avec Antoine Gessain, président du comité d'évaluation scientifique

Enfin, si ces éléments portent sur une période de crise épidémique, nos résultats invitent à discuter plus largement le rôle de l'industrie dans la recherche scientifique pendant les crises, qu'elles soient financières, écologiques ou sociétales.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdessemed T., Bueno-Merino P. (2016). « À propos d 'impact de la recherche. Les injonctions paradoxales des écoles de management françaises », *La Revue Française de Gestion*, 8, p. 55-76.
- Abecassis P., Coutinet N. (2008). « Caractéristiques du marché des médicaments et stratégies des firmes pharmaceutiques », *Horizons Stratégiques*, n° 7, p. 2-26.
- Abramo G., D'Angelo C.A., Costa F. Di, Solazzi M. (2009). « University-industry collaboration in Italy: A bibliometric examination », *Technovation*, 29, n° 6-7, p. 498-507.
- Abramo G., D'Angelo C.A., Solazzi M. (2010). « Assessing public-private research collaboration: Is it possible to compare university performance? », *Scientometrics*, 84, n° 1, p. 173-197.
- Abramo G., D'Angelo C.A., Solazzi M. (2012). « A bibliometric tool to assess the regional dimension of university-industry research collaborations », *Scientometrics*, 91, n° 3, p. 955-975.
- Abreu M., Grinevich V. (2013). « The nature of academic entrepreneurship in the UK: Widening the focus on entrepreneurial activities », *Research Policy*, 42, p. 408-422.
- Agarwal R., Helfat C.E. (2009). « Strategic renewal of organizations », *Organization Science*, 20, n° 2, p. 281-293.
- Aggeri F., Fixari D., Hatchuel A. (1998). « L'innovation à l'INRA: vers de nouveaux principes d'intégration du rapport science/innovation », *Cahiers de recherche - Ecole des Mines de Paris, Centre de Gestion Scientifique*.
- Aghion P., Dewatripont M., Stein J.C. (2008). « Academic freedom, private-sector focus, and the process of innovation », *RAND Journal of Economics*, 39, n° 3, p. 617-635.
- Agogué M. (2012). *Modéliser l'effet des biais cognitifs sur les dynamiques industrielles : innovation orpheline et architecte de l'inconnu*, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 252 p.
- Agogué M., Kazakçi A. (2014). « 10 Years of C-K Theory: A Survey on the Academic and Industrial Impacts of a Design Theory », dans *An Anthology of Theories and Models of Design*, Springer, London, p. 219-235.
- Agogué M., Kazakçi A., Hatchuel A., Masson P. Le, Weil B., Poirel N., Cassotti M. (2014). « The impact of type of examples on originality: Explaining fixation and stimulation effects », *Journal of Creative Behavior*, 48, n° 1, p. 1-12.
- Agogué M., Masson P. Le (2014). « Rethinking ideation: a cognitive approach of innovation lock-ins », *The International Society for Professional Innovation Management*, p. 1-11.
- Agrawal A. (2006). « Engaging the inventor: Exploring licensing strategies for university inventions and the role of latent knowledge », *Strategic Management Journal*, 27, n° 1, p. 63-79.
- Agrawal A.K., Henderson R. (1997). « Exploring knowledge transfer from MIT », *Advances in Strategic Management*, 26, p. 13-37.
- Ahuja G., Katila R. (2001). « Technological acquisitions and the innovation performance of acquiring firms: A longitudinal study », *Strategic Management Journal*, 22, n° 3, p. 197-220.
- Ahuja G., Lampert C.M. (2001). « Entrepreneurship in the large corporation: A longitudinal study of how established firms create breakthrough inventions », *Strategic Management Journal*, 22, n° 6-7, p. 521-543.
- Albert M.B., Avery D., Narin F., McAllister P. (1991). « Direct validation of citation counts as indicators of industrially important patents », *Research Policy*, 20, n° 3, p. 251-259.
- Allard-Poesi F., Perret V. (2014). « Chapitre 1. Fondements épistémologiques de la recherche », dans THIETART R.-A. (dir.), *Méthodes de recherche en management*, Management, Dunod, Paris, p. 14-46.
- Alstott J., Triulzi G., Yan B., Luo J. (2017a). « Mapping technology space by normalizing patent networks », *Scientometrics*, 110, n° 1, p. 443-479.
- Alstott J., Triulzi G., Yan B., Luo J. (2017b). « Inventors' Explorations Across Technology Domains ».
- Amara N., Olmos-Peñuela J., Fernández-de-Lucio I. (2018). « Overcoming the "lost before translation" problem: An exploratory study », *Research Policy*, 48, n° 1, p. 22-36.
- Anckaert P.-E., Cassiman D., Cassiman B. (2020). « Fostering practice-oriented and use-inspired science in biomedical research », *Research Policy*, 49, n° 2, p. 103900.
- Anderson P.F. (1983). « Marketing , Progress , and Scientific Scientific Method », *The Journal of Marketing*, 47, n° 4, p. 18-31.
- Andriani P., Cohen J. (2013). « From Exaptation to Radical Niche Construction in Biological and Technological Complex Systems », *Complexity*, 18, n° 5, p. 7-14.
- Andriopoulos C., Lewis M.W. (2010). « Managing Innovation Paradoxes: Ambidexterity Lessons from Leading Product Design Companies », *Long Range Planning*, 43, n° 1, p. 104-122.
- Ankrah S.N., Burgess T.F., Grimshaw P., Shaw N.E. (2013). « Asking both university and industry actors about their

- engagement in knowledge transfer: What single-group studies of motives omit », *Technovation*, 33, n° 2-3, p. 50-65.
- ANRT (2018). « Rapport Annuel d'Activités 2018 », p. 40.
- ANRT (2019a). « Conditions générales d'octroi et d'éligibilité des Conventions Industrielles de Formation par la Recherche », p. 1-11.
- ANRT (2019b). « Plaquette CIFRE », p. 6.
- ANRT (2020). « Présentation du Dispositif CIFRE », p. 46.
- Archambault V. (2019). *Histoires de Sciences & Entreprises (vol. 3)*, Presse des Mines.
- Ardito L., Coccia M., Messeni Petruzzelli A. (2021). « Technological exaptation and crisis management: Evidence from COVID-19 outbreaks », *R and D Management*, p. 1-12.
- Arora A., Belenzon S., Jungkyu S. (2019). « Why the U.S. innovation ecosystem is slowing down », *Harvard Business Review*, 2019, p. 1-9.
- Arora A., Belenzon S., Pataconi A. (2018). « The decline of science in corporate R&D », *Strategic Management Journal*, 39, n° 1, p. 3-32.
- Arrow K.J. (1962). « Economic Welfare and the Allocation of Resources for Invention », *The Rate and Direction of Inventive Activity*, p. 609-626.
- Arthur W.B. (2007). « The structure of invention », *Research Policy*, 36, n° 2, p. 274-287.
- Arts S., Fleming L. (2018). « Paradise of Novelty—Or Loss of Human Capital? Exploring New Fields and Inventive Output », *Organization Science*, 29, n° 6, p. 1074-1092.
- Arts S., Veugelers R. (2020). « Taste for science, academic boundary spanning, and inventive performance of scientists and engineers in industry », *Industrial and Corporate Change*, 29, n° 4, p. 917-933.
- Azoulay P., Graff Zivin J.S., Manso G. (2011). « Incentives and creativity: Evidence from the academic life sciences », *RAND Journal of Economics*, 42, n° 3, p. 527-554.
- Azoulay P., Waverly D., Toby S. (2009). « The impact of academic patenting on the rate, quality and direction of (public) research output », *Journal of Industrial Economics*, 57, n° 4, p. 637-676.
- Baba Y., Shichijo N., Sedita S.R. (2009). « How do collaborations with universities affect firms' innovative performance? The role of "Pasteur scientists" in the advanced materials field », *Research Policy*, 38, n° 5, p. 756-764.
- Balconi M., Breschi S., Lissoni F. (2004). « Networks of inventors and the role of academia: An exploration of Italian patent data », *Research Policy*, 33, n° 1, p. 127-145.
- Balconi M., Laboranti A. (2006). « University-industry interactions in applied research: The case of microelectronics », *Research Policy*, 35, n° 10, p. 1616-1630.
- Banal-Estañol A., Jofre-Bonet M., Lawson C. (2015). « The double-edged sword of industry collaboration: Evidence from engineering academics in the UK », *Research Policy*, 44, n° 6, p. 1160-1175.
- Barney J. (1991). « Firm Ressources and Sustained Competitive Advantage », *Journal of Management*, 17, n° 1, p. 99-120.
- Baruffaldi S., Visentin F., Conti A. (2016). « The productivity of science & engineering PhD students hired from supervisors' networks », *Research Policy*, 45, n° 4, p. 785-796.
- Basse Mama H. (2018). « Nonlinear capital market payoffs to science-led innovation », *Research Policy*, 47, n° 6, p. 1084-1095.
- Batra B.G., Santhanam N., Surana K. (2018). « Graphene : The next S-curve for semiconductors? », *McKinsey & Company*, n° April, p. 1-13.
- Bekkers R., Bodas Freitas I.M. (2008). « Analysing knowledge transfer channels between universities and industry: To what degree do sectors also matter? », *Research Policy*, 37, n° 10, p. 1837-1853.
- Belderbos R., Carree M., Lokshin B. (2004). « Cooperative R&D and firm performance », *Research Policy*, 33, n° 10, p. 1477-1492.
- Berger S., Dorman R., Starbuck H. (2016). « Reforms in the French Industrial Ecosystem ».
- Bhaskarabhatla A., Hegde D. (2014a). « An organizational perspective on patenting and open innovation », *Organization Science*, 25, n° 6, p. 1744-1763.
- Bhaskarabhatla A., Hegde D. (2014b). « An Organizational Perspective on Patenting and Open Innovation », *Organization Science*, 25, n° 6, p. 1744-1763.
- Bikard M., Vakili K., Teodoridis F. (2019). « When Collaboration Bridges Institutions : The Impact of University – Industry Collaboration on Academic Productivity », *Organization Science*, 30, n° 2, p. 426-445.
- Bikard M. (2020). « Idea twins: Simultaneous discoveries as a research tool », *Strategic Management Journal*, 41, n° 8, p. 1528-1543.
- Blind K., Pohlisch J., Zi A. (2018). « Publishing, patenting, and standardization: Motives and barriers of scientists », *Research Policy*, 47, n° 7, p. 1185-1197.
- Blumenthal D., Causino N., Campbell E., Louis K.S. (1996). « Relationships between Academic Institutions and Industry in

- the Life Sciences — An Industry Survey », *New England Journal of Medicine*, 334, n° 6, p. 368-374.
- Bonhomme Y., Corbel P., Sebai J. (2005). « Différences entre “big pharma” et “biotechs” : qu’en disent leurs brevets », *Revue française de gestion*, 155, p. 117-133.
- Borrel-Damian L., Morais R., Smith J.H. (2015). « Collaborative Doctoral Education in Europe: Research Partnerships and Employability for Researchers ».
- Branstetter L., Ogura Y. (2005). « Is Academic Science Driving a Surge in Industrial Innovation? Evidence from Patent Citations ».
- Breschi S., Lissoni F., Montobbio F. (2007). « The scientific productivity of academic inventors: New evidence from Italian data », *Economics of Innovation and New Technology*, 16, n° 2, p. 101-118.
- Breschi S., Lissoni F., Montobbio F. (2008). « University patenting and scientific productivity: a quantitative study of Italian academic inventors », *European Management Review*, 5, n° 2, p. 91-109.
- Broström A. (2019). « Academic breeding grounds: Home department conditions and early career performance of academic researchers », *Research Policy*, 48, n° 7, p. 1647-1665.
- Bruneel J., D’Este P., Salter A. (2010). « Investigating the factors that diminish the barriers to university-industry collaboration », *Research Policy*, 39, n° 7, p. 858-868.
- Buderi R. (2000). *Engines of tomorrow: How the world's best companies are using their research labs to win the future*, Simon and Schuster Ltd.
- Buenstorf G., Heinisch D.P. (2020). « When do firms get ideas from hiring PhDs? », *Research Policy*, 49, n° 3, p. 103913.
- Bush V. (1945). *Science, the endless frontier; a report to the President on a program for postwar scientific research*, NSF Archive.
- Butcher J., Jeffrey P. (2007). « A view from the coal face: UK research student perceptions of successful and unsuccessful collaborative projects », *Research Policy*, 36, n° 8, p. 1239-1250.
- Cabanes B. (2017). *Modéliser l'émergence de l'expertise et sa gouvernance dans les entreprises innovantes : des communautés aux sociétés proto-épistémiques d'experts*, Thèse de doctorat, Mines Paristech - Paris Sciences & Lettres.
- Cabanes B., Masson P. Le, Weil B. (2020). « Organiser la création de connaissance pour l'innovation de rupture: Des communautés aux sociétés proto-épistémiques d'experts », *Revue Française de Gestion*, 46, n° 288, p. 35-60.
- Cahn R.W. (2005). « An Unusual Nobel Prize », *Notes and Records of the Royal Society of the History of Science*, 59, n° 2, p. 145-153.
- Calderini M., Franzoni C., Vezzulli A. (2007). « If star scientists do not patent: The effect of productivity, basicness and impact on the decision to patent in the academic world », *Research Policy*, 36, n° 3, p. 303-319.
- Callaert J., Landoni P., Looy B. Van, Verganti R. (2015). « Scientific yield from collaboration with industry: The relevance of researchers' strategic approaches », *Research Policy*, 44, n° 4, p. 990-998.
- Calvert J., Patel P. (2003). « University-industry research collaborations in the UK: bibliometric trends », *Science and Public Policy*, 30, n° 2, p. 85-96.
- Camarda A., Ezzat H., Cassotti M., Agogué M., Camarda A., Ezzat H., Cassotti M., Agogué M., Weil B. (2017). « The role of Expertise in Design Fixation : Managerial Implications for Creative Leadership », *The 24th Innovation and Product Development Management Conference*, p. 11.
- Cammarano A., Michelino F., Lamberti E., Caputo M. (2017). « Accumulated stock of knowledge and current search practices: The impact on patent quality », *Technological Forecasting and Social Change*, 120, p. 204-222.
- Carayannis E.G., Campbell D.F.J. (2017). « Les systèmes d'innovation de la quadruple et de la quintuple hélice », *Innovations*, 54, n° 3, p. 173.
- Carayol N. (2003). « Objectives, agreements and matching in science-industry collaborations: Reassembling the pieces of the puzzle », *Research Policy*, 32, n° 6, p. 887-908.
- Carnino D.G. (2015). *L'Invention de la science : La nouvelle religion de l'âge industriel*, Le Seuil.
- Carnino G. (2014). « Louis Pasteur. La science pure au service de l'industrie », *Le Mouvement Social. La Découverte.*, 3, p. 9-26.
- Cassiman B., Veugelers R. (2006). « In Search of Complementarity in Innovation Strategy: Internal R&D and External Knowledge Acquisition », *Management Science*, 52, n° 1, p. 68-82.
- Chan H.F., Mixon F.G., Torgler B. (2018). « Relation of early career performance and recognition to the probability of winning the Nobel Prize in economics », *Scientometrics*, 114, n° 3, p. 1069-1086.
- Chan H.F., Önder A.S., Torgler B. (2015). « Do Nobel laureates change their patterns of collaboration following prize reception? », *Scientometrics*, 105, n° 3, p. 2215-2235.
- Chan H.F., Önder A.S., Torgler B. (2016). « The first cut is the deepest: repeated interactions of coauthorship and academic productivity in Nobel laureate teams », *Scientometrics*, 106, n° 2, p. 509-524.
- Chesbrough H. (2003). *Open Innovation, The New imperative for Creating and Profiting from Technology*, Harvard Business Review Press.

- Chesbrough H., Rosenbloom R.S. (2002). « The role of the business model in capturing value from innovation : evidence from Xerox Corporation ' s technology spin-off companies », *Industrial and Corporate Change*, 11, n° 3, p. 529-555.
- Choi H., Shin J., Hwang W.S. (2018). « Two faces of scientific knowledge in the external technology search process », *Technological Forecasting and Social Change*, 133, n° March, p. 41-50.
- Cockburn I., Henderson R. (1998). « Absorptive capacity, coauthoring behavior, and the organization of research in drug discovery », *The Journal of Industrial Economics*, 46, n° 2, p. 157-182.
- Cohen W.M., Levinthal D.A. (1989). « Innovation & Learning: The Two Faces of R&D », *The Economic Journal*, 99, n° 397, p. 569-596.
- Cohen W.M., Levinthal D.A. (1990). « Absorptive Capacity: A New Perspective on Learning and Innovation », *Administrative Science Quarterly*.
- Cohen W.M., Nelson R.R., Walsh J.P. (2002). « Links and Impacts: The Influence of Public Research on Industrial R and D », *Management Science*, 48, n° 1, p. 1-23.
- Cohendet P., Créplet F., Dupouët O. (2003). « Innovation organisationnelle, communautés de pratique et communautés épistémiques : le cas de Linux », *La Revue Française de Gestion*, 146, n° 5, p. 99-121.
- Comin D., Licht G., Pellens M., Schubert T. (2018). « Do Companies Benefit from Public Research Organizations ? The Impact of the Fraunhofer Society in Germany Papers in Innovation Studies Do Companies Benefit from Public Research Organizations ? The Impact of the Fraunhofer Society in Germany », *Innovation Studies*, 7.
- Comptes C. des (2018a). « Les outils du PIA consacrés à la valorisation de la recherche publique », PARIS.
- Comptes C. des (2018b). « Rapport particulier sur la valorisation de la recherche civile du CEA ».
- Cooper A.C., Schendel D. (1976). « Strategic responses to technological threats », *Business Horizons*, 19, n° 1, p. 61-69.
- Cooper R., Edgett S., Kleinschmidt E. (2001). « Portfolio management for new product development: Results of an industry practices study », *R&D Management*, 31, n° 4, p. 361-380.
- Cooper R., Kleinschmidt E. (1995). « Benchmarking the Firm's Critical Success Factors in New Product Development », *Journal of Product Innovation Management*, 12, p. 374-391.
- Créplet F., Kern F., Schaeffer V. (2007). « Approche cognitive des collaborations universités-entreprises », *Revue Française de Gestion*, 173, n° 4, p. 47-68.
- Crescenzi R., Filippetti A., Iammarino S. (2017). « Academic inventors: collaboration and proximity with industry », *Journal of Technology Transfer*, 42, n° 4, p. 730-762.
- Czarnitzki D., Grimpe C., Toole A.A. (2015). « Delay and secrecy: Does industry sponsorship jeopardize disclosure of academic research? », *Industrial and Corporate Change*, 24, n° 1, p. 251-279.
- D'Este P., Patel P. (2007). « University-industry linkages in the UK: What are the factors underlying the variety of interactions with industry? », *Research Policy*, 36, n° 9, p. 1295-1313.
- D'Este P., Perkmann M. (2011). « Why do academics engage with industry? The entrepreneurial university and individual motivations », *Journal of Technology Transfer*, 36, n° 3, p. 316-339.
- Dahlin K.B., Behrens D.M. (2005). « When is an invention really radical?: Defining and measuring technological radicalness », *Research Policy*, 34, n° 5, p. 717-737.
- David A. (2000). « La recherche intervention, un cadre général pour les sciences de gestion », *IXème Conférence Internationale de Management Stratégique Montpellier*, p. 1-22.
- David A., Hatchuel A., Laufer R. (2012). *Les nouvelles fondations des sciences de gestion : éléments d'épistémologie de la recherche en management*, Presse des.
- David P., Dasgupta P. (1994). « Towards a new economics of science », *Research Policy*, 23, p. 487-521.
- Descartes R. (1637). *Discours de la méthode : essai philosophique de René Descartes (édition 2020)*.
- Deroy X. (2008). « Le secteur pharmaceutique et l'histoire du contrôle de l'innovation », *Revue française de gestion*, 34, n° 188-189, p. 175-183.
- Ding W., Choi E. (2011). « Divergent paths to commercial science: A comparison of scientists' founding and advising activities », *Research Policy*, 40, n° 1, p. 69-80.
- Dosi G. (1982). « Technological paradigms and technological trajectories », *Research Policy*, 11, n° 1, p. 147-162.
- Eidelman J. (1988). *La création du palais de la découverte. Professionnalisation de la recherche et culture scientifique dans l'entre-deux guerre*, Thèse de doctorat, Thèse pour le doctorat unique de l'université Paris V - René Descartes, 534 p.
- Eisenhardt K.M. (1989). « Building Theories from Case Study Research Published by : Academy of Management Stable », *The Academy of Management Review*, 14, n° 4, p. 532-550.
- Etzkowitz H. (2003). « Research groups as "quasi-firms": The invention of the entrepreneurial university », *Research Policy*, 32, n° 1, p. 109-121.
- Etzkowitz H., Leydesdorff L. (2000). « The dynamics of innovation: From National Systems and "mode 2" to a Triple Helix of university-industry-government relations », *Research Policy*, 29, n° 2, p. 109-123.
- Evans J. (2010a). « Industry Induces Academic Science to Know Less about More », *The American Journal of Sociology*,

116, n° 2, p. 389-452.

Evans J.A. (2010b). *Industry collaboration, scientific sharing, and the dissemination of knowledge*.

Fabrizio K.R. (2009). « Absorptive capacity and the search for innovation », *Research Policy*, 38, n° 2, p. 255-267.

Fabrizio K.R., Minin A. Di (2008). « Commercializing the laboratory: Faculty patenting and the open science environment », *Research Policy*, 37, n° 5, p. 914-931.

Felk Y., Masson P. Le, Weil B., Cogez P., Hatchuel A. (2011). « Designing Patent Portfolio for disruptive innovation - a new methodology based on C-K Theory », *International Conference on Engineering Design, ICED 11*, n° August, p. 1-12.

Filliatreau G. (2008). « Bibliométrie et évaluation en sciences humaines et sociales : une brève introduction », *Revue d'histoire moderne et contemporaine*, 45-46, n° 5, p. 61-66.

Fini R., Jourdan J., Perkmann M. (2017). « Social Valuation across Multiple Audiences: The Interplay of Ability and Identity Judgments », *Academy of Management Proceedings, 2017*, n° 1, p. 14505.

Fini R., Perkmann M., Ross M.J. (2021). « Attention to Exploration: The Effect of Academic Entrepreneurship on the Production of Scientific Knowledge », *Organization Science*, n° April.

Fleming L., Greene H., Li G., Marx M., Yao D. (2019). « Government-funded research increasingly fuels innovation », *Science*, 364, n° 6446, p. 1139-1141.

Fleming L. (2001). « Recombinant Uncertainty in Technological Search », *Management Science*, 47, n° 1, p. 117-132.

Fleming L., Frenken K. (2007). « The evolution of inventor networks in the Silicon Valley and Boston regions », *Advances in Complex Systems*, 10, n° 1, p. 53-71.

Fleming L., Sorenson O. (2001). « Technology as a complex adaptive system: evidence from patent data », *Research Policy*, 30, p. 1019-1039.

Fleming L., Sorenson O. (2004). « Science as a map in technological search », *Strategic Management Journal*, 25, n° 89, p. 909-928.

Fontana M., Iori M., Montobbio F., Sinatra R. (2020). « New and atypical combinations: An assessment of novelty and interdisciplinarity », *Research Policy*, 49, n° 7.

FutuRIS (2016). « Regards croisés sur la recherche partenariale Regards croisés sur la recherche partenariale Comment se construisent les relations ».

Galvez-behar G. (2018). « Louis Pasteur ou l'entreprise scientifique au temps du capitalisme industriel », *Annales. Histoire, Sciences Sociales*, 3, n° 73, p. 629-656.

Gambardella A. (1992). « Competitive advantages from in-house scientific research: The US pharmaceutical industry in the 1980s », *Research Policy*, 21, n° 5, p. 391-407.

Ganco M. (2013). « Cutting the Gordian Knot: The effect of knowledge complexity on employee mobility and entrepreneurship », *Strategic Management Journal*, 34, p. 666-686.

Gassmann O., Enkel E. (2004). « Towards a theory of open innovation: three core process archetypes », *R&D management conference*, p. 1-18.

Gaughan M., Robin S. (2004). « National science training policy and early scientific careers in France and the United States », *Research Policy*, 33, n° 4, p. 569-581.

Gertner J. (2012). *The idea factory: Bell Labs and the great age of American innovation*.

Gibbert M., Ruigrok W. (2010). « The "What" and "How" of Case Study Rigor: Three Strategies Based on Published Work », *Organizational Research Methods*, 13, n° 4, p. 710-737.

Gibbons M., Limoges C., Nowotny H., Schwartzman S., Scott P. (1994). *The New Production of Knowledge*, SAGE Publications Ltd.

Gillier T., Kazakçı A., Piat G. (2012). « The Generation of Common Purpose in Innovation Partnerships : a Design Perspective », *European Journal of Innovation Management*, 15, n° 3, p. 372-392.

Gillier T., Lenfle S. (2019). « Experimenting in the Unknown: Lessons from The Manhattan Project », *European Management Review*, 16, n° 2, p. 449-469.

Gillier T., Piat G., Roussel B., Truchot P. (2010). « Managing innovation fields in a cross-industry exploratory partnership with C-K design theory », *Journal of Product Innovation Management*, 27, n° 6, p. 883-896.

Gittelman M., Kogut B. (2003). « Does Good Science Lead to Valuable Knowledge? Biotechnology Firms and the Evolutionary Logic of Citation Patterns », *Management Science*, 49, n° 4, p. 366-382.

Glenna L.L., Welsh R., Ervin D., Lacy W.B., Biscotti D. (2011). « Commercial science, scientists' values, and university biotechnology research agendas », *Research Policy*, 40, n° 7, p. 957-968.

Godin B. (2006). « The Linear model of innovation, the historical construction of an analytical framework », *Science, Technology & Human Values*, 31, n° 6, p. 639-667.

Godin B., Lane J. (2013). « Pushes and Pulls: Hi(S)tory of the Demand Pull Model of Innovation », *Science Technology and Human Values*, 38, n° 5, p. 621-654.

Goffin K., Åhlström P., Bianchi M., Richtnér A. (2019). « Perspective: State-of-the-Art: The Quality of Case Study Research

- in Innovation Management », *Journal of Product Innovation Management*, 36, n° 5, p. 586-615.
- Goldfarb B. (2008). « The effect of government contracting on academic research: Does the source of funding affect scientific output? », *Research Policy*, 37, n° 1, p. 41-58.
- Goldstein A.P., Narayanamurti V. (2018). « Simultaneous pursuit of discovery and invention in the US Department of Energy », *Research Policy*, 47, n° 8, p. 1505-1512.
- Grant R.M. (1996). « Prospering in Dynamically-competitive Environments: Organizational Capability as Knowledge Integration », *Organization science*, 7, n° 4, p. 375-387.
- Grigoriou K., Rothaermel F.T. (2017). « Organizing for knowledge generation: internal knowledge networks and the contingent effect of external knowledge sourcing », *Strategic Management Journal*, 38, p. 395-414.
- Grimm K. (2018). « Assessin the industrial PhD: Stakeholder insights », *Journal of Technoloy and Science Education*, 8, n° 4, p. 214-230.
- Grimpe C., Fier H. (2010). « Informal university technology transfer: A comparison between the United States and Germany », *Journal of Technology Transfer*, 35, n° 6, p. 637-650.
- Gruber M., Harhoff D., Hoisl K. (2013). « Knowledge recombination across technological boundaries: Scientists vs. Engineers », *Management Science*, 59, n° 4, p. 837-851.
- Guderian C.C., Bican P.M., Riar F.J., Chattopadhyay S. (2020). « Innovation management in crisis: patent analytics as a response to the COVID-19 pandemic », *R and D Management*, p. 223-239.
- Gulbrandsen M., Smeby J.C. (2005). « Industry funding and university professors' research performance », *Research Policy*, 34, n° 6, p. 932-950.
- Hain D., Jurowetzi R., Buchmann T. (2018). « A Vector Worth a Thousand Counts: A Temporal Semantic Similarity Approach to Patent Impact Prediction ».
- Hall B., Jaffe A., Trajtenberg M. (2000). « Market Value and Patent Citations: A First Look ».
- Hall R., Andriani P. (2003). « Managing knowledge associated with innovation », *Journla of Business Research*, 56, p. 145-152.
- Hamdouch A., Perrochon D. (2000). « Formes d'engagement en R&D, processus d'innovation et modalités d'interaction entre firmes dans l'industrie pharmaceutique », *Revue d'économie industrielle*, 93, n° 1, p. 29-50.
- Hanisch M., Rake B. (2021). « Repurposing without purpose? Early innovation responses to the COVID-19 crisis: Evidence from clinical trials », *R and D Management*.
- Hargadon A., Sutton R.I. (1997). « Technology Brokering and Innovation in a Product Development Firm », *Administrative Science Quaterly*, 42, n° 4, p. 716-749.
- Harhoff D., Narin F., Scherer F., Vopel K. (1999). « Citation frequency and the value of patented innovation », *The review of Economics and Statistics*, 81, n° 3, p. 511-515.
- Harryson S., Kliknaite S., Dudkowski R. (2007). « Making innovative use of academic knowledge to enhance corporate technology innovation impact », *International Journal of Technology Management*, 39, n° 1-2, p. 131-157.
- Hartmann P., Henkel J. (2020). « The Rise of Corporate Science in AI: Data as a Strategic Resource », *Academy of Management Discoveries*, 6, n° 3, p. 359-381.
- Hatchuel A. (2005). « Towards an epistemology of collective action: management research as a responsive and actionable discipline », *European Management Review*, 2, p. 36-47.
- Hatchuel A. (2019). « Exit to the past and voice for the future: Sciences de gestion, sciences fondamentales de l'action collective », *Revue Francaise de Gestion*, 45, n° 285, p. 43-57.
- Hatchuel A., Masson P. Le, Weil B. (2011). « Teaching innovative design reasoning: How concept-knowledge theory can help overcome fixation effects », *AI EDAM*, 25, n° 1, p. 77-92.
- Hatchuel A., Reich Y., Masson P. Le, Weil B., Kazakçi A.O. (2013). « Beyond Models and Decisions : Situating Design Through Generative Functions », *ICED13: 19th International Conference on Engineering Design*, n° August, p. 1-10.
- Hatchuel A., Weil B. (2003). « A new approach of innovative design: an introduction to C-K theory », *International Conference on Engineering Design ICED 03*, p. 1-15.
- Hatchuel A., Weil B. (2009). « CK Design Theory: An Advanced Formulation », *Research in Engineering Design*, 19, n° 4, p. 181-192.
- Heilbron J. (2002). « La bibliométrie, génèse et usages », *Actes de la recherche en sciences sociales*, 141-142, n° 1, p. 78-79.
- Helfat C.E. (1994). « Evolutionary Trajectories in Petroleum Firm R&D », *Management Science*, 40, n° 12, p. 1720-1747.
- Henderson R., Clark K. (1990). « Architectural Innovation : The Reconfiguration of Existing Product Technologies and the Failure of Established Firms », *Administrative Science Quarterly*, 35, n° 1, p. 9-30.
- Henderson R., Cockburn I. (1996). « Scale , Scope , and Spillovers : The Determinants of Research Productivity in Drug Discovery », *The RAND Journal of Economics*, 27, n° 1, p. 32-59.

- Hippel E. von (1986). « Lead Users: a Source of Novel Product Concepts. », *Management Science*, 32, n° 7, p. 791-805.
- Horton J., Krishna Kumar D., Wood A. (2020). « Detecting academic fraud using Benford law: The case of Professor James Hunton », *Research Policy*, 49, n° 8, p. 104084.
- Hottenrott H., Lawson C. (2017). « Fishing for complementarities: Research grants and research productivity », *International Journal of Industrial Organization*, 51, p. 1-38.
- Hughes A., Lawson C., Salter C., Kitson M., Bullock A., Hughes R. (2016). « The Changing State of Knowledge Exchange: UK Academic Interactions with External Organisations 2005-2015 ».
- Iansiti M., West J. (1997). « Technology Integration: Turning Great Research into Great Products », *Harvard Business Review*, 75, n° 3, p. 69-75.
- Iorio R., Labory S., Rentocchini F. (2017). « The importance of pro-social behaviour for the breadth and depth of knowledge transfer activities: An analysis of Italian academic scientists », *Research Policy*, 46, n° 2, p. 497-509.
- Jaffe A. (1986). « Technological Opportunity and Spillovers of R&D: Evidence from Firm's Patents, Profits, and Market Value », *The American Economic Review*, 76, n° 5, p. 984-1001.
- Jaffe A., Rassenfoss G. de (2010). « Patent Citation Data in Social Science Research: Overview and Best Practices », *Journal of the American Society for Information Science*, 1, n° 6, p. 2581-2583.
- Jansson D., Smith S. (1996). « Design fixation », *Design studies*, 12, n° 1, p. 3-11.
- Jefferson O.A., Jaffe A., Ashton D., Warren B., Koellhofer D., Dulleck U., Ballagh A., Moe J., Dicuccio M., Ward K., Bilder G., Dolby K., Jefferson R.A. (2018). « Mapping the global influence of published research on industry and innovation », *Nature*, 36, n° 1, p. 31-40.
- Jensen R., Thursby M. (2001). « Proofs and prototypes for sale: The licensing of University inventions », *American Economic Review*, 91, n° 1, p. 240-259.
- Johnson M., Monsen E.W., MacKenzie N.G. (2017). « Follow the Leader or the Pack? Regulatory Focus and Academic Entrepreneurial Intentions », *Journal of Product Innovation Management*, 34, n° 2, p. 181-200.
- Jones B.F. (2009). « The burden of knowledge and the “death of the renaissance man”: Is innovation getting harder? », *Review of Economic Studies*, 76, n° 1, p. 283-317.
- Jung H.J., Lee J.J. (2014). « The impacts of science and technology policy interventions on university research: Evidence from the U.S. National Nanotechnology Initiative », *Research Policy*, 43, n° 1, p. 74-91.
- Kaplan S., Tripsas M. (2008). « Thinking about technology: Applying a cognitive lens to technical change », *Research Policy*, 37, n° 5, p. 790-805.
- Katila R. (2002). « New Product Search over Time: Past Ideas in Their Prime? », *The Academy of Management Journal*, 45, n° 5, p. 995-1010.
- Katila R., Ahuja G. (2002). « Something Old, Something New: A Longitudinal Study of Search Behavior and New Product Introduction », *Academy of Management Journal*, 45, n° 6, p. 1183-1194.
- Katz J.S., Martin B.R. (1997). « What is Research Collaboration », *Research Policy*, 26, p. 1-18.
- Kerr C.I., Ivey P.C. (2003). « The Engineering Doctorate model of consultant/researcher/innovator/entrepreneur for new product development - A gas turbine instrumentation case study », *Technovation*, 23, n° 2, p. 95-102.
- Klasing Chen M., Akin P., Lagadec L.-R., Laousse D., Masson P. Le, Weil B. (2017). « Designing the missing link between science and industry: Organizing partnership based on dual generativity », *21st International Conference on Engineering Design, ICED 2017*, 4, n° DS87-4, p. 307-316.
- Kline S.J. (1985). « Innovation Is Not a Linear Process », *Research Management*, 28, n° 4, p. 36-45.
- Kline S.J., Rosenberg N. (1986). « An overview of innovation »,.
- Klofsten M., Jones-Evans D. (2000). « Comparing Academic Entrepreneurship in Europe -The Case of Sweden and Ireland », *Small Business Economics*, 14, n° 4, p. 299-309.
- Kneeland M.K., Schilling M.A., Aharonson B.S. (2020). « Exploring uncharted territory: Knowledge search processes in the origination of outlier innovation », *Organization Science*, 31, n° 3, p. 535-557.
- Kogut B., Zander U. (1992). « Knowledge of the Firm , Combinative Capabilities , and the Replication of Technology », *Organization Science*, 3, n° 3, p. 383-397.
- Kokshagina O., Masson P. Le, Weil B., Felk Y. (2014). « Innovative field exploration and associated patent portfolio design models », *Research in Interactive Design*, 4, p. 402-408.
- Kolaczyk E.D. (2009). *Statistical Analysis of Network Data. Methods and Models*, Springer.
- Koppman S., Leahey E. (2019). « Who moves to the methodological edge? Factors that encourage scientists to use unconventional methods », *Research Policy*, 48, n° 9, p. 103807.
- Korotayev A., Bilyuga S., Belalov I., Goldstone J. (2018). « Oil prices, socio-political destabilization risks, and future energy technologies », *Technological Forecasting and Social Change*, 128, n° May 2017, p. 304-310.
- Krawczyk-Stuss M., Ostrowska A., Łapińska B., Nowak J., Bołtacz-Rzepkowska E. (2015). « Evaluation of Shear Bond Strength of the Composite to Biodentine with Different Adhesive Systems », *Dental and Medical Problems*, 52, n° 4,

- p. 434-439.
- Kuhn T.S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press.
- Kyle M., Perrot A. (2021). « Innovation pharmaceutique : comment combler le retard français ».
- Lacetera N. (2009). « Different missions and commitment power in R&D organizations: Theory and evidence on industry-university alliances », *Organization Science*, 20, n° 3, p. 565-582.
- Lallé B. (2004). « Production de la connaissance et de l'action en sciences de gestion », *La Revue Française de Gestion*, 158, n° 1, p. 45-65.
- Lam A. (2011). « What motivates academic scientists to engage in research commercialization: “Gold”, “ribbon” or “puzzle”? », *Research Policy*, 40, n° 10, p. 1354-1368.
- Lamy E. (2006). *La fragmentation de la science à l'épreuve des start-ups . Retour critique sur un constructivisme social au travers de l'étude des modes de coordination des pratiques scientifiques et marchandes lors des projets de création d'entreprise par des chercheurs*, Thèse de doctorat.
- Lander E.S. (2015). « Perspective The Heroes of CRISPR », *Cell*, 164, n° 1-2, p. 18-28.
- Lane P., Koka B.R., Pathak S., Lane P.I. (2006). « The Reification of Absorptive Capacity: A Critical Review and Rejuvenation of the Construct », *The Academy of Management Review*, 31, n° 4, p. 833-863.
- Larivière V. (2012). « On the shoulders of students? The contribution of PhD students to the advancement of knowledge », *Scientometrics*, 90, n° 2, p. 463-481.
- Laursen K., Salter A. (2006). « Open for innovation: The role of openness in explaining innovation performance among U.K. manufacturing firms », *Strategic Management Journal*, 27, n° 2, p. 131-150.
- Laursen K., Salter A.J. (2014). « The paradox of openness: Appropriability, external search and collaboration », *Research Policy*, 43, n° 5, p. 867-878.
- Lavie D., Drori I. (2012). « Collaborating for knowledge creation and application: The case of nanotechnology research programs », *Organization Science*, 23, n° 3, p. 704-724.
- Lawson B., Samson D. (2001). « Developing Innovation Capability in Organisations: a Dynamic Capabilities Approach », *International Journal of Innovation Management*, 05, n° 03, p. 377-400.
- Lawson C. (2013). « Academic patenting: The importance of industry support », *Journal of Technology Transfer*, 38, n° 4, p. 509-535.
- Lee Y.S. (2000). « The sustainability of university-industry research collaboration: An empirical assessment », *Journal of Technology Transfer*, 25, n° 2, p. 111-133.
- Lenfle S. (2011). « The strategy of parallel approaches in projects with unforeseeable uncertainty: The Manhattan case in retrospect », *International Journal of Project Management*, 29, n° 4, p. 359-373.
- Lenfle S., Petitgirard L. (2020). « L'invention du transistor aux Bell Labs ou la création d'une expertise sur un domaine inconnu », *Entreprises & Histoire*, 98, n° 1, p. 94-119.
- Levin G.S., Stephan E.P. (1991). « Research Productivity Over the Life Cycle: Evidence for Academic Scientists », *The American Economic Review*, 1991, p. 114-132.
- Levinthal D.A., March J.G. (1993). « The Myopia of Learning », *Strategic Management Journal*, 14, p. 95-112.
- Leydesdorff L., Kushnir D., Rafols I. (2014). « Interactive overlay maps for US patent (USPTO) data based on International Patent Classification (IPC) », *Scientometrics*, 98, n° 3, p. 1583-1599.
- Li J., Yin Y., Fortunato S., Wang D. (2019). « A dataset of publication records for Nobel laureates », *Scientific data*, 6, n° 1, p. 33.
- Li S., Garces E., Daim T. (2019). « Technological Forecasting & Social Change Technology forecasting by analogy-based on social network analysis : The case of autonomous vehicles », *Technological Forecasting & Social Change*, 148, n° September 2018, p. 119731.
- Lin M.W., Bozeman B. (2006). « Researchers' industry experience and productivity in university-industry research centers: A “scientific and technical human capital” explanation », *Journal of Technology Transfer*, 31, n° 2, p. 269-290.
- Lipartito K. (2009). « Rethinking the Invention Factory: Bell Laboratories in Perspective », dans CLARKE S.H., LAMOREAUX N.R., USSELMAN S.W. (dirs.), *The Challenge of Remaining Innovative: Insights from Twentieth-century American Business*, Stanford University Press, Stanford, p. 132-162.
- Lobo J., Strumsky D. (2019). « Sources of inventive novelty: two patent classification schemas, same story », *Scientometrics*, 120, n° 1, p. 19-37.
- Looy B. Van, Callaert J., Debackere K. (2006). « Publication and patent behavior of academic researchers: Conflicting, reinforcing or merely co-existing? », *Research Policy*, 35, n° 4, p. 596-608.
- Louis K.S., Jones L.M., Anderson M.S., Blumenthal D., Campbell E.G. (2001). « Entrepreneurship, secrecy, and productivity: A comparison of clinical and non-clinical life sciences faculty », *Journal of Technology Transfer*, 26, n° 3, p. 233-245.
- Mangematin V. (2000). « PhD job market: Professional trajectories and incentives during the PhD », *Research Policy*, 29, n°

6, p. 741-756.

- Mansfield E. (1991). « Academic Research and Industrial Innovation », *Research Policy*, 20, n° 1, p. 1-12.
- Mansfield E. (1995). « Academic Research Underlying Industrial Innovations : Sources , Characteristics , and Financing », *The review of economics and statics*, 77, n° 1, p. 55-65.
- March J.G. (1991). « Exploration and Exploitation in Organizational Learning », *Organization Science*, 2, n° 1, p. 71-87.
- Markham S.K., Lee H. (2013). « Product development and management association's 2012 comparative performance assessment study », *Journal of Product Innovation Management*, 30, n° 3, p. 408-429.
- Mårtensson P., Fors U., Wallin S.B., Zander U., Nilsson G.H. (2016). « Evaluating research: A multidisciplinary approach to assessing research practice and quality », *Research Policy*, 45, n° 3, p. 593-603.
- Martinez C. (2010). « Insight into different types of patent families ».
- Martínez C. (2011). « Patent families: When do different definitions really matter? », *Scientometrics*.
- Marx M., Fuegi A. (2019). « Reliance on Science: Worldwide Front-Page Patent Citations to Scientific Articles », *Strategic Management Journal*, n° January, p. 1-23.
- Marx M., Fuegi A. (2020). « Reliance on science: Worldwide front-page patent citations to scientific articles », *Strategic Management Journal*, 41, n° 9, p. 1572-1594.
- Masson P. Le (2001). *De la R&D à la R.I.D.: Modélisation des fonctions de conception et nouvelles organisations de la R&D*, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1664 p.
- Masson P. Le (2020). « Quels modèles pour une recherche à double impact ? », dans ARCHAMBAULT V., POPIOLEK N. (dirs.), *Histoires de Science et Entreprise N°4*, Presse des, p. 47-80.
- Masson P. Le, Weil B. (2021). « Histoire de l'entreprise et révolutions scientifiques : inventer des formes de liberté et de responsabilité face à l'inconnu », dans p. 1-35.
- Masson P. Le, Weil B. (2016). « Fayol, Guillaume, Chevenard - La science, l'industrie et l'exploratoire de l'inconnu : logique et gouvernance d'une recherche conceptive », *Entreprises & Histoire*, 83, n° 2, p. 79-107.
- Masson P. Le, Weil B., Hatchuel A. (2010a). « The design activity and innovation capability », dans *Strategic Management of Innovation and Design*, Cambridge University Press, p. 51-66.
- Masson P. Le, Weil B., Hatchuel A. (2010b). *Strategic Management of Innovation and Design*, Cambridge University Press.
- Masson P. Le, Weil B., Hatchuel A. (2014). *Theorie, méthodes et organisations de la conception*, Presse des Mines.
- Masson P. Le, Weil B., Hatchuel A. (2017). *Design Theory: Methods and Organization for Innovation*, Springer.
- Mazzucato M., Robinson D.K.R. (2018). « Co-creating and directing Innovation Ecosystems? NASA's changing approach to public-private partnerships in low-earth orbit », *Technological Forecasting and Social Change*, 136, p. 166-177.
- Merton R.K. (1973). *The Sociology of Science: Theoretical and Empirical Investigations*, University, University of Chicago Press.
- MESRI (2020). « L'Etat de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche, et de l'Innovation en France ».
- Meyer-Krahmer F., Schmoch U. (1998). « Science-based technologies: University-industry interactions in four fields », *Research Policy*, 27, p. 835-851.
- Miller K., McAdam R., McAdam M. (2016). « A systematic literature review of university technology transfer from a quadruple helix perspective: toward a research agenda », *R&D Management*, 48, n° 1, p. 7-24.
- Miller K., McAdam R., McAdam M. (2018). « An Exploration of the Role of Value Creation and Value Capture in University Technology Transfer Business Models: A Quadruple Helix Stakeholder Perspective », p. 1-47.
- Mingers J., Leydesdorff L. (2015). « A review of theory and practice in scientometrics », *European Journal of Operational Research*, 246, n° 1, p. 1-19.
- Mirc N., Rouzies A., Teerikangas S. (2017). « Do Academics Actually Collaborate in the Study of Interdisciplinary Phenomena? A Look at Half a Century of Research on Mergers and Acquisitions », *European Management Review*, 14, n° 3, p. 333-357.
- Mirowski P. (2011). *Science-Mart: Privatizing American Science*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, and London, England.
- Mithani M.A. (2020). « Adaptation in the face of the new normal », *Academy of Management Perspectives*, 34, n° 4, p. 508-530.
- Moncada-Paternò-Castello P., Ciupagea C., Smith K., Tübke A., Tubbs M. (2010). « Does Europe perform too little corporate R&D? A comparison of EU and non-EU corporate R&D performance », *Research Policy*, 39, n° 4, p. 523-536.
- Moutinho P.S.F., Fontes M., Godinho M.M. (2007). « Do individual factors matter ? A survey of scientists ' patenting in Portuguese public research organisations », *Scientometrics*, 70, n° 2, p. 355-377.
- Mowery D. (2009). « Plus ça change: Industrial R&D in the "third industrial revolution" », *Industrial and Corporate Change*, 18, n° 1, p. 1-50.
- Mowery D., Nelson R., Sampat B., Ziedonis A. (2001). « The growth of patenting and licensing by U.S. universities: An

- assessment of the effects of the Bayh-Dole act of 1980 », *Research Policy*, 30, n° 1, p. 99-119.
- Mowery D., Oxley J. (1995). « Inward technology transfer and competitiveness: the role of national innovation systems », *Cambridge Journal of Economics*, p. 67-93.
- Mukherjee A., Stern S. (2009). « Disclosure or secrecy? The dynamics of Open Science », *International Journal of Industrial Organization*, 27, n° 3, p. 449-462.
- Murray F. (2010). « The Oncomouse That Roared : Hybrid Exchange Strategies as a Source of Distinction at the Boundary of Overlapping Institutions », *American Journal of Sociology*, 116, n° 2, p. 341-388.
- Murray F., Aghion P., Dewatripont M., Kolev J., Stern S. (2009). « Of Mice and Academics: examining the effect of openness on innovation ».
- Nagle F., Teodoridis F. (2019). « Jack of all trades and master of knowledge: The role of diversification in new distant knowledge integration », *Strategic Management Journal*, 41, n° 1, p. 55-85.
- Nakamura H., Suzuki S., Sakata I., Kajikawa Y. (2015). « Knowledge combination modeling: The measurement of knowledge similarity between different technological domains », *Technological Forecasting and Social Change*, 94, p. 187-201.
- Narayanamurti V., Odumosu T., Vinsel L. (2013). « RIP : The Basic / Applied Research Dichotomy », *Issues in Science & Technology*, 29, n° 2, p. 31-36.
- Narayanamurti V., Odumosu T. (2016). *Cycles of Invention and Discovery: Rethinking the Endless Frontier*.
- Narin F., Hamilton K.S., Olivastro D. (1997). « The increasing linkage between U.S. technology and public science », *Research Policy*, 26, p. 317-330.
- Nelson R.R. (1962). *The Link Between Science and Invention: The Case of the Transistor*.
- Nelson R.R. (1959). « The Simple Economics of Basic Scientific Research », *Journal of Political Economy*, 67, n° 3, p. 297-306.
- Nelson R., Winter G.S. (1982). *An Evolutionary Theory of Economic Change*, Harvard University Press (MA).
- Nerkar A. (2003). « Old is gold? The value of temporal exploration in the creation of new knowledge », *Management Science*, 49, n° 2, p. 211-229.
- Nobel Committee (2020). « Scientific Background on the Nobel Prize in Chemistry 2020 ».
- Nonaka I. (1994). « A dynamic theory of organizational knowledge creation », *Organization Science*, 5, n° 1, p. 14-37.
- Nooteboom B., Haverbeke W. Van, Duysters G., Gilsing V., Oord A. van den (2007). « Optimal cognitive distance and absorptive capacity », *Research Policy*, 36, n° 7, p. 1016-1034.
- Nowotny H., Scott P., Gibbons M. (2001). *Rethinking Science: Knowledge and the Public*.
- O'Connor G.C. (2008). « Major innovation as a dynamic capability: A systems approach », *Journal of Product Innovation Management*, 25, n° 4, p. 313-330.
- O'Reilly C.A., Tushman M.L. (2008). « Ambidexterity as a dynamic capability: Resolving the innovator's dilemma », *Research in Organizational Behavior*, 28, p. 185-206.
- OECD (2013). « Commercialising Public Research: New Trends and Strategies ».
- OECD (2015). « Frascati Manual ».
- Office E.P. (2019). « PATSTAT Global, Data Catalog ».
- Oreskes N., Conway E.M. (2010). *Merchants of Doubt. How a Handful of Scientists Obscured the Truth on Issues from Tobacco Smoke to Global Warming*, Bloomsbury Press, New York.
- Owen-Smith J. (2003). « From separate systems to a hybrid order: Accumulative advantage across public and private science at Research One universities », *Research Policy*, 32, n° 6, p. 1081-1104.
- Owen-Smith J., Powell W.W. (2001). « To patent or not: Faculty decisions and institutional success at technology transfer », *Journal of Technology Transfer*, 26, n° 1-2, p. 99-114.
- Owen-Smith J., Powell W.W. (2004). « Knowledge Networks as Channels and Conduits: The Effects of Spillovers in the Boston Biotechnology Community », *Organization Science*, 15, n° 1, p. 5-21.
- Pahl G., Beitz W. (2013). *Engineering design: a systematic approach*, WALLACE K. (dir.), Springer.
- Park G., Shin J., Park Y. (2006). « Measurement of depreciation rate of technological knowledge: Technology cycle time approach », *Journal of Scientific and Industrial Research*, 65, n° 2, p. 121-127.
- PATSTAT (2020). « Autumn Ed. Data Coverage ».
- Pearson C.M., Clair J. (1998). « Reframing Crisis Management », *The Academy of Management Review*, 23, n° 1, p. 59-76.
- Penders B., Verbakel J.M.A., Nelis A. (2009). « The Social Study of Corporate Science: A Research Manifesto », *Bulletin of Science, Technology & Society*, 29, n° 6, p. 439-446.
- Perkmann M., Salandra R., Tartari V., McKelvey M., Hughes A. (2021). « Academic engagement: A review of the literature 2011-2019 », *Research Policy*, 50, n° 1.
- Perkmann M., Tartari V., McKelvey M., Autio E., Broström A., D'Este P., Fini R., Geuna A., Grimaldi R., Hughes A.,

- Krabel S., Kitson M., Llerena P., Lissoni F., Salter A., Sobrero M. (2013). « Academic engagement and commercialisation: A review of the literature on university-industry relations », *Research Policy*, 42, n° 2, p. 423-442.
- Perkmann M., Walsh K. (2009). « The two faces of collaboration: Impacts of university-industry relations on public research », *Industrial and Corporate Change*, 18, n° 6, p. 1033-1065.
- Perrons R.K. (2014). « How innovation and R&D happen in the upstream oil & gas industry: Insights from a global survey », *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 124, p. 301-312.
- Phelps C., Heidl R., Wadhwa A. (2012). *Knowledge, Networks, and Knowledge Networks: A Review and Research Agenda*.
- Pisano G.P. (2010). « The Evolution of Science- Based Business : Innovating How We Innovate », *Industrial and Corporate Change*, 19, n° 2, p. 465-482.
- Plantec Q., Masson P. Le, Weil B. (2019). « Inventions and scientific discoveries: impact of designers' collaborations on creative outputs. An analysis towards fixation effects. », *Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design*, p. 159-168.
- Poegel F., Harhoff D., Gaessler F., Baruffaldi S. (2019). « Science quality and the value of inventions », *Science Advances*, 5, n° 12, p. 1-9.
- Popper K. (1959). *The logic of Scientific Discovery*, Hutchinson, London.
- Price W.J., Bass L.W. (1969). « Scientific Research and the Innovative Process », *Science*, 164, n° 3881, p. 802-806.
- Proctor R.N., Girel M. (2014). *Golden Holocaust - La conspiration des industriels du tabac*, Des Equate.
- Purcell A.T., Gero J.S. (1996). « Design and Other Types of Fixation or Is Fixation Always Incompatible with Innovation ? », *Design Studies*, 17, n° 4, p. 363-383.
- Raisch S., Birkinshaw J., Probst G., Tushman M.L. (2009). « Organizational ambidexterity: Balancing exploitation and exploration for sustained performance », *Organization Science*, 20, n° 4, p. 685-695.
- Rentocchini F., D'Este P., Manjarrés-Henríquez L., Grimaldi R. (2014). « The relationship between academic consulting and research performance: Evidence from five Spanish universities », *International Journal of Industrial Organization*, 32, n° 1, p. 70-83.
- Roach M., Cohen W.M. (2013). « Lens or Prism? Patent citations as a measure of knowledge flows from public research », *Management Science*, 59, n° 2, p. 504-525.
- Robinson D.K.R., Mazzucato M. (2019). « The evolution of mission-oriented policies: Exploring changing market creating policies in the US and European space sector », *Research Policy*, 48, n° 4, p. 936-948.
- Robinson D.K.R., Rip A., Mangematin V. (2007). « Technological agglomeration and the emergence of clusters and networks in nanotechnology », *Research Policy*, 36, n° 6, p. 871-879.
- Robinson D.K.R., Masson P. Le, Weil B. (2012). « Waiting Games : innovation impasses in situations of high uncertainty », *Technology Analysis and Strategic Management*, 24, n° 6, p. 543-548.
- Rosenberg N. (1990). « Why do firms do basic research (With their own money) », *Research Policy*, 19, p. 165-174.
- Rosenberg N. (1998). « Chemical engineering as a general purpose technology », dans HELPMAN E. (dir.), *General Purpose Technologies and Economic Growth*, p. 315.
- Rosenkopf L., Nerkar A. (2001). « Beyond local search: Boundary-spanning, exploration, and impact in the optical disk industry », *Strategic Management Journal*, 22, n° 4, p. 287-306.
- Rothaermel F.T., Agung S.D., Jiang L. (2007). « University entrepreneurship: A taxonomy of the literature », *Industrial and Corporate Change*, 16, n° 4, p. 691-791.
- Rothwell R., Zegdev W. (1985). *Reindustrialization and Technology*, Routledge.
- Salandra R., Criscuolo P., Salter A. (2021). « Directing scientists away from potentially biased publications: the role of systematic reviews in health care », *Research Policy*, 50, n° 1, p. 104130.
- Salimi N., Bekkers R., Frenken K. (2015a). « Does working with industry come at a price? A study of doctoral candidates' performance in collaborative vs. non-collaborative Ph.D. projects », *Technovation*, 41, p. 51-61.
- Salimi N., Bekkers R., Frenken K. (2015b). « Governance mode choice in collaborative Ph.D. projects », *Journal of Technology Transfer*, 40, n° 5, p. 840-858.
- Salimi N., Bekkers R., Frenken K. (2016). « Success factors in university-industry PhD projects », *Science and Public Policy*, 43, n° 6, p. 812-830.
- Sampat B.N. (2010). « When do applicants search for prior art? », *Journal of Law and Economics*, 53, n° 2, p. 399-416.
- Sarica S., Yan B., Bulato G., Jaipurkar P., Luo J. (2019). « Data-Driven Network Visualization for Innovation and Competitive Intelligence », *Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences*, p. 127-135.
- Schlagberger E.M., Bornmann L., Bauer J. (2016). « At what institutions did Nobel laureates do their prize-winning work? An analysis of biographical information on Nobel laureates from 1994 to 2014 », *Scientometrics*, 109, n° 2, p. 723-767.
- Schoen A., Villard L., Laurens P., Cointet J.-P., Heimeriks G., Alkemade F. (2012). « The Network Structure of Technological Developments ; Technological Distance as a Walk on the Technology Map », *STI Conference*, p. 734-742.

- Schuelke-Leech B.-A. (2013). « Resources and research : An empirical study of the influence of departmental research resources on individual STEM researchers involvement with industry », *Research Policy*, 42, n° 9, p. 1667-1678.
- Schumpeter J.A. (1934). *Theory of Economic Development*, New Editio, Routledge.
- Segrestin B. (2005). « Partnering to explore: The Renault-Nissan Alliance as a forerunner of new cooperative patterns », *Research Policy*, 34, n° 5, p. 657-672.
- Shepard H.A. (1956). « Nine Dilemmas in Industrial Research », *Administrative Science Quarterly*, 1, n° 3, p. 295-309.
- Shibayama S. (2019). « Sustainable development of science and scientists: Academic training in life science labs », *Research Policy*, 48, n° 3, p. 676-692.
- Shibayama S., Walsh J.P., Baba Y. (2012). « Academic Entrepreneurship and Exchange of Scientific Resources: Material Transfer in Life and Materials Sciences in Japanese Universities », *American Sociological Review*, 77, n° 5, p. 804-830.
- Shockley W. (1976). « The Path to the Conception of the Junction Transistor », *IEEE Transactions on Electron Devices*, 23, n° 7, p. 597-620.
- Sieg J.H., Wallin M.W., Krogh G. Von (2019). « Managerial challenges in open innovation: a study of innovation intermediation in the chemical industry », *R and D Management*, p. no.
- Siegel D.S., Waldman D., Link A. (2003a). « Assessing the impact of organizational practices on the relative productivity of university technology transfer offices: An exploratory study », *Research Policy*, 32, n° 1, p. 27-48.
- Siegel D.S., Waldman D., Link A.N. (2003b). « Assessing the impact of organizational practices on the productivity of university technology transfer offices: an exploratory study », *Research Policy*, 32, n° 1, p. 27-48.
- Simon H., Newell A. (1958). « Heuristic problem solving: the next advance in operations research », *Operation Research*, 6, n° 1, p. 1-10.
- Sincolle V. (2009). *De la gestion des brevets d'inventions au pilotage de l'innovation: le cas d'un centre de recherche de haute technologie*, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique, 266 p.
- Slaughter S. (1993). « Beyond Basic Science: Research University Presidents' Narratives of Science Policy », *Science, Technology, & Human Values*, 18, n° 3, p. 278-302.
- Slaughter S., Campbell T. (2002). « The "Traffic" in Graduate Students : Graduate Students as Tokens of Exchange between Academe and Industry », *Science, Technology & Human Values*, 27, n° 2, p. 282-312.
- Squicciarini M., Denis H., Criscuolo C. (2013). « Supporting investment in knowledge capital, growth and innovation ».
- Stokes D. (1997). *Pasteur's Quadrant. Basic science and technological innovation*, Brookings Institution.
- Strumsky D., Lobo J. (2015). « Identifying the sources of technological novelty in the process of invention », *Research Policy*, 44, n° 8, p. 1445-1461.
- Stuart T.E., Podolny J.M. (1996). « Local search and the evolution of technological capabilities », *Strategic Management Journal*, 17, n° S1, p. 21-38.
- Sydow J., Schreyögg G., Koch J. (2009). « Organizational Path Dependence: opening the black box », *Academy of Management Review*, 34, n° 4, p. 689-709.
- Tahamtan I., Bornmann L. (2019). « What do citation counts measure? An updated review of studies on citations in scientific documents published between 2006 and 2018 », *Scientometrics*, 121, n° 3, p. 1635-1684.
- Tannery F. (2009). « Stratégie en temps de crise », *Revue Française de Gestion*, 193, n° 3, p. 21-27.
- Tartari V., Breschi S. (2012). « Set them free: Scientists' evaluations of the benefits and costs of university-industry research collaboration », *Industrial and Corporate Change*, 21, n° 5, p. 1117-1147.
- Tartari V., Perkmann M., Salter A. (2014). « In good company: The influence of peers on industry engagement by academic scientists », *Research Policy*, 43, n° 7, p. 1189-1203.
- Tavares O., Soares D., Sin C. (2020). « Industry–university collaboration in industrial doctorates: A trouble-free marriage? », *Industry and Higher Education*, 34, n° 5, p. 312-320.
- Taylor Aldridge T., Audretsch D. (2011). « The Bayh-Dole act and scientist entrepreneurship », *Research Policy*, 40, n° 8, p. 1058-1067.
- Teece D.J. (1996). « Firm organization, industrial structure, and technological innovation », *Journal of Economic Behavior and Organization*, 31, p. 193-225.
- Teodoridis F. (2017). « Understanding Team Knowledge Production: The Interrelated Roles of Technology and Expertise », *Management Science*, 64, n° 8, p. 2789.
- Thomson-Reuters (2017). « Top-100 Global Energy Leaders ».
- Thrane S., Blaabjerg S., Møller R.H. (2010). « Innovative path dependence: Making sense of product and service innovation in path dependent innovation processes », *Research Policy*, 39, n° 7, p. 932-944.
- Thune T., Børing P. (2015). « Industry PhD schemes: Developing innovation competencies in firms? », *Journal of the Knowledge Economy*, 6, n° 2, p. 385-401.
- Thursby J.G., Thursby M.C. (2002). « Who is selling the ivory tower? Sources of growth in university licensing »,

Management Science, 48, n° 1, p. 90-104.

Tijssen R. (2004). « Is the commercialisation of scientific research affecting the production of public knowledge? Global trends in the output of corporate research articles », *Research Policy*, 33, n° 5, p. 709-733.

Tijssen R. (2012). « Co-authored research publications and strategic analysis of public-private collaboration », *Research Evaluation*, 21, n° 3, p. 204-215.

Tijssen R. (2018). « Anatomy of use-inspired researchers: From Pasteur's Quadrant to Pasteur's Cube model », *Research Policy*, 47, n° 9, p. 1626-1638.

Toole A.A., Czarnitzki D. (2010). « Commercializing science: Is there a university "brain drain" from academic entrepreneurship? », *Management Science*, 56, n° 9, p. 1599-1614.

Trajtenberg M. (1990). « A Penny for Your Quotes: Patent Citations and the Value of Innovations », *The RAND Journal of Economics*, 21, n° 1, p. 172.

Trott P. (2011). *Innovation Management and New Product Development*.

Uzzi B., Spiro J. (2005). « Collaboration and creativity: The small world problem », *American Journal of Sociology*, 111, n° 2, p. 447-504.

Varenne F. (2011). *Modéliser le social : méthodes fondatrices et évolutions récentes*, Psycho Sup, Dunod, Paris.

Verhoeven D., Bakker J., Veugelers R. (2016). « Measuring technological novelty with patent-based indicators », *Research Policy*, 45, n° 3, p. 707-723.

Veugelers R., Cassiman B. (2005). « R&D cooperation between firms and universities. Some empirical evidence from Belgian manufacturing », *International Journal of Industrial Organization*, 23, n° 5-6, p. 355-379.

Veugelers R., Wang J. (2019). « Scientific novelty and technological impact », *Research Policy*, 48, n° 6, p. 1362-1372.

Wagner C.S., Horlings E., Whetsell T.A., Mattsson P., Nordqvist K. (2015). « Do nobel laureates create prize-winning networks? An analysis of collaborative research in physiology or medicine », *PLoS ONE*, 10, n° 7, p. 1-13.

Wenzel M., Stanske S., Lieberman M.B. (2021). « Strategic responses to crisis », *Strategic Management Journal*, 42, n° 2, p. 7-18.

West J., Bogers M. (2014). « Leveraging external sources of innovation: A review of research on open innovation », *Journal of Product Innovation Management*, 31, n° 4, p. 814-831.

West J., Salter A., Vanhaverbeke W., Chesbrough H. (2014). « Open innovation: The next decade », *Research Policy*, 43, n° 5, p. 805-811.

WIPO (2019). « Guide to the International Patent Classification ».

Wit-de Vries E. de, Dolfisma W.A., Windt H.J. van der, Gerkema M.P. (2018). « Knowledge transfer in university–industry research partnerships: a review », *Journal of Technology Transfer*, p. 1-20.

Yayavaram S., Ahuja G. (2008). « Decomposability in Knowledge Structures and Its Impact on the Usefulness of Inventions and Knowledge-base Malleability », *Administrative Science Quarterly*, 53, n° 2, p. 333-362.

Yayavaram S., Chen W.-R. (2015). « Changes in firm knowledge couplings and firm innovation performance: the moderating role of technological complexity », *Strategic Management Journal*, 36, p. 377-396.

Yin R.K. (2003). *Case study research: design and methods (3rd edition)*, Sage Publications Ltd, London.

Yusuf S. (2008). « Intermediating knowledge exchange between universities and businesses », *Research Policy*, 37, n° 8, p. 1167-1174.

Zahra S.A., Kaul A., Bolívar-Ramos M.T. (2018). « Why corporate science commercialization fails: Integrating diverse perspectives », *Academy of Management Perspectives*, 32, n° 1, p. 156-176.

Zucker L.G., Darby M.R. (1996). « Star scientists and institutional transformation: Patterns of invention and innovation in the formation of the biotechnology industry », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93, n° 23, p. 12709-12716.

Zucker L.G., Darby M.R., Armstrong J.S. (2002). « Commercializing knowledge: University science, knowledge capture, and firm performance in biotechnology », *Management Science*, 48, n° 1, p. 138-153.

Zuckerman H. (1977). *Scientific Elite : Nobel Laureates in the United States*, Foundation, Foundations of Higher Education (reprint 1995).

ANNEXE N°1 – LISTE DES ENTRETIENS, EVENEMENTS ET REUNIONS

1. Entretiens, évènements et réunions conduites dans le cadre de la thèse CIFRE avec l'INPI :

- Evènements auquel le chercheur a participé sous l'égide de l'INPI :

Evènements	Dates
Conférence Markus Evans – Stratégies de Protection et de Valorisation de la Propriété Industrielle (7ème édition)	07-09/11/2018
7ème Grand Forum des Stratégies d'Innovation – Club de Paris des Directeurs de l'Innovation	06/12/2018
VIVATECH (salon)	16/05/2019
L'Innovation par la Recherche Partenariale – Club de Paris des Directeurs de l'Innovation	07/03/2020

Tableau 24 - Evènements en lien avec la valorisation menés avec l'INPI

- Comités de pilotage de thèse CIFRE organisés avec l'INPI :

Comités de pilotage	Participants	Dates
Lancement de la thèse	Q. Plantec, P. Le Masson, B. Weil, V. Archambault, F. Caillaud	02/08/2018
Point d'étape N°1	Q. Plantec, P. Le Masson, B. Weil, V. Archambault, F. Caillaud	12/12/2018
Point d'étape N°2	Q. Plantec, P. Le Masson, B. Weil, V. Archambault, F. Caillaud	08/02/2019
Point d'étape N°3	Q. Plantec, P. Le Masson, B. Weil, V. Archambault, F. Caillaud	07/10/2019
Point d'étape N°4	Q. Plantec, P. Le Masson, B. Weil, N. Sennequier, F. Caillaud	11/12/2019
Point d'étape N°5	Q. Plantec, P. Le Masson, B. Weil, N. Sennequier, F. Caillaud, P. Hoang	21/10/2020

Tableau 25 - Comités de Pilotage de la thèse avec l'INPI

- Efforts de valorisation des travaux en interne INPI :

Contexte	Date
Réunion de travail INPI & Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE)	26/02/2019
INPI – Directeur Général	31/08/2019
INPI – Directeur Général	18/02/2020

INPI – Responsable de l’offre client PME / TPE	20/06/2020
INPI – Comité métier	10/12/2020
INPI – Directeur Général	09/02/2021
INPI – Responsable du programme de valorisation université – industrie	25/02/2021
INPI - Délégué Régional Provence-Alpes-Côte d’Azur (PACA)	01/04/2021
INPI – Responsable du programme de valorisation université – industrie et Délégué Régional PACA	14/04/2021
INPI – GT Programme Alliance PI	02/06/2021 (à venir)

Tableau 26 - Présentations praticiens

2. Entretiens, évènements et réunions conduites dans le cadre du travail de recherche partenariale avec l’ANRT :

- Réunions de travail avec l’équipe projet ANRT :

Réunions de travail	Dates
Association Nationale de la Recherche & de la Technologie (ANRT) – Direction Générale	28/06/2018
Ministère de l’Enseignement Supérieur de la Recherche et de l’Innovation (responsable des CIFRE), Club ressourcement Scientifique de l’ANRT, Direction Générale de l’ANRT	22/10/2018
Association Nationale de la Recherche & de la Technologie (ANRT) – Direction Générale	12/09/2019
Association Nationale de la Recherche & de la Technologie (ANRT) – Direction Générale	15/09/2020
Association Nationale de la Recherche & de la Technologie (ANRT) – Direction Générale	05/11/2020

Tableau 27 - Réunions de travail avec les équipes de l’ANRT

- Efforts de valorisation des travaux menés avec l’ANRT :

Effort de valorisation	Date
Ministère de l’Enseignement Supérieur de la Recherche et de l’Innovation (responsable des CIFRE), Club ressourcement Scientifique de l’ANRT, Direction Générale de l’ANRT	22/10/2018
40 ans du dispositif CIFRE (ANRT, MESRI, en présence de Madame la Ministre de l’Enseignement Supérieur de la Recherche et de l’Innovation)	15/03/2021
Petit-déjeuner stratégique de l’ANRT	12/10/2021 (à venir)

Tableau 28 - Présentations praticiens

3. Entretiens, évènements et réunions conduites dans le cadre du travail de recherche partenariale avec Total :

- Entretiens qualitatifs réalisés avec des personnels Total :

Entretiens	Dates
Responsable compétences – Total R&D Groupe	06/12/2018
Responsable Conseillers Scientifiques – Total R&D Groupe	06/12/2018
Chargé de mission expertise stratégique – Total Marketing & Services	09/01/2019
Directrice du Comité Technique Groupe (CTG) – R&D Groupe	05/02/2019
Conseiller technique Opérations et Production – Total Raffinage Chimie	13/02/2019
Conseiller Scientifique – Total Exploration Production	21/02/2019
Responsable du dictionnaire des compétences – Total R&D Groupe	22/02/2019
Responsable carrière expertise – Total Marketing & Services	26/02/2019
VP Opérations cartes et monétiques Europe – Total Marketing & Services	07/05/2019
Manager stratégie GNL Maritime – Total Marketing & Services	09/05/2019
Responsable d'études Propriété Industrielle (2 pers.) – R&D Groupe	22/05/2019
Expert Scientifique & Technique - Total Integrated Gas, Renewable and Power	02/08/2019
Chef de Projet Innovation - Total Exploration Production	19/08/2019

Tableau 29 - Entretiens réalisés avec Total

- Réunions de travail avec l'équipe projet Total :

Réunions de travail	Dates
Total – Equipe Compétences R&D Groupe (kick-off), Responsable Compétence Total Marketing & Service	04/12/2018
Total – Equipe Compétences R&D Groupe (point d'étape #1), Responsable Compétence Total Marketing & Service	05/02/2019
Total – Equipe Compétences R&D Groupe (point d'étape #2), Responsable Compétence Total Marketing & Service	05/03/2019
Total – Equipe Compétences R&D Groupe (point d'étape #3)	12/06/2019
Total – Equipe Compétences R&D Groupe et Directeur de la Propriété Intellectuelle (point d'étape #4)	27/08/2019
Total – Equipe Compétences R&D Groupe (point d'étape #5)	06/09/2019
Total – Equipe Compétences R&D Groupe (clôture)	12/12/2019
Total – Point Conseil Expertise Compétences	16/06/2020
Total – Atelier Expertise R&D Innovation	30/06/2020

Tableau 30 - Réunion de travail avec Total R&D Groupe

- Efforts de valorisation des travaux menés avec Total :

Efforts de valorisation	Date
Total – Comité Semestriel Compétences R&D	17/04/2019
InnoEnergy School Total (presentation format poster)	10/10/2019

Tableau 31 – Effort de valorisation

ANNEXE N°2 – ARTICLE CONFERENCE ICED SOUMIS EN 2019 SUR LES COUPLAGES SCIENCE – INDUSTRIE

INVENTIONS AND SCIENTIFIC DISCOVERIES: IMPACT OF DESIGNERS' COLLABORATIONS ON CREATIVE OUTPUTS. AN ANALYSIS TOWARDS FIXATION EFFECTS.

Quentin PLANTEC, Pascal LE MASSON & Benoit WEIL

ABSTRACT: Scientific discoveries and inventions have long been established as two distinct and sequential activities. It has nonetheless been showed that project aiming at producing both scientific discoveries and inventions could record impressive results. Our investigations are focusing on the creativity of collaborations outputs: a first agent is entailed to design a scientific discovery and another one invention. We use fixation effects as a performance measurement indicator for creativity based on Design Theory.

We propose a first set of elements that can be suffering from fixation effects in both invention and scientific models designers reasoning. We propose a series of defixed inputs that could be shared between both designers to overcome their fixation effects. We highlight that if partners are engaged in one-way knowledge transfer it can conduct to "fixation traps. We define a set of restrictive conditions that could conduct to a "cross-defixation process": both actors would be able to create conjoint new inventions and scientific models in the non-fixed design path. In particular this process does not required designers to be defixed before starting the collaboration.

ACKNOWLEDGMENT: We acknowledge the very useful insights gave by Frédéric Caillaud, Deputy Director at Institut National de la Propriété Industrielle and in charge of innovation and Valérie Archambault, Deputy Director of Research at Mines Paristech PSL.

<p><i>To cite:</i> Plantec, Q., Le Masson, P., Weil, B. (2019) 'Inventions and Scientific Discoveries: Impact of Designers' Collaborations on Creativity. An Analysis Towards Fixation Effects', in <i>Proceedings of the 22nd International Conference on Engineering Design (ICED19)</i>, Delft, The Netherlands, 5-8 August 2019. DOI:10.1017/dsi.2019.19</p>
--

INVENTIONS AND SCIENTIFIC DISCOVERIES: IMPACT OF DESIGNERS' COLLABORATIONS ON CREATIVE OUTPUTS. AN ANALYSIS TOWARDS FIXATION EFFECTS.

1. Introduction

Scientific discoveries and inventions have long been established as two distinct and sequential activities. As Vannevar Bush wrote in its report on science organisation in the United States *Science the Endless Frontiers* in 1945: "*The simplest and most effective way in which the Government can strengthen industrial research is to support basic research and to develop scientific talent*" (Bush, 1945). Science has to do with discoveries, and industry - with the help of engineering design - has to use science to create inventions. Nevertheless, the so-called "linear model" was challenged by many scholar's contributions (for example see Balconi et al. (2010) for a comprehensive literature review). In particular, Stroke's seminal contribution regarding the "Pasteur Quadrant" (Stokes, 1997) claimed that most of the famous scientists of all time have been motivated by both practical contributions (ie. inventions) and theoretical understanding (ie. discoveries) simultaneously. He found historical examples such as Pasteur, Keynes or the Manhattan project's research team. In a very recent study, Goldstein and Narayanamurti (2018) gave very clear insights regarding invention and discovery coupled dynamic. They studied the Department of Energy (DoE) in the United States between 2010 and 2015 which was organised around a sharp dividing line between a basic research department (ie. that has to do the scientific discoveries) and an applied research department (ie. that has to do the inventions). But in 2007 the DoE launched a new department called Advanced Research Projects Agency - Energy (ARPA-E) to finance projects that are at the interface between both departments: "*the aim of ARPA-E appears to be funding projects that are too technology-focused to be funded as basic research but are too novel to be funded as applied research*"(Goldstein et Narayanamurti, 2018, p. 1507). Authors showed that projects conducted through ARPA-E get impressive results: 57% of ARPA-E projects get either one patent (ie. invention) or one significant scientific publication (ie. discovery) while the average for other projects is only 27%. But then why not always conducting projects encompassing both fundamental research and inventions? As shown by Calvert (2006) in an international qualitative study, many scholars and policy makers consider that basic research is characterised

by serendipity: unpredictability and generality of findings would be a driver for radical innovations. But in order to achieve those results, it has to be performed following a curiosity driven manner: “*Basic science produced plenty only so long as university researchers were left alone, unhampered by demand for short-term results or particular products*” (Slaughter, 1993, p. 284-285). And organisation that clearly separate those activities can record high performances in terms of science and inventions. For example the largest Public Research Organisation (PRO) in France, the Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA), is still organised with two distinct department regarding fundamental research ("CEA Science") and inventions ("CEA Tech"). In 2017, first, CEA Sciences recorded similar scientific publication performances than the MIT or Max Planck organisations. Second, CEA Tech, with six time less employees than Fraunhofer Gesellschaft, filled 608 patents which is almost the same number of patents than the German PRO (Comptes, 2018b).

In this apparently inconclusive debate we focused our investigations on a particular aspect of scientific and invention collaboration performances: the capacity to provide new scientific models and inventions that are "creative" or "original". This is an important stake as we can assume that it could be a starting point for radical innovations, even if it has to be coupled with additional factors such as business model, consumers' attempts, marketing, etc. There are many contributions in engineering design regarding creativity and originality when designing a particular artefact. Literature is nevertheless scarce from our understanding regarding science. As performance indicator, we use the concept of fixation effects. It illustrates a situation in which a designer is locked-in in a specific design path and is not able to propose other significantly different solutions. Those not reached solutions are then call "creative" or "original". **The research questions are then the following: in science - industry collaboration, how could the scientific partner help the industrial one to overcome its fixations effects regarding the design of an invention? Reciprocally, how could the industrial partner help the scientific one to overcome its fixations effects regarding the design of a scientific discovery?**

To reach this goal it is necessary to draw on a unified model of invention and scientific discoveries that helps to highlight those fixation effects. Design Theories have been helpful to model inventions which is a core historical objective in Design Theories. It has also been showed recently that Design Theories are a powerful resource to model scientific discoveries. In particular C-K theory is a unified model of Design Theories that (1) allows us to model both invention and scientific discoveries, (2) has been previously showed as a key resource to model fixation effects (Agogué et Le Masson, 2014), and (3) has been previously showed as a useful

theoretical framework to model partnership effects (Gillier, Kazakçı et Piat, 2012), in particular regarding science - industry partnership (Klasing Chen *et al.*, 2017). We then first briefly recall to reader C-K theory basic reasoning and we propose a model of invention and scientific discoveries according to this framework. Second, we draw on those models to show what fixation effects designers of inventions and scientific models can suffer from and what resources available help them to overcome those fixations. Third, we present a dynamic model of interactions between both designers to highlight conditions under which actors are able to overcome their fixations.

2. A model of science and invention reasoning through design theories: highlights of fixation effects

2.1. C-K Design Theory and fixations effects:

C-K Design Theory aims at providing a unified and rigorous framework for design and has been initially developed by Hatchuel and Weil (2003, 2009). In particular, its ability to describe the generation of new objects and new knowledge has been highlighted both in academic literature and following industrial use. The theory is based on the interplay between two distinct but interdependent spaces. First, the knowledge space (K) contains all propositions with a logical status (ie. true or false) regarding available knowledge that a designer is able to draw on to perform its design activity. Second, the concept space (C) contains all propositions regarding outputs or objects set up by the designer but neither true nor false according to the state of the designer's knowledge. Indeed, when designers are faced with concepts, they cannot affirm whether such a thing may be possible or not. Those concepts are the partially unknown outputs or objects. Those propositions are qualified as “undecidable” relative to the content of the knowledge space (K) if it is not possible to prove that these are true or false. The C-space has a tree structure and each node represents a partition in sub-concepts. Furthermore, during the design process, both concept and knowledge spaces are expandable following four possible transformations: $C \rightarrow K$ (ie. conjunction); $K \rightarrow C$ (ie. disjunction); $C \rightarrow C$ (ie. partitions) and $K \rightarrow K$. In particular, the design process attempts to define a conjunction: to transform an “undecidable” proposition in the concept space into a logical proposition in the knowledge space.

C-K theory has allowed further theoretical development regarding fixation effects. Indeed, as the theory helps to represent different design path, it has been used to show how a designer could be locked-in in a specific design path and then not able to explore more innovative path

without being “defixed”(Agogué, 2012 ; Agogué *et al.*, 2014). In particular, the literature in management identified some innovations pathways do not seem achievable for a specific firm due to lack of knowledge, lack of absorptive capacity or its own historical pathway depending on its starting point and hazardous events (Sydow, Schreyögg et Koch, 2009). Kaplan and Tripsas (2008) introduced the notion of “cognitive path dependence” by showing how actors select ideas within a collective cognitive framework around a dominant technological trajectory. Thrane et al. (2010) then highlighted how collective cognitive framework can lead to constrain the exploration of alternatives. In particular, some fixation effects occur at a cognitive level due to the fact that people tend to generate ideas the most accessible in memory which might lead to fixation effects (Hatchuel, Le Masson et Weil, 2011). Agogué and Le Masson (2014) distinguish two forms of ideation reasoning. The first is a **fixated reasoning** based on the use of cognitive routines calling for existing solutions with stable paradigms. It tends to maintain already existing solutions and favour incremental innovation. If a whole innovation team involved in an ideation process adopted those reasoning - which is likely to be the case in a same organisation due to common constraints – incremental outcomes will not be challenged. The second is a more **explorative reasoning** that lead to propose more creative and disruptive ideas through a controlled exploration of alternatives. In particular it has been shown with simple tasks how fixation effects constrain creativity and how examples outside the fixed design-path help actors to stimulate their creativity through expansive concepts (Agogué, 2012; Camarda et al., 2017).

2.2. Modelling invention through Design Theory:

Invention is the "*accumulation and creation of knowledge that results in a new tool, device, or process that accomplishes a specific purpose*" (Narayanamurti, Odumosu et Vinsel, 2013, p. 31-32). To simplify our model we consider inventions only as patentable ones. This help us to draw on the literature in engineering design regarding what are the core criteria associated with invention. We acknowledge that there is a debate regarding originality of patent inventions and that it might exist high or low quality patents (cf. patent rating issues). Nevertheless, as we are focusing on creativity and originality of inventions the C-K theory will help us to classify inventions regarding design paths.

Drawing on C-K formalism, Sincholle (2009) and Le Masson et al. (2014) defined patents in an "Action - Effect - Knowledge" model in order to avoid an approach only based on legal and intellectual property. They proposed a patent content taxonomy comprising of three

elements. **Action** is defined as the solution brought by the invention (ie. intervention made on objects). **Effects** comprise of the action's effects on specific objects (ie. consequences brought by the action). **Knowledge** comprise of initial state of the art (K_0) and the results of the new action or effect. This model highlights a first patentability criteria: novelty. It is described by the following elements : "(1) *An invention shall be considered to be new if it does not form part of the state of the art. (2) The state of the art shall be held to comprise everything made available to the public by means of a written or oral description, by use, or in any other way, before the date of filing of the European patent application*" (art. 54 of the European Patent Convention). According to the model, it verifies the following formalism: $(A_1, \dots, A_n \rightarrow E_1, \dots, E_n) \notin K_0$. This model help us to define another key patentability criteria: the inventive step. "*An invention shall be considered as involving an inventive step if, having regard to the state of the art, it is not obvious to a person skilled in the art*" (art. 56 of the European Patent Convention). For example, if the person skilled in the art is capable to pose a similar problem than the one in the patent application, to solve it similarly to the proposed invention and to predict the results: the inventive step is not valid. It means that inventions cannot be the result of a new combination of already existing knowledge that the person skilled in the art (PSA) could have done (Le Masson, Weil et Hatchuel, 2014), then formally: $(A \rightarrow E) \notin PSA(K_0)$. In particular, the "C-K invent" method (Felk *et al.*, 2011 ; Kokshagina *et al.*, 2014) highlights that the inventive step can be modelled through an expansive partition, not related to $PSA(K_0)$, that expands the concept space. This expansive partition: "*significantly modify or propose new actions and effects to generate new sentences - new ideas for patent proposals*" (Kokshagina *et al.*, 2014, p. 405).

Based on this brief literature review, we can formulate the following assumptions regarding the design of an invention, understood as a patentable one:

- **Assumption 1.1 - state of the art knowledge acquisition:** a designer has to acquire a significant knowledge base relevant to its invention field (including a comprehensive state of the art comprising all available public data) in order to both design its invention and guarantee its novelty.
- **Assumption 1.2 - expansive partition:** a designer has to create a concept that is a new expansive partition not related to $PSA(K_0)$. The invention will be the result of a conjunction (ie. the new concept become true according to the designer's knowledge base).

2.3. Modelling invention through Design Theory:

Discoveries are “*creation of new knowledge and facts about the world*” (Narayanamurti, Odumosu et Vinsel, 2013, p. 32). Hatchuel et al. (2013) proposed a formalism of scientific discoveries through Design theories. According to the authors, discoveries are based on a scientific method which requires a logic of modelling and the core of the scientific conversation is then to focus on the consistency, validity, testability of models and to make advancement regarding how models are fitting with existing or experimentally provoked observations. They established the following assumptions:

- **Observability:** the object of scientific modelling X_i is observable through observations x_i and it is assumed that observing those x_i do not provoke the existence of X_i ;
- **Consistency & completeness:** scientific models can be express through a consistency function (ie. defining the quality of the scientific reasoning such as no contradiction, no redundancy, etc.) and a completeness function (ie. quality of the relationship between the model's predictions and observations x_i).
- **Anomaly existence:** the model aims to reduce two types of knowledge anomalies: (1) a lack in the consistency function or (2) an apparition of new observations Y (directly observable or provoked) that are not predicted by the model.
- **Not yet observable unknown object existence:** facing anomalies, scientist make the hypothesis that there may be an unknown object X' observable but not yet observed. The aim of the scientific process is either to elaborate $K(X')$ that would provide a definition of X' and validate its expected properties or to get more observations x' to confirm the existence of X' .

By drawing on this model, we can formulate the following assumptions regarding the design of a scientific discovery:

- **Assumption 2.1 - knowledge acquisition:** a designer has to acquire a significant knowledge base regarding existing scientific models relevant in its discovery field. Indeed, the designer has to be capable of (1) identifying an anomaly regarding previous scientific models and (2) elaborating new models or improving consistency and completeness functions of previous models.
- **Assumption 2.2 - expansive partition:** a designer has to provoke an expansive partition regarding its C-space according to two strategies to make a discovery:
 - Assumption 2.2.a: a designer could improve consistency and completeness functions of previous scientific models and provoke new expansive partitions regarding those models;
 - Assumption 2.2.b: a designer could propose new scientific models which would be expressed through new expansive partitions.

3. Science & industry fixations: definition, origins and mitigation strategies

3.1. Objects of science and industry fixations and main influential factors:

Scientific discoveries and inventions designers are suffering from a couple of fixations effects. We first define what elements of the design process are suffering from those effects. Second we define what would be the main factors that sustain those fixations. By drawing on the definition of scientific modelling and invention below, the object of fixations are the following:

Table 1. Science & invention elements of reasoning that could be the object for fixations

Science	Invention
<ul style="list-style-type: none"> • Object of scientific modelling (ie. studied dimension of an object); • Scientific hypotheses (ie. consistency and completeness functions); • Methodologies and scientific equipment & tools (ie. observations methods); • Anomaly detection and interpretation (ie. observations and comparison with previous scientific models); • Results and findings (ie. designed concepts). 	<ul style="list-style-type: none"> • Technological paradigm (mastered technologies and technology combinations) to produce action and effects); • Relevant scientific models of those technological paradigm (associated knowledge); • Artefact type that is produced by the industry and its competitors (and associated production process).

We then propose a taxonomy of factors that increase fixation effects through the adoption of fixed reasoning. Those factors can conduct scientific model and invention designers to stay in less creative design paths. Organisations can try to work on those factors to favour defixation processes.

Table 2. Factors that strengthen designers' fixation effects

	Science	Industry
Economic factors	Economic incentives that researchers received to stay in non-creative design path to maximise their probability to publish high-ranked scientific journal articles (eg. rewards based on scientific journal ranking).	Economic incentives that inventors received regarding working on artefacts in core technological paradigm of the company (eg. reward based on the acceptance of the company to finance a patent filling procedure - which is not likely to be the case if the invention is not part of the strategic plan of the company).
Social factors	Social incentives to stay in fixed design path regarding peer recognition and acceptance in laboratories, particular scientific discipline or groups.	Social incentives to stay in fixed design path regarding peer recognition and acceptance in other invention designer social

		groups in the industry or in the organisation.
Organisational factors	Orientation given by science programmes, funding, grants and strategic priorities regarding fixed design paths.	Orientation and funding given by R&D department or strategic priorities given by management (following for example previous company investments).
Individual	Use of cognitive routines calling for existing solution with stable paradigms in designer process.	

3.2. Mitigation of fixation effects through science-industry interactions:

As shown in Agogu e and Le Masson (2014) works, examples outside the fixed design path help designers to propose more creative solutions. In science-industry partnerships, invention and scientific model designers would be able to exchange defixated inputs. Following the linear model logic, it is well documented how a scientist could bring defixated inputs to invention designer through new fundamental discoveries that lead new inventions (eg. the Manhattan project has been extensively used as a core example¹³⁴). As a more recent case, graphene synthetisation discovery in 2004 by A. Greim is illustrative (Nobel Prize 2010). Indeed, following his fundamental discovery of new carbon forms as a new material, a couple of industries are reviewing potential applications such as new transistor generation. Nevertheless, the phenomenon is less documented regarding what defixed examples industrial can bring to scientific model designer. We propose the following list of inputs and associated probabilities ("prob.") regarding historical examples.

Table 3. Defixating inputs of invention's designer to scientific discovery's designer

Fixation issue	Prob.	Details	Example
Object of scientific modelling	Medium	New industrial stakes for companies that lead to study other dimensions of an existing object; New object created by industry.	Bipolar-contact transistor invented in Bell labs by Shockley, Bardeen and Brattain that conduct to new scientific discoveries regarding its effects.

¹³⁴ On this topic, see Lenfle (2011) for further discussions

Methodologies and scientific equipment & tools	Medium	- New scientific tools created by the industry to detect new observations.	The quantum computing developed by major IT companies and its effects on calculation possibilities for physics analyses.
Anomaly detection and interpretation	High	Industrial issues that require scientific advances to be solved.	Pasteur and the invention of the microbiology following its intervention with North of France brewers (cf. also case study on CRISPR in section 4.3)
Results and findings	Low	New results due to large scale testing centres of the industry or real condition testing.	Higgs' Boson and new scientific knowledge due to the testing of its theory in LHC.

4. Dynamic analysis of science-industry interactions: fixations traps & cross-defixation processes

In order to define science-industry implications on the exploration of more creative design paths we are drawing on the "matching-building" model developed by Gillier et al. (2012). The latter is useful to demonstrate effects of partnerships on knowledge and concept bases of each actor. We then call "Agent A" the designer of the new invention and "Agent B" the designer of the new scientific model. We assume that at the beginning of the partnership, both actors are fixed in their own specific design path.

4.1. Matching phase:

In the matching phase, actors involved in the partnership investigate together their own C-K frame to identify intersections. If actors are sharing similar concepts or knowledge need, they can engage common exploration or knowledge transfer in order to provoke partitions and new conjunctions.

Regarding new inventions and scientific models designers, if there is a match between their concepts or knowledge need (1) at least one expansive partition has already been carried out by agent A and/or agent B and (2) those expansive partitions occurred in the fixed path. Two particular cases can be highlighted. The first is referring to the "Mode 2 knowledge production" (Gibbons *et al.*, 1994): agent B is able to provide to agent A the required knowledge to help the latter to provoke a conjunction in its C-K frame which constitute a new invention. It is describing the classical model of research commercialisation. For example an industrial asks a research team to solve a particular problem taking in account all its industrial constraints such as past investments, consumer needs, etc. The second is referring to "reverse mode 2": agent A

is able to provide to agent B the required knowledge to help the latter to provoke a conjunction in its C-K frame. It is referring to a situation in which for example the industrial partner is able to bring an invention to help to scientific model validation (Narayanamurti, Odumosu et Vinsel, 2013). It has to be noted that the actor that is transferring knowledge also learns from the process and then can be able to provoke new partitions in its C-space: new inventions and scientific models then appear in a sequential model.

Regarding fixation effects in those cases, it has to be noted that the initial partition is associated to the fixed design path, as well as the conjunction following the partnership. Nevertheless the party that provide the knowledge and learn from the exchange process could be able to access to defixating inputs from the other partner (see section 3.2). The probability remains low because those cases mainly describe one-way transfer. Indeed, the partner that initially ask for knowledge transfer does not need to extensively share its own knowledge except for very detailed specifications limited to the adaptation of what is being transferred. Worse, it can give fixed examples that will strengthen fixation effects. If new inventions and new scientific models occurs, (1) it is highly probable that both outputs are linked to fixed design path and (2) occur in a sequential modes. We then call those situations "fixation traps".

4.2. Building phase:

The building phase occurs when actors do not find relevant intersection between their different C-K frames. It means that (1) they do not have many interaction between their knowledge base and (2) they are committed to define both new inventions and new scientific models: actors need to "build" a shared and relevant concept between them. In that phase, partners are collecting in a first time information about each other which is "*an opportunity for partners not only to expand their concept and knowledge spaces but, more interestingly, to revisit them*" (Gillier, Kazakçı et Piat, 2012, p. 386). In a second time, interactions between both actors will conduct them to "*imagine a more abstract concept that could interest all of them*"(Gillier, Kazakçı et Piat, 2012, p. 386) that can lead to highly expansive partitions. For agent A and B we interpret this bi-directional exchange of knowledge as a factor that increase the probability of sharing a defixated input such as new dimensions of an object for scientific modelling. The engagement of agent B to favour agent A's new inventions also helps to recognize anomalies regarding previous scientific model following phenomenon reported by agent A. Second, the fact that both actors have to imagine a more abstract concept in particular

help agent A to being defixed regarding traditional industry constraints and be more open to more creative design path.

We have to notice that under a set of conditions that drive this building phase, agents A & B are able to engage in what we call a "**cross-defixation process**": **both partners are able to share an abstract concept and to then acquire and exchange new knowledge to favour conjunctions in non-fixed design path.** The particularity of this cross-defixation process is that it conducts both actors to generate creative output but in a conjoint mode. We propose a synthesis vision of the required conditions:

- **Condition 1:** Agents A & B do not share pre-existing concepts (or at least are not entailed to work on them) - this condition is referring to the building stage;
- **Condition 2:** Agents A & B have a significant knowledge base relevant to their field of activities that support their capacity to provoke partitions - this condition is referring to the capacity to bring novelty and new scientific models;
- **Condition 3:** There is limited intersection between agents A & B knowledge base - this is a condition referring to building stage (if not we assume that they would be able to match some concepts);
- **Condition 4:** Agents A & B are ready to both (1) reassess their own knowledge bases and (2) favour bi-direction knowledge exchange in order to find a shared area of interest - this condition is referring to the capacity of both actors to overcome fixation effects.
- **Condition 5:** Agents A & B are highly committed to both obtain a very practical answer to the invention designer and a model with high consistency and completeness standard for the scientific discovery designer - this condition is referring to overcome anomaly detection and interpretation fixation effects.

4.3. Case study: CRISPR & Danisco company - a case of cross-defixation:

In this section we illustrated our results through a brief recent case study on CRISPR-Cas9, a fundamental discovery in genome editing¹³⁵. Based on cross-checked sources regarding CRISPR¹³⁶, we are focusing here on the contribution of an agri-food industrial company called Danisco.

¹³⁵ The scientific discovery is mainly attributed to J. Doudna and E. Charpentier for their article in Science (Jinek et al., 2012)

¹³⁶ Main references includes: Lander works on scholars that made CRISPR (2015) ; Report for the French Senate from Le Deaut and Procaccia (2017) and Le Monde special focus on CRISPR (2016)

In its business unit of Dangé-Saint-Romain (France), Danisco was producing bacterial starter cultures for cheeses and yogurts production. In 2004-2005, the company launched an R&D project focusing on a particular lactic-acid bacteria (*Streptococcus thermophilus*). The latter was intensively used in the production process but were sometime attacked by viruses (ie. bacterial phage) with high financial implications for the company. More surprising, when attacked by phage, Danisco showed that some bacteria were able to protect themselves against the viruses while some other died. The R&D project's goals were then (1) to better understand this phenomena and (2) to propose new industrial processes to favour bacteria survival. To perform this project, the company appointed P. Horvath as team leader, an experienced scientist specialized in microbiology and acid lactic DNA.

We reinterpreted this case by using the framework described in the upper section. Agent A is represented by Danisco who aim to design a new industrial process to favour bacteria preservation. Agent B is represented by the research team who aim to design a new scientific discovery regarding this phenomena. Both designers have acquired a significant knowledge base in their respective domains. Indeed, for Agent A, bacterial starter culture is the core industrial process (the company at Dangé-Saint-Romain was established in 1964 already on this market). For Agent B, P. Horvath got his Ph.D. from Strasbourg University where he was focusing on genetics of lactic-acid bacteria for food production (Condition 2). Nevertheless, their knowledge base remain distinct for the project as P. Horvath was appointed for its expertise on acid lactic DNA following the acquisition by Danisco of a DNA sequencer (Condition 3).

Regarding the matching - building model, agent A and B do not share pre-existing concepts regarding this topic as they were not able to transfer available piece of knowledge to directly solve the issue (Condition 1). P. Horvath's team was able to reinterpret the industrial issue as a scientific anomaly: how some micro-organisms, such as a bacteria, could be able to protect themselves from virus phage while their pairs do not? Indeed, according to available scientific models at that time, bacteria strains cannot protect themselves without having similar responses to phage. Due to this anomaly, both designers were able to reassess their knowledge to overcome their fixation effects. Facing the anomaly P. Horvath's team were able to identify Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats (CRISPR) when genotyping cell strains, a concept that he heard about in a scientific conference a few years ago. Having access to 10,000 acid lactic bacteria strains used in the company and Danisco expertise in that domain (Condition 4), they were able to demonstrate a correlation between presence of CRISPR in the genotypes of cell strains and resistance to phage (ie. it broadly act as a 'vaccine' but at a micro-

organism level). They were the first research team to demonstrate this correlation by using empirical analyses. Furthermore, due to their commitment to provide both scientific and industrial response to this issue (Condition 5), the research team developed an industrial process to add phage DNA to acid-lactic bacteria in order to favour their resistance to viruses. They patented their invention (final application in 2006 at the USPTO) and the associated scientific article was published in Science in 2007. This project led to a cross-defixation process for both invention and scientific model and all the five conditions of our framework were valid.

5. Implication and further research:

Our main objective was to understand under which conditions new invention and scientific model designers were able to partner in order to produce better creative and original outputs. We drew on C-K theory and focused on fixation effects in order to interpret in which situations designers are able to provide outputs whether on a fixed design path or in an original path. We showed how design theories modelled both patentable inventions and scientific models that offered us a coherent and unified framework to deal with those issues. Our contributions are the following. (1) We proposed a first set of elements that can be suffering from fixation effects in both invention and scientific models designers reasoning and briefly explained what the main contributing factors are. (2) As examples in the defixed design path can help designers to propose new inventive solutions we propose a series of defixed inputs that could be shared between invention and scientific designers to help them to overcome their own fixation effects. We also provided a couple of historical examples. (3) We then used the matching - building model to define the effect of invention and scientific model designers' partnerships on fixations. We showed that if partners are engaged in one-way knowledge transfer, those partnerships can conduct to "fixation traps": inventions and scientific models are sequential and linked to the fixed design path. (4) We defined a set of restrictive conditions that could conduct to a "cross-defixation process": both actors would be then able to create conjoint new invention and scientific model in the defixed design path.

Our findings seem consistent with current debates regarding science organisation. Indeed, "cross-defixation" processes advocate for strengthening partnerships between science and industry. A particular issue is that the parties do not necessary need to be "defixed" before starting the partnership: by setting particular conditions regarding the partnership design, both initially fixed designers might be able to provide original and creative outputs. The success conditions also led to highlight the importance of designer educations to detect what would be

those defixated inputs and how to share them in the most efficient way. Furthermore, there is a need to conduct further analysis regarding those conditions and how it match with firms strategies (in particular regarding intellectual property stakes and strategies regarding the exchange of those defixated inputs). Further analysis have also to be carried out regarding associated management practices. Nevertheless, we shed light on a particular situation that conduct to "fixation traps": in those, as it is mainly a one-way exchange of knowledge, the probability that designers shared defixing example is low, and it can even strengthen fixation effects. We acknowledge that knowledge transfer between science and industry is key for national innovation system. But first, partners have to be aware of what they have to attempt from those partnerships in terms of creative outputs and those have to be aligned with management practices. Second, it would be easier for an organisation to define fixation effect mitigation procedures outside those kind of partnership in order to produce creative outputs.

We think that focusing on fixation effects on science and industry collaborations could help scholars and practitioners to foster specific collaborations or framework success conditions (eg. collaborative PhD as the "CIFRE" scheme in France). In particular, further qualitative and quantitative research are necessary to confirm the model's insights.

TABLE DES FIGURES DE LA PARTIE 1

FIGURE 1 - PLAN DE LA THESE	32
FIGURE 2 - LES OUTILS DE LA VALORISATION ET DU TRANSFERT EN FRANCE (SOURCE : COUR DES COMPTES, 2018)	54
FIGURE 3 - ÉVOLUTION DES DEPOTS DE BREVET, INTENSITE DE R&D ET PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PAR LES INDUSTRIELS	63
FIGURE 4 - PERFORMANCES ARPA-E (SEPT. 2020)	77
FIGURE 5 - SYNTHESE DES RESULTATS RAPPORT S. BERGER ET AL. (2016, P. 2-3)	79
FIGURE 6 - APPROCHE DE LA LITTERATURE	88
FIGURE 7 - STRATEGIE D'ANALYSE DE LA LITTERATURE	89
FIGURE 8 - "RESEARCH PUSH" ET "MARKET PULL" (ADAPTE DE TROTT, 2011)	91
FIGURE 9 - ÉVOLUTION DE L'INVENTION COMBINATOIRE (SOURCE : STRUMSKY ET LOBO, 2015)	96
FIGURE 10 - ÉVOLUTION DE LA PART DES BREVETS AMERICAINS BASES SUR DES RECHERCHES SPONSORISEES PAR LE GOUVERNEMENT US (SOURCE FLEMING ET AL., 2019)	98
FIGURE 11 - ECART ENTRE DATE DE PUBLICATION SNPL ET DATE DE DEPOT DU BREVET (SOURCE ARORA ET AL., 2018).....	102
FIGURE 12 - PASTEUR QUADRANT (SOURCE : STROKES).....	111
FIGURE 13 - PANORAMA DE LA LITTERATURE SUR L'ENGAGEMENT ACADEMIQUE (SOURCE : PERKMAN & AL., 2021)	116
FIGURE 14 - CYCLE DE DECOUVERTE - INVENTION (SOURCE NARAYANAMURTI ET ODUMOSU, 2016, P. 54).....	126
FIGURE 15 - DEMARCHE DE RECHERCHE.....	141
FIGURE 16 - SYNTHESE DE L'ITINERAIRE DE RECHERCHE	147
FIGURE 17 - PRINCIPAUX INDICATEURS DE PERFORMANCE INPI (SOURCE INPI, 2020)	148
FIGURE 18 - ORGANIGRAMME DIRECTION INPI (28/01/2021).....	149
FIGURE 19 - MODELE DE TEST HYPOTHETICO-DEDUCTIF (SOURCE : ANDERSON, P. 28).....	153
FIGURE 20 - TESTAMENT D'ALFRED NOBEL.....	161
FIGURE 21 - PROCESSUS DE CHOIX DU PRIX NOBEL (EXTRAIT DE NOBELPRIZE.ORG LE 15/10/2020)	162
FIGURE 22 - AFFILIATIONS PAPIER NOBEL DE ALBERT FERT	163
FIGURE 23 - METHODOLOGIE D'ANALYSE DES LAUREATS DU NOBEL.....	164
FIGURE 24 - RELATION ENTRE LES PARTIES PRENANTES DANS LE DISPOSITIF CIFRE (SOURCE : ANRT, 2020) ...	166
FIGURE 25 - EXEMPLE DE CONTRAT DE COLLABORATION	168
FIGURE 26 - PROCEDURE DE CODAGE DES CONTRATS DE COLLABORATION	169
FIGURE 27 - ACTIVITE TOTAL (SOURCE : RAPPORT ANNUEL 2019, TOTAL, P. 13)	173
FIGURE 28 - REPRESENTATION DE L'EXPERTISE CHEZ TOTAL EN 1995	176
FIGURE 29 - SOUS-MARIN AUTONOME TOTAL (SOURCE : TOTAL EXPLORATION - PRODUCTION).....	177
FIGURE 30 - BREVET SOUS-MARIN AUTONOME TOTAL.....	177
FIGURE 31 - EXTRAIT DU PREMIER ARTICLE SUR LES CORONAVIRUS (1968)	180
FIGURE 32 - BASES DE DONNEES AGREGES DANS LENS (SOURCE : LENS.ORG)	183
FIGURE 33 - FICHE TYPE D'UN ARTICLE SCIENTIFIQUE SUR LENS.ORG.....	184

FIGURE 34 - CAPTURE D'ÉCRAN D'UNE RECHERCHE BREVET SUR DERWENT	185
FIGURE 35 - DIAGRAMME DE FONCTIONNEMENT PATSTAT	187
FIGURE 36 - REPRESENTATION DE LA THEORIE C-K (SOURCE : CABANES, 2017).....	207
FIGURE 37 - MODELE C-K INVENT (SOURCE: KOKSHAGINA ET AL., 2014, P. 405).....	209
FIGURE 38 - ESPACES C-K SCIENTIFIQUE ET INDUSTRIEL. SITUATION INITIALE	216
FIGURE 39 - MODELE M-1. EXEMPLE	219
FIGURE 40 - MODELE M-2 : EXEMPLE	222
FIGURE 41 - DEMARRAGE DE LA PHASE DE BUILDING	224
FIGURE 42 - MODELE B-1-2 / CAS 1. EXEMPLE.....	227
FIGURE 43 - COUPLAGE A DOUBLE IMPACT SIMULTANE.....	230
FIGURE 44 - CHAUSSURE X-TALON G 235	232
FIGURE 45 - SHOWROOM CEA GRENOBLE (SOURCE COUR DES COMPTES, 2018, P. 33).....	236
FIGURE 46 - EN TETE DE L'ARTICLE BARRANGOU & AL. (2007) DANS SCIENCE	244
FIGURE 47 - EXEMPLE DE PRODUIT DANISCO.....	247
FIGURE 48 - BREVET DANISCO 2005.....	248
FIGURE 49 - ESPACES C-K CAS DANISCO-DUPONT (T=0).....	253
FIGURE 50 - ESPACES C-K CAS DANISCO-DUPONT (T=1).....	257
FIGURE 51 - ESPACES C-K CAS DANISCO-DUPONT (PHASE BUILDING).....	259
FIGURE 52 - REPRESENTATION ET CLASSIFICATION DES SPACERS SUR UN SEQUENÇAGE (SOURCE: PRESENTATION V3).....	261
FIGURE 53 - BREVET SUR LE MARQUE GENETIQUE NATUREL 2006.....	265
FIGURE 54 - ÉVOLUTION DE LA PART DES PRIX NOBEL INSPIRES PAR L'INDUSTRIE PAR DECENNIE D'OBTENTION DU PRIX ET DISCIPLINE	288
FIGURE 55 - SYNTHESE DES PERFORMANCES DES COUPLAGES DANS LA RECHERCHE "APPLIQUEE".....	289
FIGURE 56 - TAXONOMIE DES REGIMES DE DYNAMIQUE DE L'EXPERTISE	297
FIGURE 57 - REGIMES DE DYNAMIQUE D'EXPERTISES ET COUPLAGE A DOUBLE IMPACT SIMULTANE.....	298
FIGURE 58 - ROLE DES COLLABORATIONS ET DE L'EXPERTISE DANS LES PROJETS DE VACCIN COVID-19	299

TABLE DES TABLEAUX DE LA PARTIE 1

TABLEAU 1 - ESSAIS DE LA THESE	11
TABLEAU 2 - PERFORMANCES DES SATT EN 2018 (SOURCE : COUR DES COMPTES).....	56
TABLEAU 3 - FONCTIONNEMENT DES IRT (SOURCE : COUR DES COMPTES).....	66
TABLEAU 4 - OBJECTIFS DE LA RECHERCHE PARTENARIALE (SOURCE FUTURIS).....	70
TABLEAU 5 - SYNTHESE DES APPORTS DE LA LITTERATURE	131
TABLEAU 6 - POSITIONNEMENT METHODOLOGIQUE EN SCIENCE DE GESTION (SOURCE : DAVID, 2000, P.14)	151
TABLEAU 7 - PRESENTATIONS PRATICIENS	154
TABLEAU 8 - PRESENTATIONS SCIENTIFIQUES.....	155
TABLEAU 9 - SYNTHESE DES METHODOLOGIES DE RECHERCHE ET MATERIAU EMPIRIQUE	156
TABLEAU 10 - DONNEES CAS DUPONT / DANISCO	159
TABLEAU 11 - EXEMPLES DE PROJETS DE THESE CIFRE CLASSIFIES.....	170
TABLEAU 12 - CALCUL DE SCORE ADOI POUR LE BREVET SOUS-MARIN AUTONOME.....	177
TABLEAU 13 – IDENTIFICATION DU REGIME D’EXPERTISE POUR LE BREVET SOUS-MARIN AUTONOME.....	178
TABLEAU 14 - PRINCIPALES INFORMATIONS BIBLIOMETRIQUES DES PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	183
TABLEAU 15 - PRINCIPALES DONNEES BIBLIOMETRIQUES DES BREVETS	188
TABLEAU 16 - SYNOPSIS DES RESULTATS DE LA THESE.....	197
TABLEAU 17 - OBJECTIFS DE MODELISATION	204
TABLEAU 18 - FIXATIONS SCIENTIFIQUES ET INDUSTRIELLES	214
TABLEAU 19 - SYNTHESE DES TYPES DE COUPLAGES	270
TABLEAU 20 - SYNTHESE DE L'ARTICLE N°1.....	283
TABLEAU 21 - SYNTHESE DE L'ARTICLE N°2.....	285
TABLEAU 22 - SYNTHESE DE L'ARTICLE N°3.....	293
TABLEAU 23 - SYNTHESE DE L'ARTICLE N°4.....	295
TABLEAU 24 - EVENEMENTS EN LIEN AVEC LA VALORISATION MENES AVEC L’INPI	493
TABLEAU 25 - COMITES DE PILOTAGE DE LA THESE AVEC L’INPI	493
TABLEAU 26 - PRESENTATIONS PRATICIENS	494
TABLEAU 27 - REUNIONS DE TRAVAIL AVEC LES EQUIPES DE L’ANRT	494
TABLEAU 28 - PRESENTATIONS PRATICIENS	494
TABLEAU 29 - ENTRETIENS REALISES AVEC TOTAL	495
TABLEAU 30 - REUNION DE TRAVAIL AVEC TOTAL R&D GROUPE	495
TABLEAU 31 – EFFORT DE VALORISATION	495

TABLE DES ENCADRES DE LA PARTIE 1

ENCADRE 1 - LE MODELE LINEAIRE CHEZ V. BUSH (1945).....	57
ENCADRE 2 - LES INSTITUTS CARNOT	67
ENCADRE 3 - LE CAS DE LA SCIENCE DANS L'INDUSTRIE DU TABAC	73
ENCADRE 4 - HENRI LE CHATELIER ET L'ORGANISATION DE LA SCIENCE.....	105
ENCADRE 5 – LES CYCLES INVENTIONS – DECOUVERTES DE NARAYANAMURTI ET ODUMOSU (2016).....	125
ENCADRE 6 – ROLES ET MISSIONS DE L'INPI	148
ENCADRE 7 – POSITIONNEMENT DU CHERCHEUR AU SEIN DE L'INPI	149
ENCADRE 8 – DUPONT-DANISCO.....	160
ENCADRE 9 – LE PRIX NOBEL.....	161
ENCADRE 10 – L'ANRT	165
ENCADRE 11 - LE DISPOSITIF CIFRE	166
ENCADRE 12 – L'ENTREPRISE TOTAL	172
ENCADRE 13 – CAS DU SOUS-MARIN AUTONOME DE TOTAL	177
ENCADRE 14 – BREVE HISTOIRE DES CORONAVIRUS	180
ENCADRE 15 - HISTOIRE DU SCIENCE CITATION INDEX	182
ENCADRE 16 - CLASSIFICATION TECHNOLOGIQUE DES BREVETS	188
ENCADRE 17 – LA THEORIE C-K.....	206
ENCADRE 18 – LES FIXATIONS EN CONCEPTION	208
ENCADRE 19 – LE MODELE ACTION – EFFET - CONNAISSANCE.....	208

RÉSUMÉ

Les grands défis sociétaux contemporains nécessitent la création conjointe de nouveaux savoirs scientifiques et d'innovations techniques. Pourtant, les relations entretenues entre activités de recherche scientifique et activités de développement de produits, procédés ou services semblent s'apparenter à une double contrainte : l'impact scientifique s'opérerait au détriment de l'impact technique, et inversement.

Pourtant, l'étude de cas historiques ou modernes permet de faire l'hypothèse d'un modèle de couplage science – industrie dit de double impact simultané. En menant une démarche exploratoire à partir des théories de la conception, de la littérature sur l'engagement académique et l'innovation combinatoire, cette thèse propose un modèle formel des conditions d'existence et des performances des relations science – industrie. Une démonstration empirique du double impact simultané est proposée à partir d'un cas d'étude dans l'industrie agroalimentaire. Le modèle formel apporte un cadre conceptuel aux quatre essais qui composent ce travail.

Les deux premiers essais permettent de démontrer la dynamique historique et les performances du modèle de double impact simultané dans les sciences dites « fondamentales » (étude longitudinale des lauréats du Prix Nobel) et « appliquées » (étude des thèses CIFRE), comparativement aux cas traditionnels. Un troisième essai discute des conditions institutionnelles du modèle dans le cas de la R&D industrielle en étudiant la dynamique de l'invention dans le secteur du pétrole et du gaz. Enfin, un quatrième essai propose une réflexion sur la résilience du modèle de double impact simultané aux crises, à partir d'une analyse des effets des crises sanitaires liées aux coronavirus.

MOTS CLÉS

Science, Industrie, Innovation, Recherche, Collaboration

ABSTRACT

Contemporary grand challenges require the conjoint development of new scientific discoveries and technical innovations. Nevertheless, the relations between (1) scientific research activities and (2) product, process, or service development activities mainly look like a double hurdle. In many projects, scientific impact would seem to be made at the expense of technological impact, and vice-versa.

Nevertheless, by studying historical or recent cases, this research suggests the hypothesis of a "simultaneous double impact" model between science and industry. Through an exploratory analysis based on design theories, the academic engagement and the combinatorial innovation literatures, the thesis provides a formal model of such a relation by specifying their conditions of existence and expected performances. The research brings an empirical demonstration of the simultaneous double impact model through a case study in the agrifood industry. Finally, the formal model constitutes a framework for the four essays of the thesis.

The first two essays aim at demonstrating the historical dynamic and performances of the simultaneous double impact model. The first analyzes "fundamental sciences" through a longitudinal analysis of Nobel laureates. The second explores "applied sciences" by demonstrating the model performances in university-industry collaborative Ph.D. The third essay discusses the model institutional conditions in corporate sciences by reviewing the inventive dynamic in the oil & gas industry. Finally, the fourth essay reflects on the model resilience during significant crisis by studying the effects of coronavirus crisis in the long run.

KEYWORDS

Science, Industry, Innovation, Research, Collaboration