



HAL
open science

Condition du passage à l'échelle d'une startup deeptech : gérer la conception du patrimoine de création

Louise Taupin

► To cite this version:

Louise Taupin. Condition du passage à l'échelle d'une startup deeptech : gérer la conception du patrimoine de création. Gestion et management. Université Paris sciences et lettres, 2023. Français. NNT : 2023UPSLM074 . tel-04589085

HAL Id: tel-04589085

<https://pastel.hal.science/tel-04589085v1>

Submitted on 27 May 2024

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 Mines Paris

**Condition du passage à l'échelle d'une
startup deeptech : gérer la conception
du patrimoine de création**

Soutenue par

Louise TAUPIN

Le 18 décembre 2023

École doctorale n° 543

**Sciences de la décision,
des organisations, de la
société et de l'échange
(SDOSE)**

Spécialité

Sciences de gestion

Composition du jury :

Rachel BOCQUET Professeur des universités, IAE, Université Savoie Mont Blanc	<i>Rapportrice</i>
Gilles GAREL Professeur du Cnam, Titulaire de la Chaire de gestion de l'innovation	<i>Rapporteur</i>
Cécile AYERBE Professeur des universités, Université Côte d'Azur	<i>Présidente</i>
Benjamin CABANES Enseignant-chercheur, Mines Paris – PSL	<i>Examineur</i>
Pascal LE MASSON Professeur, Mines Paris – PSL	<i>Directeur de thèse</i>
Blanche SEGRESTIN Professeur, Mines Paris – PSL	<i>Directrice de thèse</i>

Mines Paris – PSL et Bpifrance n'entendent donner aucune approbation aux opinions émises dans cette thèse. Ces opinions doivent être considérées comme propres à l'auteur.



Le pont à Labastide-du-Vert
Henri MARTIN (1860-1943)
Musée Henri-Martin, Cahors

Source : <https://musees-occitanie.fr/oeuvre/le-pont-a-labastide-du-vert/>

REMERCIEMENTS

L'écriture des remerciements est un temps de relecture, un temps d'arrêt afin de trier les souvenirs et s'attacher aux meilleurs pour les faire grandir. C'est une multitude de visages qui surgit et d'émotions qui s'entremêlent, témoignant des rencontres et des expériences vécues.

L'aventure du doctorat est d'abord une aventure collective : sans les conseils, les amitiés créées, les longs échanges (et pas seulement au ping-pong) avec mes collègues et amis doctorants du CGS, la réflexion serait restée bien pauvre et le parcours trop solitaire pour être tenable. Charlotte, Raphaëlle, Justine, Alix, Caroline, Nafissa, Jérémy, Antoine, Thomas, John, Rafael, Maxime, Chipten, Agathe, Antoine, Nicolas, soyez vivement remerciés du temps que nous avons partagé. C'est plus largement toute l'équipe de recherche du CGS qui assure les conditions pour un travail fertile, sur les plans théoriques et pratiques : merci Benoît, Kevin, Sophie, Cédric, Marie-Michelle et tout spécialement Céline et Stéphanie pour vos encouragements en toutes circonstances et votre soutien sans faille, à base de mots doux et de petites douceurs sucrées (sans oublier tous les appels pour les buffets à volonté). Enfin, je n'oublie pas les deux années comme représentante des doctorants au conseil d'administration de Mines Paris, aux côtés de Clément, avec qui nous avons pu mesurer la richesse et la nécessité de faire équipe.

Ces années de thèse se sont aussi déroulées au sein du collectif de la Direction DeepTech de Bpifrance, que j'ai toujours plaisir à retrouver, grâce à l'enthousiasme et le dynamisme qui y règnent. Merci Pascale pour ta confiance au lancement de cette thèse, pour ta participation à l'évaluation de ce travail et pour nos discussions, passionnées et passionnantes, sur le monde et sa complexité, le rôle de l'État et celui de chacun à sa place. Merci Corinne de ta disponibilité et de ta bonne humeur. Merci aussi aux anciens collègues du pôle Études et Produits : Romain, Nicolas ; à ceux qui sont partis vers d'autres horizons : Lucile, Sonia, Célia ; et à ceux qui forment encore la force vive de la DeepTech : Albertine, David, Magali, Louise, Déborah, Antoine.

Les péripéties de la pandémie de la Covid-19 avec ses confinements successifs interrompus par des périodes « plus souples » de couvre-feu et de télétravail m'ont amenée à m'installer de façon durable dans la vallée du Lot, à Labastide-du-Vert, village maintes fois peint par Henri Martin comme le lecteur le découvre au début de ce manuscrit. Ce fut l'occasion d'intégrer un troisième collectif, celui du Faitoutnumérique de Luzech, composé d'une bande de joyeux coworkers, dont la diversité des parcours est si enrichissante. Merci Olivier, Aude, Claire et plus particulièrement Benoît de rendre ce lieu si vivant et accueillant.

Si ce travail de recherche a abouti, c'est surtout parce qu'il est le fruit d'innombrables interactions. En premier lieu, il n'aurait pas été possible de conduire des études aussi proches du terrain de recherche et motivantes sans les entrepreneurs des startups deepTech qui m'ont ouvert leurs portes. Merci Pierre pour ton accueil au sein d'Agricool puis d'Orius et également Ellyn pour les analyses conduites. Merci Bertrand, Fabien et Bruno pour votre confiance et votre intérêt pour mes recherches ; j'ai pris beaucoup de plaisir à venir à Poietis. Merci Bruno et plus encore Nicolas, pour ta disponibilité et nos nombreuses heures d'échanges passionnants en tous points, sur SUBLIME Énergie et bien au-delà, ainsi que d'avoir joué le jeu de l'expérience originale de l'explication de la construction d'un référentiel C-K en vidéo. Il ne s'agirait pas non plus d'oublier

tous les entrepreneurs qui m'ont accordé des entretiens au début de la recherche, et qui ont ainsi contribué à la formulation des premières hypothèses.

Il y a aussi ceux sans qui rien n'aurait pu voir le jour et qui m'ont encouragée alors que je terminais mon cursus à Supélec à faire le choix de la thèse même en passant « à l'ennemi » : Stéphane, Didier, Patrick et Romain. Je vous en suis très reconnaissante.

Merci à ceux qui ont plus directement apporté une pierre à ce travail de recherche. À Charles-Éric et Florian, mes deux *data scientists* préférés. Aux relecteurs pour leurs commentaires constructifs et bienveillants : Laure-Anne, à qui je dois aussi tout le travail préliminaire de cette recherche et l'accompagnement dans mes premiers pas comme doctorante, Kenza, Jean-François et notamment à ma grand-mère pour sa recherche minutieuse des fautes d'orthographe.

Je tiens tout particulièrement à remercier madame Rachel Bocquet et monsieur Gilles Garel, qui ont déjà contribué à l'amélioration de ce manuscrit à travers leurs retours très constructifs faits au cours de la pré-soutenance. Merci de l'intérêt que vous manifestez vis-à-vis de cette recherche en ayant accepté d'être rapporteurs. Merci également aux examinateurs d'avoir accepté d'évaluer cette thèse, madame Cécile Ayerbe et monsieur Benjamin Cabanes. Je remercie également ce dernier de m'avoir permis de communiquer sur mes travaux auprès de deux promotions du Mastère Spécialisé Entrepreneuriat Deeptech & Innovation.

Blanche, Pascal, merci de votre confiance au lancement de ces travaux, de votre accompagnement tout au long de cette réflexion menée à trois, de votre soutien jusqu'au bout, de votre bienveillance, de votre capacité à faire ressortir toute la richesse contenue dans les données récoltées, et plus encore de la véritable leçon de management par la pratique dont j'ai été témoin.

Merci à ma petite sœur Juliette pour sa complicité et son soutien, plus particulièrement lorsque j'entends, toujours en pleine nuit dans la maison isolée, des bruits non identifiés et qu'il s'agit d'en rire ! Merci à mes parents, sans qui le goût des études, des sciences et du travail n'aurait pas tant mûri.

Ce travail de relecture met enfin en lumière toutes les amitiés qui ont grandi au cours de ces années de doctorat, et qui ont été de véritables soutiens tout au long de cette période.

Il y a bien sûr mes amis de longue date : Auriane, Victoria, Paul, Éléonore, Estelle, Arthur, avec qui j'ai la chance de cultiver des amitiés qui font grandir à travers toutes les étapes franchies. La route à partager ensemble est encore longue : c'est tout ce que je nous souhaite !

Sans oublier ceux qui sont venus jusque dans le Lot pour découvrir les paysages, la gastronomie et le ciel étoilé de cette terre qui me plaît tant : Juliette et Alexandre, Émilien et Marthe, Camille et Marcus, Louise et Jean, Philippine et Aymeric, Peter, Fabien, Camille, Erwan, Jules, Ambroise, Foulques, Michaël, Wilfried, Philippe, Peter, Alejandro, Ferdinand. Vos visites à chacun ont été de vraies joies. Merci !

Pour finir, j'aimerais remercier ceux qui m'ont accueillie et qui m'ont donné envie de rester dans le Lot pour l'étape à venir. Merci Fabien et Christelle, grâce à vous mon taux de magnésium n'a jamais été aussi élevé ! Merci Blandine et Vincent pour les temps d'échanges et de goûters avec les enfants. Merci Gérard pour tes conseils avisés (vestimentaires compris) ainsi que tes paroles libres. Merci Mathias pour ton regard expérimenté sur les voies à emprunter (et pas seulement à vélo).

À vous tous, qui m'avez accompagnée, ce bout de chemin est aussi un peu le vôtre, merci.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACP	Analyse en composantes principales
ANSM	Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé
AP-HM	Assistance Publique - Hôpitaux de Marseille
ATEX	Atmosphère explosive
BFTE	Bourse French Tech Émergence
CES	Centre efficacité énergétique des systèmes (Mines Paris - PSL)
CGS	Centre de gestion scientifique (Mines Paris - PSL)
DARPA	<i>Defense Advanced Research Projects Agency</i>
DP	<i>Design parameter</i>
EPIC	Établissement public à caractère industriel et commercial
ETI	Entreprise de taille intermédiaire
FT120	French Tech 120
FR	<i>Functional requirement</i>
GMS	Grandes et moyennes surfaces
GNC	Gaz naturel comprimé
GNL	Gaz naturel liquéfié
GNV	Gaz naturel pour véhicules
IRT	Institut de recherche technologique
LAB	<i>Laser-assisted bioprinting</i>
LCTC	Laboratoire de culture et de thérapie cellulaire
MTI	Médicament de thérapie innovante
MVP	<i>Minimum Viable Product</i>
NGB-C	<i>Next Generation Bioprinting for Clinical</i>
NGB-R	<i>Next Generation Bioprinting for Research</i>
NTBF	<i>New Technology-Based Firm</i>
OTT	Organismes de transfert de technologie
PACTE	Plan d'action pour la croissance et la transformation des entreprises
PME	Petite ou moyenne entreprise
PoC	<i>Proof of Concept</i>
PUI	Pôle universitaire d'innovation
SATT	Société d'accélération du transfert de technologie
SPV	<i>Special Purpose Vehicle</i>
STEP	Station d'épuration pour le traitement des eaux
TIC	Technologies de l'information et de la communication
TRL	<i>Technology Readiness Level</i>
VC	Venture capitalist

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	6
LISTE DES ABRÉVIATIONS	8
SOMMAIRE.....	9

Introduction générale et motivations de la recherche 13

1. Motivations empiriques : l'action de la puissance publique pour soutenir le développement des startups deeptech.....	15
2. Éléments préliminaires de cadrage	18
3. Motivations scientifiques : comprendre la phase de scale-up à l'aune des enjeux de conception des startups deeptech.....	20
4. Itinéraire de recherche	23

Chapitre 1 – Soutenir le développement des startups deeptech : la mission de Bpifrance comme opérateur du plan Deeptech 27

1. Caractérisation des startups deeptech en vue de la compréhension de leurs mécanismes de passage à l'échelle	30
2. Les interrogations multiples partagées par les acteurs du développement des startups deeptech face à l'énigme de leur passage à l'échelle	51
3. Décrire et gérer les multiples efforts à fournir pour passer à l'échelle	69
4. Pertinence du choix des startups deeptech comme objet d'étude	73

Synthèse du chapitre 1 76

Chapitre 2 – De la reproduction d'un modèle d'affaires à la constitution d'un patrimoine de création : regards croisés des champs de recherche sur la conception en phase de scale-up 77

1. L'étape de croissance dans le cycle de vie des entreprises	80
2. Le monde du numérique aux origines de la notion de scale-up : quelle extrapolation au cas des startups technologiques ?	88
3. Le passage à l'échelle des startups vu par la littérature : les théories entrepreneuriales au service de l'adéquation entre le produit et le marché	94
4. Introduire un nouveau cadre d'analyse à partir de la notion de préservation	103
5. L'entrepreneuriat vu comme une science de la conception.....	107
6. Les enjeux de conception pour les startups technologiques.....	109

Synthèse du chapitre 2	114
Chapitre 3 – Positionnement épistémologique et éléments méthodologiques.....	115
1. Cheminement et construction du sujet de recherche	117
2. Une interaction assumée pour un apport théorique et managérial	123
3. Construire un terrain représentatif à partir d'un panel varié de startups deeptech à différents moments de la phase de scale-up	126
Synthèse du chapitre 3	130
Chapitre 4 – Décrire la phase de scale-up à partir du patrimoine de création.....	131
1. Confronter les théories entrepreneuriales sur le scale-up avec une approche par la conception	134
2. Une recherche-intervention pour mettre au jour le patrimoine de création d'une startup de l'agriculture urbaine.....	137
3. Présentation du cas d'étude : d'une solution d' <i>indoor farming</i> à destination des zones urbaines à la production de plantes à haute valeur ajoutée.....	142
4. Exprimer le patrimoine de création pour décrire les efforts de gestion propres au passage à l'échelle.....	147
5. L'intérêt du patrimoine de création pour la phase de scale-up	158
Synthèse du chapitre 4	162
Chapitre 5 – Gérer la constitution d'un patrimoine de création en phase de scale-up : le cas de la startup Poietis.....	163
1. Étudier la constitution du patrimoine de création à partir de l'émergence des plateformes	166
2. La construction d'une plateforme à partir d'une recherche-intervention dans une startup deeptech de la santé : éléments de méthode	173
3. Le cas de Poietis : une nouvelle technologie de bioimpression pour la médecine régénérative	180
4. Une stratégie élaborée de conception d'une plateforme par Poietis.....	196
5. Discussion : enjeux organisationnels et managériaux pour la constitution d'un patrimoine de création en phase de scale-up	215
Synthèse du chapitre 5	220

Chapitre 6 – Construire le rapport à l'écosystème dès la stratégie de prototypage.....	221
1. Le scale-up vu à travers la stratégie de prototypage pour construire le rapport à l'écosystème	224
2. Une recherche-intervention pour analyser le passage à l'échelle d'une solution de valorisation du biogaz à partir de la stratégie de prototypage	229
3. Une technologie de liquéfaction du biogaz au service du remplacement des énergies fossiles : la mission de SUBLIME Énergie	232
4. Évaluation et contrôle de la robustesse de la stratégie de prototypage pour l'élaboration du rapport à l'écosystème.....	240
 Synthèse du chapitre 6	259
 Conclusion générale.....	261
1. Synthèse des principaux résultats	263
2. Recommandations à l'égard des entrepreneurs dans les startups deeptech et de Bpifrance	266
3. Discussion et limites du travail de recherche.....	269
4. Perspectives ouvertes par la recherche.....	271
 Annexe – Codes des ACP présentées dans le chapitre 1	275
 BIBLIOGRAPHIE.....	283
LISTE DES FIGURES	299
LISTE DES TABLEAUX	302

Introduction générale et motivations de la recherche

Introduction générale et motivations de la recherche

1. Motivations empiriques : l'action de la puissance publique pour soutenir le développement des startups deeptech	15
1.1. Le difficile soutien aux phases avancées du développement des startups technologiques	15
1.2. Les trois volets du plan Deeptech opéré par Bpifrance : faire émerger des startups deeptech, assurer leur croissance, soutenir un écosystème	16
1.3. Réussir le déploiement à grande échelle des solutions technologiques pour atteindre la promesse de l'impact.....	17
2. Éléments préliminaires de cadrage.....	18
2.1. Définitions de startup.....	18
2.2. Une première acception du vocable de deeptech	19
3. Motivations scientifiques : comprendre la phase de scale-up à l'aune des enjeux de conception des startups deeptech	20
3.1. L'énigme du passage à l'échelle.....	20
3.2. L'originalité de la notion de patrimoine de création pour caractériser la phase de scale-up	21
4. Itinéraire de recherche	23
4.1. Formulation des questions de recherche.....	23
4.2. Éléments de méthode pour la réponse aux questions de recherche	23
4.3. Synopsis de la thèse	24

Face à l'ampleur des transformations nécessaires à la réponse aux défis sociaux et environnementaux contemporains, l'innovation technologique est une des solutions à apporter collectivement à grande échelle. En complément des lieux historiques des activités de développement des innovations que sont les grands groupes, de nouvelles entreprises voient le jour afin de déployer massivement des technologies de rupture pour contribuer à ces transformations. Parmi ces acteurs émergents, une nouvelle catégorie de startup se distingue par sa capacité à associer un fort potentiel de croissance et une promesse de l'impact : il s'agit des startups deeptech. En France, elles sont l'objet d'un important soutien de la puissance publique, qui voit aussi en elles une opportunité pour la réindustrialisation, compte-tenu des enjeux de déploiement à grande échelle dont elles se saisissent.

1. Motivations empiriques : l'action de la puissance publique pour soutenir le développement des startups deeptech

1.1. Le difficile soutien aux phases avancées du développement des startups technologiques

Le rapport intitulé *Financer la quatrième révolution industrielle – Lever le verrou du financement des entreprises technologiques* remis par Philippe Tibi à Bruno Le Maire et Cédric O en juillet 2019 (Tibi, 2019) fait certes état de la dynamique de l'écosystème entrepreneurial français mais il souligne plus particulièrement le manque de financements dédiés aux phases avancées du développement des startups (financements dits *late stage*). Ce dernier point est crucial dès lors que l'on cherche à assurer une croissance pérenne à ces jeunes entreprises innovantes. Les technologies de rupture qu'elles développent sont souvent assorties d'enjeux de souveraineté et d'impact, ce qui justifie d'autant plus l'intérêt du gouvernement pour ces questions.

Dans la mesure où les startups deeptech demandent de longs temps de développement et conduisent pour la plupart à la mise sur le marché d'un produit manufacturé, le vivier des technologies portées par les startups deeptech semble particulièrement adapté à la constitution d'entreprises au fort potentiel de croissance. Mais elles restent tributaires des financements *late stage*, d'autant plus qu'elles nécessitent souvent des infrastructures particulières. En tant que possible renouveau des startups scientifiques, les investissements dans les startups deeptech croissent en nombre et en valeur ; certains ont d'ailleurs mis en évidence la nécessité de nouveaux modèles d'investissement pour le développement des innovations (Parpaleix et al., 2018). De nombreuses difficultés et spécificités sont mises en exergue par les rapports de cabinets de conseil (Portincaso et al., 2021 ; Wavestone, 2017) ou de structures gouvernementales (Nedayvoda et al., 2021) : à la fois au niveau des besoins en financement, des risques des investissements, ou encore des temps de développement.

Au-delà des seules difficultés en termes de financements, on voit déjà d'autres obstacles au développement des startups deeptech. Leur potentiel d'impact justifie un intérêt accru de la puissance publique à leur égard.

1.2. Les trois volets du plan Deeptech opéré par Bpifrance : faire émerger des startups deeptech, assurer leur croissance, soutenir un écosystème

Conformément à la volonté de faire émerger les champions économiques de demain, le gouvernement a lancé en janvier 2019 le plan Deeptech à destination des jeunes entreprises développant des solutions technologiques en rupture et issues de la recherche, autrement appelées *startups deeptech*. Celles-ci se caractérisent par d'importants besoins d'investissement et ce, sur le temps long, mettant ainsi d'autant plus l'accent sur la problématique des investissements *late stage*.

C'est la banque publique d'investissement, Bpifrance, qui a la charge de l'opérationnalisation du plan. Créée par regroupement de plusieurs entités en 2012, Bpifrance est un établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC) détenu à 50 % par l'État et à 50 % par la Caisse des Dépôts et Consignations. En tant qu'opérateur de l'État, Bpifrance a pour mission d'accompagner et de soutenir les entreprises de toutes tailles et à toutes les étapes de leur développement, par la mise en place de divers dispositifs. Devenue un acteur incontournable du financement des entreprises, ce sont plus particulièrement les petites ou moyennes entreprises (PME) ainsi que les entreprises de taille intermédiaire (ETI) qui ont bénéficié en premier lieu d'un soutien public au financement, à des garanties et à l'investissement. Aujourd'hui, Bpifrance se positionne aussi en tant qu'investisseur et financeur des innovations de rupture. Leur émergence, dans tous les domaines, répond en effet aux nouveaux défis sociaux et environnementaux devenus mondiaux.

Pour répondre aux besoins spécifiques des startups deeptech et de l'écosystème qui se développe autour, le plan Deeptech prévoit plusieurs mesures : solutions de financement (prêts, garanties, aides à l'innovation, subventions, concours, etc.), d'investissements en fonds propres (directs ou en fonds de fonds) et d'accompagnement (diagnostics, animation de la communauté Les Deeptech, missions à l'international, etc.). Doté en janvier 2019 de 2,5 milliards d'euros sur 5 ans, le plan Deeptech a depuis été renforcé. Tout d'abord, dès 2020, Bpifrance y a adjoint 500 millions en fonds propres. Puis, dans le cadre de France 2030, le plan Startups et PME industrielles a fléchi 2,3 milliards d'euros vers les startups industrielles et deeptech pour accompagner la phase d'industrialisation de ces jeunes entreprises innovantes. Début 2023, le plan Deeptech a été renforcé de 500 millions d'euros sur la partie amont. En effet, le plan Deeptech se décline en trois objectifs principaux :

- Accroître l'émergence des startups deeptech, ce qui se traduit par un objectif de création de 500 startups deeptech par an à horizon 2023 ;
- Assurer la croissance de ces startups, avec un objectif de 10 licornes à horizon 2030 et de 100 sites industriels par an ;
- Développer et renforcer les acteurs de la filière, en particulier les organismes de transfert de technologie qui comptent les sociétés d'accélération du transfert de technologies (SATT) dont le rôle est de mutualiser les dispositifs pour faire émerger des projets entrepreneuriaux à partir des recherches conduites dans les laboratoires de recherche publics.

Pour les atteindre, les moyens déployés sont considérables et en augmentation depuis 2019. Le premier objectif est en bonne voie d'être atteint puisqu'en 2022, 320 startups deeptech ont vu le jour

(+27 % par rapport à 2021). Ce sont, au dernier trimestre 2023, plus de 2000 startups deeptech qui sont actives sur tout le territoire français (dont deux tiers hors d'Île-de-France).

L'étape suivante est celle du soutien à leur croissance, pour lequel Bpifrance cherche à mieux connaître le comportement des startups deeptech lorsqu'elles entrent dans des étapes avancées de leur développement. La définition d'indicateurs adaptés aux spécificités des startups deeptech et à leur passage à l'échelle est un des objectifs poursuivis par la banque publique. En outre, elle soulève la question de la pertinence des instruments habituellement déployés lorsqu'il s'agit de startups deeptech. C'est plus particulièrement à ce niveau que nos travaux de recherche ambitionnent d'apporter des connaissances et des méthodologies dans le but d'adapter les outils de financement et d'accompagnement de Bpifrance pour un soutien plus efficace au passage à l'échelle des startups deeptech. Par extension, ce sont les entrepreneurs et les structures d'accompagnement qui pourront s'en saisir à leur tour.

1.3. Réussir le déploiement à grande échelle des solutions technologiques pour atteindre la promesse de l'impact

Un bref détour par l'histoire des activités industrielles contribue à comprendre l'imaginaire collectif autour de la réussite entrepreneuriale. Prenons l'exemple de la General Electric. Cette incontestable puissance industrielle de nos jours est née à la fin du XIX^e siècle à partir de la fusion de deux entreprises concurrentes, positionnées sur le marché encore récent de l'électricité, qui était à l'époque une technologie de rupture caractérisée par son potentiel de croissance et la promesse de l'impact qu'elle portait. L'électrification de l'Amérique à partir des découvertes de Thomas Edison à la fin du XIX^e siècle, relatée par Hughes (1983), donne un éclairage quant à l'origine des mythes de la réussite entrepreneuriale et à leur réactualisation possible. On peut noter plusieurs caractéristiques communes entre le contexte de l'électrification et celui de l'émergence des startups deeptech.

Dans les deux cas, il s'agit de déployer massivement, à l'échelle mondiale à terme, une technologie de rupture issue d'un processus d'invention nécessitant des compétences techniques poussées. Hughes (1983) montre que dans le cas des inventions d'Edison, cela passe par la mise en place d'une stratégie de création d'une R&D, comme on le comprend lorsqu'il écrit : « Si Edison fut capable de créer un concept aussi audacieux et de se lancer dans l'invention d'un système entier, c'est parce qu'il put s'appuyer sur un laboratoire et une équipe. » (p.23). En outre, cette technologie porte en elle la promesse d'une réponse à un défi contemporain à son émergence ou plus généralement un progrès social, qui passe par une transformation significative de l'environnement dans lequel elle se déploie. Enfin, les travaux de Hughes (1983) mettent aussi en évidence comment le développement et le déploiement d'une innovation de rupture s'appuie non seulement sur la stratégie de R&D mais aussi sur la structuration d'un écosystème, à travers la figure de Samuel Insull, et le rôle des financiers dans l'expansion de la technologie, représentés par Sidney Z. Mitchell.

La vision de la réussite entrepreneuriale est façonnée par les mythes industriels nés à partir de la deuxième moitié du XIX^e siècle. Ces grands projets industriels ont ouvert la voie à un déploiement massif, voire mondial, de solutions technologiques en rupture avec leur époque, transformant durablement les sociétés et contribuant largement au progrès social. Les défis

contemporains auxquels notre civilisation se confronte appellent à des réponses de grande ampleur. À travers leur promesse de l'impact, les innovations technologiques portées par les startups deeptech peuvent en faire partie.

2. Éléments préliminaires de cadrage

Il convient dès à présent de préciser ce que nous entendons, au moins dans un premier temps, par startup deeptech. Si le terme de startup ne fait pas consensus, la définition de Bpifrance s'est progressivement imposée en France en ce qui concerne celui de deeptech.

2.1. Définitions de startup

Considérant l'absence de définition figée et définitive relative à la terminologie de startup, nous conviendrons pour l'ensemble de la thèse que le mot « startup » fait référence à des entreprises créées il y a moins de 10 ans avec pour ambition de proposer une innovation, c'est-à-dire un produit (qui peut être un service) composé d'un ensemble original de fonctionnalités et qui se distingue par son potentiel de croissance.

Cette précision sur le potentiel de croissance intrinsèque aux startups est particulièrement importante car elle permet de différencier les startups des entreprises qui deviendront des PME à long terme. De plus, la volonté de croissance transparaît dès les débuts de l'activité (ou à un moment charnière) et la poursuite de cet objectif peut s'illustrer à travers plusieurs indicateurs : chiffre d'affaires, ressources humaines, déménagements successifs pour des locaux plus grands, investissement dans des infrastructures, diversification des activités, levées de fonds, etc. Ce sont ces mêmes indicateurs qui permettront dès la section 1.3 de caractériser la phase de scale-up, qui, en tant que perspective dans la trajectoire de développement, est aussi un critère de définition d'une startup. Cela rejoint ainsi la définition donnée par Steve Blank, entrepreneur américain et enseignant en entrepreneuriat, sur son blog en 2010¹ : « *a startup is a temporary organization designed to search for a repeatable and scalable business model.* ».

Dans un rapport pour le centre de prospective FutuRIS, Nemessany (2012) développe : « La France, comme la plupart des pays industriels, soutient la création et le développement d'entreprises de technologies innovantes, appelées start-up ou, dans le vocabulaire du ministère de l'Économie et des Finances, « jeunes pousses ». L'important soutien de l'État français à la création d'entreprises innovantes se justifie par le rôle central que jouent les jeunes pousses non seulement dans l'innovation technologique mais aussi dans la création de valeur et, plus largement, dans la croissance économique. » (p.2) ; puis Nemessany (2012) explicite : « Ce terme [de start-up] désigne une jeune entreprise innovante et dynamique, à croissance rapide. Elle se rencontre en particulier dans les secteurs des technologies de pointe. » (p.2, note de bas de page).

Pour Picken (2017), il est aussi possible de considérer le terme startup comme l'une des phases de développement d'une entreprise, qui cherche à valider simultanément plusieurs

¹ Cf. <https://steveblank.com/2010/01/25/whats-a-startup-first-principles/>

hypothèses, en poursuivant une trajectoire de développement rapide (relativement à son activité), c'est-à-dire en intégrant les ressources nécessaires à sa croissance et en explorant des représentations diverses d'évolution. Picken (2017) précise : « *The entrepreneur's challenge in startup is to define and validate the business concept: the market opportunity (i.e., critical need, target market, market size, and timing); the offering (i.e., product or service and value proposition); the business model (i.e., resources, processes, and economic model); and the go-to-market strategy needed to deliver the offering reliably to the target customer at a profit. In startup, the focus is narrow, the commitment of time and resources is limited, and the economic risks are modest. The organization of a startup is typically informal, loosely structured, and fluid.* » Cet état temporaire de startup prend fin lorsque l'entreprise est organisée et réalise des lancements successifs de produits ou déploie très largement son produit phare et ses dérivés : elle fait preuve d'une capacité de conception qui ne peut être mise en doute.

En résumé, Passy (2021) cite l'historien des entreprises, Patrick Fridenson, pour lequel une entreprise qui se veut être une startup doit répondre aux trois conditions suivantes :

- Présenter une forte croissance potentielle,
- Faire usage d'une technologie nouvelle,
- Avoir besoin d'un financement massif, qui s'illustre à travers les levées de fonds.

Toutefois, les difficultés de gestion auxquelles une startup est confrontée ne semblent pas être saisies par ces différentes définitions.

2.2. Une première acception du vocable de deeptech

Il est possible de caractériser les types de startups selon la nature de leurs activités, leur modèle d'affaires, ou leurs secteurs d'application par exemple. La précision apportée par le vocable « *deeptech* », abrégé de l'expression « *deep technologies* » et démocratisé par la présidente directrice générale de la plateforme d'investissement Propel(x), Swati Chaturvedi (2015), met en évidence l'importante rupture technologique apportée par l'entreprise considérée. Cette notion a été avancée pour désigner des startups qui « proposent des produits ou des services sur la base d'innovation de rupture [...] avec l'ambition de s'attaquer aux grands défis du XXI^e siècle » selon le premier rapport publié par Bpifrance (2018) sur le sujet, reprenant le même objectif de réponse aux défis contemporains souligné initialement par Chaturvedi (2015). On peut déjà noter que dans le cas du développement d'une innovation technologique de rupture, les enjeux techniques rencontrés par la startup sont particulièrement importants et influent d'autant plus sur les ressources nécessaires pour son développement, voire sur les trajectoires de développement à élaborer.

Ainsi, en France, la banque publique d'investissement a défini dès 2018 un premier référentiel pour caractériser les startups deeptech, à partir de quatre critères (Bpifrance, 2018, p.43) :

- « Le terme deeptech qualifie des technologies ou combinaisons de technologies :
 - A) Issues d'un laboratoire de recherche (public/privé) et/ou s'appuyant sur une équipe/gouvernance en lien fort avec le monde scientifique (profil scientifique/technologique-clef).
 - B) Qui présentent de fortes barrières à l'entrée, matérialisées par des verrous technologiques difficiles à lever.

- C) Qui constituent un avantage fortement différenciateur par rapport à la concurrence.
- D) Caractérisées par un *go-to-market* (développement, industrialisation, commercialisation) long/complexe donc probablement capitalistique. »

Depuis, ces critères ont été raffinés pour aboutir à la définition suivante des startups deeptech :

- « Elles proposent un produit qui apporte une forte valeur ajoutée sur son marché.
- Elles utilisent une technologie de rupture protégée par la Propriété Intellectuelle.
- Elles se développent en lien étroit avec des équipes de recherche publique ou privée.
- Elles répondent à des enjeux majeurs. »²

C'est à partir de ces différents éléments que nous entamons notre recherche sur cet objet encore récent que sont les startups deeptech. Cette première caractérisation réalisée par Bpifrance souligne déjà l'originalité de ce concept vis-à-vis des typologies de startups déjà bien connues de la littérature. Les enjeux particuliers de développement propres aux startups deeptech et soulignés par Bpifrance laissent entendre que la réponse à y apporter relève d'une étude plus approfondie de leurs spécificités et de leurs mécanismes de gestion. Nous discuterons plus longuement des caractéristiques des startups deeptech dans le chapitre 1.

3. Motivations scientifiques : comprendre la phase de scale-up à l'aune des enjeux de conception des startups deeptech

Tout d'abord, nous mettons en évidence la difficulté à saisir les mécanismes de gestion du passage à l'échelle. Puis, pour enrichir notre compréhension du passage à l'échelle, nous montrons l'intérêt de l'apport d'un autre champ de la littérature aux recherches en entrepreneuriat : celui de la conception.

3.1. L'énigme du passage à l'échelle

Le scale-up ou, dans sa traduction française, le passage à l'échelle est considéré comme étant une des étapes de la trajectoire de croissance d'une startup. Nous parlerons donc de la phase de scale-up ou plus simplement du passage à l'échelle. Ces deux terminologies seront utilisées indifféremment dans l'ensemble de la thèse, dans un souci de fluidité de la lecture. Par ailleurs, on parle aussi de « *scalability* » lorsqu'il s'agit de la capacité de l'entreprise à franchir cette étape.

Si toutes les startups ont vocation, par essence, à passer à l'échelle, la réalité montre qu'elles ne sont que quelques-unes à y arriver. Le passage à l'échelle reste encore énigmatique, et ce d'autant plus lorsque la typologie des startups considérées, à savoir les startups deeptech, est très récente. La considération du nombre de licornes, ces startups valorisées à plus d'un milliard d'euros, qui sont

² Ces critères sont consultables sur le site internet dédié aux startups deeptech et géré par la Direction Deeptech de Bpifrance : <https://www.lesdeeptech.fr/decouvrir-la-deeptech/>

une sorte d'archétype des startups en phase de scale-up, suffit à illustrer cette énigme : on en compte seulement une trentaine³ en 2023 en France.

Bien que la terminologie de scale-up soit devenue monnaie courante dans la littérature en entrepreneuriat et en pratique dans les écosystèmes d'accompagnement de startups, elle provient du monde de l'informatique où aucune définition satisfaisante n'a pu être trouvée. Après une étude précise des définitions formelles de « *scalability* », Hill (1990) conclut en effet qu'il serait préférable de ne plus se référer à ce terme tant il est difficile d'en trouver une définition rigoureuse. Il met plus particulièrement en avant le fait que le terme de *scalability* puisse se référer à l'architecture des systèmes à processeurs multiples, à la mise en place de nouvelles machines, à la conception de nouveaux ordinateurs voire au marketing. Ce résultat est déjà un premier indice de la complexité à saisir le concept de scale-up.

Pourtant, dans le monde de l'entrepreneuriat et dans littérature sur les modèles d'affaires, un consensus se dégage autour des descripteurs principaux de la phase de scale-up : celle-ci se caractérise notamment par une augmentation forte du chiffre d'affaires, des ventes, du nombre de collaborateurs, voire de la valorisation (Duruflé et al., 2017). Pour cela, les startups, positionnées le plus souvent dans le monde du numérique, cherchent à « *designing scalable business models* » d'après le titre de l'article de Zhang et al. (2015). Un tel modèle d'affaires repose sur la validation de la rencontre entre un produit et un marché, qui est la première condition pour entrer dans la phase de scale-up ; celle-ci consiste alors à reproduire ce modèle d'affaires (Eisenmann et al., 2013).

Néanmoins, d'autres travaux précisent que la phase de scale-up est encore le lieu d'expérimentations (Sanasi, 2023). Cela remet déjà en cause la définition du démarrage de la phase de scale-up à partir de la validation d'un modèle d'affaires qui suffirait de reproduire. Il s'agit donc de comprendre ce qui reste à concevoir lorsque l'entreprise entre en phase de scale-up.

3.2. L'originalité de la notion de patrimoine de création pour caractériser la phase de scale-up

Nous proposons d'enrichir la vision du passage à l'échelle portée par la littérature en entrepreneuriat et sur les modèles d'affaires à travers le prisme de la conception. Ce positionnement original se justifie compte-tenu des forts enjeux de conception auxquels les startups deeptech sont confrontées : sur le plan technique bien sûr, mais également en ce qui concerne les marchés ou encore les écosystèmes à concevoir pour déployer la technologie. Par ce rapprochement, nous rejoignons les préoccupations d'un champ de recherche encore récent, l'*entrepreneurship as design* (Romme & Reymen, 2018) et nous contribuons à démocratiser une perception de l'entrepreneuriat vu comme une science de la conception.

Il faut plus particulièrement noter l'apport théorique de la littérature en conception vis-à-vis du recours à la notion de patrimoine de création, introduite par Carvajal-Perez (2018), Hatchuel et al. (2019) et H. Harlé et al. (2021) et définie comme « *a capacity to both: i) "respect" a craft tradition; and ii) "break" traditional rules and regenerate the tradition!* » (Hatchuel et al., 2019, p.1544). Autrement dit, le patrimoine de création permet de penser l'innovation dans la tradition.

³ Le nombre fluctue entre 25 et 29 selon les sites internet consultés.

Concrètement, il se matérialise par la construction progressive par l'entreprise d'un ensemble de règles de conception, qui ont vocation à être préservées au cours du temps (même si l'ensemble des règles peut être remis en question) et qui se caractérisent par leur générativité, c'est-à-dire leur capacité à faire perdurer la dynamique d'innovation.

S'il est tentant de voir dans le patrimoine de création une nouvelle ressource, au sens de la *resource-based theory* élaborée par Penrose (1959), dont disposeraient les entreprises, nous proposons de considérer le patrimoine de création plutôt comme un moyen de gestion des ressources, ce qui sera plus longuement précisé dans le chapitre 2. Il ne s'agit pas non plus de confondre le patrimoine de création avec la notion de « *creative slack* », issue de celle d'« *organizational slack* » de Penrose (1959), comme la définissent Cohendet et al. (2010) : « *In innovative firms, our view is that the organisational slack is essentially a creative one which plays the role of an important reservoir of opportunities of innovative knowledge for the organization, and guides to a large extent, the growth of the organisation. In line with Penrose's vision, the firm which has accumulated a creative slack is better prepared than any other organisation to derive benefit from the creative potential of the slack.* » (p.153). Le patrimoine de création diffère du *creative slack* en ce qu'il permet de définir la manière dont le *creative slack* est généré et la façon dont l'entreprise s'en saisit. Ainsi, le patrimoine de création apparaît être bien plus un outil de conception qu'une ressource ; autrement dit, il s'agit de différencier l'objet de l'usage (la ressource) et la méthode en vue de l'usage (l'outil de gestion).

Si cette notion de patrimoine de création suscite notre intérêt, c'est parce qu'elle permet de rendre compte du dilemme que les startups deeptech connaissent au moment de leur passage à l'échelle. En effet, la mise en évidence de la poursuite des efforts de conception durant cette phase conduit à considérer non plus le scale-up des startups deeptech comme la seule reproduction d'un modèle d'affaires validé, mais bien comme le lieu de la poursuite de la dynamique d'innovation simultanément à la stabilisation des éléments à préserver. La capacité générative et préservatrice que définit le patrimoine de création est un moyen de saisir cet enjeu de conception de la phase de scale-up. Dès lors, on peut considérer que la constitution d'un patrimoine de création est une condition suffisante pour le passage à l'échelle. Cela ne rentre d'ailleurs pas en contradiction avec la définition première de la phase de scale-up, vue comme la reproduction d'un modèle d'affaires validé, si l'on considère la règle de reproduction du modèle d'affaires validé comme un patrimoine de création, qu'il s'agit bien de constituer pour être en mesure de passer à l'échelle. Nous tenterons de montrer dans l'ensemble de cette thèse en quoi le patrimoine de création est aussi une condition nécessaire pour le scale-up. Autrement dit, la problématique générale de ces travaux se formule ainsi : **dans quelle mesure pouvons-nous considérer que le scale-up d'une startup deeptech est une phase de constitution d'un patrimoine de création ?**

Ainsi, l'introduction de la notion de patrimoine de création sera un moyen de répondre aux questionnements de Bpifrance : le soutien à la conception du patrimoine de création devient, en effet, un objectif à poursuivre pour accompagner la phase de scale-up des startups deeptech.

4. Itinéraire de recherche

4.1. Formulation des questions de recherche

La mise en lumière de l'intérêt de la notion de patrimoine de création dans la compréhension de la phase du scale-up appelle à définir des moyens d'observation des enjeux de conception rencontrés par les startups deeptech qui cherchent à passer à l'échelle. Notre première question de recherche est donc :

Comment le concept de patrimoine de création révèle-t-il les descripteurs du scale-up ?

Dès lors que nous avons prouvé qu'une startup deeptech dispose bien d'un patrimoine de création au cours du passage à l'échelle, il s'agit d'être en mesure de comprendre comment il se conçoit. Nous soulevons la question suivante :

Comment une startup deeptech se constitue-t-elle un patrimoine de création en phase de scale-up ?

Enfin, la phase de scale-up fait apparaître un enjeu de stabilisation du rapport que la startup entretient avec son écosystème, ce qui fait partie également de son patrimoine de création. C'est pourquoi nous chercherons à comprendre comment la startup deeptech construit son rapport à l'écosystème, autrement dit :

Comment l'entreprise en phase de scale-up gère-t-elle son rapport à l'écosystème ?

4.2. Éléments de méthode pour la réponse aux questions de recherche

Ce sont les forts enjeux de conception relatifs au développement technologique et au positionnement sur le marché qui ont motivé la mise en place d'une recherche au plus proche de l'objet de recherche étudié. La problématique notamment portée par Bpifrance d'une compréhension plus affinée des enjeux de conception des startups deeptech à orienter la définition du terrain de recherche vers les startups deeptech elles-mêmes. La littérature qui porte sur ce concept nouveau ne fait d'ailleurs pas état d'études existantes ayant mis en place une méthodologie de recherche-intervention auprès de cet objet de recherche. À travers ce choix méthodologique, c'est une posture du travail de recherche qui transparait : les travaux ont en effet pris place au cœur même des évolutions que connaissent les startups dans cette phase de scale-up.

Face à une dimension très exploratoire du sujet, les recherches-interventions ont permis d'étudier le passage à l'échelle selon différents angles de vue pour mieux en déterminer les mécanismes de gestion et leur diversité : à partir des modèles d'affaires successifs mis en place, d'un déploiement simultané de deux produits grâce à une stratégie de plateforme ou encore de la séquence des prototypes définie par un calendrier de maturation technologique précis. Ainsi, chacun des cas d'étude contribue à répondre à une question de recherche.

L'originalité de notre travail repose aussi sur l'introduction d'une approche à partir du langage de la conception, en complément des théories existantes en entrepreneuriat. La compréhension fine des enjeux de conception nécessitait d'ailleurs une très grande proximité avec le terrain de recherche, permise par la recherche-intervention.

Enfin, compte-tenu de la forte proportion d'entreprises françaises clientes de Bpifrance, le fait que les trois startups deeptech étudiées bénéficient d'un soutien, selon diverses modalités, de la banque publique, n'introduit pas un biais significatif dans les résultats. C'est d'autant plus vrai que les financements liés au plan Deeptech ont vocation à soutenir très largement les startups deeptech.

4.3. Synopsis de la thèse

Dans un **premier chapitre**, nous nous penchons sur les spécificités des startups deeptech et nous élaborons une caractérisation à partir d'une revue de la littérature et de l'étude des typologies d'entreprises proches. Les analyses quantitatives complémentaires mettent en évidence la difficulté à saisir les problématiques de gestion propres aux startups deeptech à partir des descripteurs classiques issus de la littérature et des pratiques dans le champ de l'entrepreneuriat. Nous réaffirmons ainsi la problématique rencontrée par Bpifrance dans sa recherche de la mise en place d'un soutien efficace au développement des startups deeptech.

Face aux moyens considérables déployés par la puissance publique et prenant en considération la promesse de l'impact portée par les startups deeptech, nous nous intéressons plus particulièrement à comprendre en quoi consiste leur passage à l'échelle, par quels mécanismes de gestion il peut être décrit et *a fortiori* comment il peut être soutenu. C'est ce qui motive l'explicitation du cadre théorique autour de la notion de scale-up que nous réalisons dans le **deuxième chapitre**. La compréhension de la phase de scale-up par la littérature en entrepreneuriat et sur les modèles d'affaires met en évidence un paradoxe entre une phase qui serait à la fois une reproduction d'un modèle d'affaires et le lieu de la poursuite des expérimentations. Pour aborder les enjeux de conception de la phase de scale-up, majeurs dans le cas des startups deeptech, nous apportons un éclairage original sur le passage à l'échelle à partir d'une approche par la conception. Ayant mis en évidence la dimension conceptive de la phase de scale-up, nous chercherons à déterminer la nature de l'objet à concevoir, que nous saisissons à travers la notion de patrimoine de création.

Notre positionnement épistémologique et nos choix méthodologiques sont présentés dans le **chapitre 3**. Le caractère fortement exploratoire de cette recherche portant sur un objet nouveau, que sont les startups deeptech, au croisement de plusieurs champs de recherche pour saisir les mécanismes de gestion du passage à l'échelle, a conduit à mettre en place trois études de cas de startups deeptech sous la forme de recherches-interventions.

Dans une première étude de cas, réalisée au sein de la startup d'agriculture urbaine Agricoool, nous montrons l'intérêt du langage de la conception pour mettre en lumière les préservations qui portent sur l'architecture de conception. Nous étudierons plus particulièrement les produits successifs développés par la startup entrée en phase de scale-up à l'aide de la conception axiomatique. La capacité de l'entreprise à capitaliser sur ces préservations pour concevoir les développements futurs renvoie aux caractéristiques d'un patrimoine de création. Le **chapitre 4**

permet ainsi d'apporter la preuve de l'apparition du patrimoine de création au cours de la phase de scale-up.

C'est dans le but de comprendre comment ce patrimoine de création se constitue que nous mettons en place une deuxième recherche-intervention, au sein d'une startup proposant une solution de bioimpression par laser, Poietis. Nous mettrons en évidence, dans le **chapitre 5**, les efforts de gestion relatifs à la conception de ce patrimoine de création, à partir d'une modélisation des activités de conception basée sur l'étude de l'expansion fonctionnelle d'une plateforme. Ce sera l'occasion de souligner la capacité de la technologie à s'insérer dans plusieurs marchés, c'est-à-dire sa généralité, et donc la nécessité de construire les écosystèmes associés.

L'objet du **dernier chapitre** est de montrer comment la stratégie de prototypage stabilise le rapport à l'écosystème, vu comme un élément du patrimoine de création, et d'évaluer la robustesse de cette stratégie au regard de la généralité de la technologie. Nous nous appuyons sur l'étude de la séquence des prototypes développée par SUBLIME Énergie, une startup proposant une solution de liquéfaction du biogaz, pour mettre en évidence l'intérêt d'une conception indépendante des éléments relatifs au rapport à l'écosystème.

Nous concluons par une synthèse des résultats principaux de la thèse, qui seront traduits en un certain nombre de recommandations à destination des entrepreneurs dans les startups deeptech et plus particulièrement encore, à destination de Bpifrance dans le but de renforcer l'efficacité des instruments déployés dans le cadre du plan Deeptech.

Chapitre 1 – Soutenir le développement des startups deeptech : la mission de Bpifrance comme opérateur du plan Deeptech

Chapitre 1 – Soutenir le développement des startups deeptech : la mission de Bpifrance comme opérateur du plan Deeptech

1. Caractérisation des startups deeptech en vue de la compréhension de leurs mécanismes de passage à l'échelle.....30

- 1.1. Construction d'une première caractérisation des startups deeptech à partir de la littérature.....31
 - 1.1.1. *Une littérature grise foisonnante pour justifier d'investissements massifs ou pourquoi les startups deeptech ont le vent en poupe* 31
 - 1.1.2. *Un concept de deeptech certes récent dans le monde académique mais en lien avec des termes connus*..... 32
 - 1.1.3. *Comprendre les startups deeptech à partir de travaux existants sur des objets de recherche proches et les déterminants de leur développement*..... 33
 - 1.1.4. *Multipllicité des caractéristiques propres aux startups deeptech à partir de celles des divers objets de recherche proches* 39
- 1.2. La tentative d'une caractérisation des startups deeptech à partir d'une analyse quantitative.....43
 - 1.2.1. *L'analyse en composantes principales : un outil statistique pour décrire les bases de données de startups deeptech*..... 43
 - 1.2.2. *Illustrer l'émergence de solutions issues de la recherche technologique à partir des lauréats du concours i-Lab* 44
 - 1.2.3. *L'insuffisance de l'analyse quantitative pour saisir les déterminants du passage à l'échelle* 51

2. Les interrogations multiples partagées par les acteurs du développement des startups deeptech face à l'énigme de leur passage à l'échelle51

- 2.1. Face à des défis mondiaux, une dynamique commune51
- 2.2. En France, des moyens publics alloués au développement des startups deeptech en augmentation52
 - 2.2.1. *Le renforcement du plan Deeptech* 52
 - 2.2.2. *La question des descripteurs du développement des startups deeptech soulevée par Bpifrance*..... 53
- 2.3. L'enjeu de la croissance au cœur des programmes portés par l'État58
 - 2.3.1. *Le bilan contrasté du concours i-Lab* 58
 - 2.3.2. *Des startups deeptech en forte croissance au sein des programmes FT120 et Next40* 58
 - 2.3.3. *Un soutien financier simultané au scale-up et à la R&D*..... 66

3. Décrire et gérer les multiples efforts à fournir pour passer à l'échelle	69
3.1. L'impasse des descripteurs classiques de la croissance	69
3.2. Les startups deeptech face à une phase de scale-up en superposition : l'exemple de la startup DNA Script.....	70
3.3. De nouveaux descripteurs pour saisir les spécificités du scale-up des startups deeptech.....	73
4. Pertinence du choix des startups deeptech comme objet d'étude.....	73
4.1. Intérêt des startups deeptech pour la compréhension des mécanismes propres au scale-up	73
4.2. Intérêt de la question du scale-up des startups deeptech pour la puissance publique : une arme face aux grands défis ?.....	74

Dans ce chapitre, nous introduirons la problématique portée par Bpifrance, à l'origine de ces travaux de thèse. Faisant initialement le constat de la difficulté de la croissance des jeunes entreprises innovantes déjà bénéficiaires de soutien de la puissance publique, Bpifrance cherche à déterminer les mécanismes propres aux startups deeptech pour adapter au mieux ses actions aux besoins de ces entreprises. Ces travaux s'inscrivent bien dans les objectifs définis par le plan Deeptech, dont l'État français a confié l'opérationnalisation à la banque publique d'investissement. Sur un plan plus théorique, au-delà de la seule compréhension du développement des startups deeptech, les propriétés intrinsèques à ces jeunes entreprises au caractère technologique marqué seront un atout considérable pour proposer un modèle généralisable du passage à l'échelle. Nous tâcherons ainsi de montrer dès ce premier chapitre en quoi les startups deeptech sont particulièrement pertinentes lorsqu'il s'agit de saisir la complexité de la phase de scale-up. Dès lors l'objet principal de nos travaux sera cette étape de développement, étudiée à partir de plusieurs cas de startups deeptech.

Ce premier chapitre servira tout d'abord à contextualiser nos travaux de recherche en s'arrêtant sur une définition des startups deeptech, construite à partir des objets de recherche proches ayant été précédemment étudiés par la littérature (section 1.1). Une première analyse quantitative sur la base d'une étude des lauréats du concours d'innovation i-Lab enrichira cette caractérisation (section 1.2). Afin de saisir le rôle de la puissance publique dans la dynamique, devenue mondiale, de scale-up des startups deeptech (section 2.1), nous nous intéresserons également aux programmes de soutien mis en place par l'État français en nous appuyant notamment sur une deuxième analyse quantitative à partir des données de l'observatoire des startups deeptech de Bpifrance (section 2.2). Les programmes de sélection des entreprises innovantes à fort potentiel de croissance fourniront des données utiles à une troisième analyse quantitative pour tenter de mettre en rapport les indicateurs classiques de croissance avec le développement des startups deeptech (section 2.3.2). Les outils de financement déployés par Bpifrance mettront par ailleurs en évidence le double rôle des financements dédiés à la phase de scale-up à savoir le financement d'efforts de R&D importants en sus de l'industrialisation (section 2.3.3). Ainsi, ce sont de nouveaux descripteurs de cette étape-clef du développement qui doivent être mis au jour (section 3) : compte-tenu de leurs caractéristiques originales, les startups deeptech apparaissent comme de bons candidats à la compréhension des mécanismes du scale-up (section 4.1) tout en étant un levier pour la puissance publique face aux grands défis sociétaux contemporains (section 4.2).

1. Caractérisation des startups deeptech en vue de la compréhension de leurs mécanismes de passage à l'échelle

L'intérêt de la puissance publique française porté aux startups deeptech peut déjà être justifié compte-tenu de la spécificité de ces jeunes entreprises, que cette première partie a pour objectif de démontrer.

1.1. Construction d'une première caractérisation des startups deeptech à partir de la littérature

1.1.1. Une littérature grise foisonnante pour justifier d'investissements massifs ou pourquoi les startups deeptech ont le vent en poupe

Le terme « deeptech » qualifie des technologies ou des combinaisons de technologies, dites de rupture, qui reposent de plus en plus sur les startups considérées comme plus agiles et donc plus aptes à introduire des « disruptions » (dans les produits, les processus, les marchés). Le vocable « deeptech », encore très récent, a été introduit par Chaturvedi (2015), CEO de la plateforme d'investissement en venture capital, Propel(x), spécialisée dans l'investissement dans les startups proposant des technologies innovantes. Ce sont surtout les structures d'accompagnement et de conseil qui se sont saisies du terme et ont publié les premiers rapports spécifiques à cette population de jeunes entreprises, dans le but de les caractériser (de la Tour et al., 2017), de comprendre l'écosystème qui se développe autour (de la Tour et al., 2019), de fournir des éléments de compréhension pour les collaborations (N. Harlé et al., 2017a, 2017b), ou encore de qualifier les investissements (Bpifrance, 2020 ; Maghsoudnia et al., 2017 ; Portincaso et al., 2021). En France, le gouvernement traduit « *deeptech* » par « à forte intensité technologique » ou « de haute technologie ». On considérera que les rapports faisant usage de ces termes renvoient aux startups deeptech.

À partir de ces différentes études, plusieurs critères de différenciation des startups deeptech ont été mis au jour par Basilio Ruiz de Apodaca et al. (2023, p.10) :

- « 1) *positioned at the knowledge frontier with long and uncertain R&D cycles;*
- 2) *related to tangible products and industrialization processes;*
- 3) *linked to the ecosystem and especially to Higher Education Institutions;*
- 4) *problem oriented or mission-driven;*
- 5) *focused on the creation of an “option space” and a dynamic de-risking cycle. »*

Les auteurs concluent leur propos en soulignant que ces critères indiquent également les défis auxquels les entrepreneurs et les investisseurs de l'entrepreneuriat deeptech sont confrontés lorsqu'il s'agit de faire croître ces startups.

Le dynamisme au niveau des investissements est aussi à souligner. Bpifrance, à la tête de ce mouvement en France, a ainsi déjà mis sur la table 1,1 milliard d'euros en investissements en fonds propres et 1,2 milliard d'euros en fonds de fonds depuis 2019 (ce qui représente 5 milliards d'euros avec l'effet de levier) ; le financement n'est pas en reste puisque 2 milliards ont déjà été distribués, à travers les dispositifs de financement de l'innovation (solutions dédiées aux startups deeptech mais aussi concours, prêt innovation, prêt d'amorçage, garantie innovation...)⁴. D'autres structures d'investissement françaises participent conjointement à cette dynamique : Elaia, Supernova Invest ou Quantonation pour ne citer qu'eux. La Direction Générale des Entreprises a d'ailleurs publié en 2021 un panorama des fonds de capital-risque finançant les startups deeptech en France (*Panorama des fonds de capital-risque deep tech - Financement des start-up à forte*

⁴ Les données quantitatives, fournies par Bpifrance, sont à retrouver dans le communiqué de presse des 4 ans du plan Deeptech, fêtés le 28 mars 2023 : <https://presse.bpifrance.fr/bilan-du-plan-deeptech-a-4-ans-doublement-du-nombre-de-startups-deeptech-creees-entre-2018-et-2022/>.

intensité technologique, 2021) : leur étude dresse le constat de cette forte dynamique puisque les fonds levés dans ce secteur ont connu une croissance annuelle moyenne de 60 % entre 2015 et 2020, ce qui fait de la France le deuxième pays européen en ce qui concerne l'investissement dans les technologies de rupture. Ainsi, en 2022, ce sont 2,59 milliards d'euros qui ont été levés par les startups deeptech en France⁵.

1.1.2. Un concept de deeptech certes récent dans le monde académique mais en lien avec des termes connus

La terminologie de deeptech n'est apparue que récemment dans la littérature académique pour spécifier un type de startups qui avait déjà été saisi par d'autres termes à l'acception plus large. Néanmoins, les mécanismes de développement des jeunes entreprises innovantes, qu'elles soient appelées deeptech ou *high-tech* par exemple, sont encore peu étudiés et restent mal compris. Tout en soulignant le flou autour du terme de deeptech, Siegel et Krishnan (2020, p.8) en fournissent une définition plus développée : « *A "Deep" Technology was impossible yesterday, is barely feasible today, and will quickly become so pervasive and impactful that it is difficult to remember life without. Deep Tech solutions are reimaginations of fundamental capabilities that are faithful to real and significant problems or opportunities, rather than to one discipline.* » Les travaux publiés les plus prolixes sur les startups deeptech se concentrent sur leur cycle de développement (Schuh, Studerus, et al., 2022) et le transfert de technologies (Schuh, Latz, et al., 2022).

Bien que la terminologie de « deeptech » ait connu rapidement un véritable engouement, la recherche académique se trouve encore au début du chemin de la reconnaissance de ce concept comme un objet de recherche à part entière. En février 2023, une recherche du terme dans la base de données bibliographiques Scopus (titre, résumé, mots-clés) fournit 31 résultats dont seulement une moitié est en lien avec nos préoccupations ; de même, on obtient 30 résultats pour une recherche sur Web of Science (tous les champs)⁶. On compte tout de même de nombreux travaux sur des thèmes sensiblement proches voire comparables.

C'est justement ce que proposent Romasanta et al. (2021) en réalisant une revue de la littérature très complète. Ils mettent au jour les origines du terme deeptech et en fournissent une caractérisation plus précise en le distinguant des concepts existants dans la littérature dont la proximité peut porter à confusion. Une innovation qualifiée de deeptech peut en effet se rapprocher par certains aspects d'une innovation radicale ou disruptive, d'une percée (*breakthrough*) ou encore d'une technologie émergente (au sens de Rotolo et al. (2015)). Les auteurs précisent que la différence entre ces termes tient au caractère nouveau et à la dimension d'impact, qui sont plus ou moins dominants selon les notions. La définition finale de deeptech retenue par les auteurs est : « *early-stage technologies based on scientific or engineering advances, requiring long development times, systemic integration, and sophisticated knowledge to create downstream offerings with the potential to address grand societal challenges* » (p.13-14).

⁵ Donnée fournie par Bpifrance et publiée sur le site Les Deeptech : <https://www.lesdeeptech.fr/Autre/85-le-plan-deeptech-4-ans-bilan-et-perspectives.html>.

⁶ À partir de ces bases de données bibliographiques, on vérifie par ailleurs qu'il n'y a pas eu un remplacement de la terminologie « *high-tech* » (par exemple) par celle de « deeptech » : sur Scopus, ce sont 12383 documents qui contiennent « *high-tech* » dans le titre, le résumé ou les mots-clés, et qui ont été publiés entre 2015 et 2022.

1.1.3. Comprendre les startups deeptech à partir de travaux existants sur des objets de recherche proches et les déterminants de leur développement

Pour caractériser plus précisément les startups deeptech, plusieurs autres concepts bien connus de la littérature peuvent apporter des éclairages et en particulier des éléments de compréhension sur leurs mécanismes de croissance. Les objets de recherche sont d'abord choisis dans ce but parce qu'ils se rapprochent des startups deeptech par leur activité principale, à savoir le développement de solutions technologiques. Cet angle de vue est certes réducteur, mais dans la mesure où les startups deeptech sont définies comme telles vis-à-vis de leur dimension très fortement technologique (« deeptech »), c'est bien à partir de ce qualificatif qui leur est propre que nous cherchons à les différencier. La caractérisation proposée ne tient donc pas compte d'autres types d'entreprises voire plus largement de structures pouvant se rapprocher des startups deeptech par d'autres aspects : on aurait en effet pu prendre en considération avec plus de finesse la qualification de startup, ou s'intéresser davantage à la dimension d'impact, ou encore aux modes de financement. En outre, l'accent est mis sur le rapport de ces objets de recherche à la croissance. Ainsi, une brève revue de littérature relative à la croissance des entreprises technologiques, qui a fait l'objet de nombreuses publications (Boissin et al., 2019 ; Lasch et al., 2005 ; Storey & Tether, 1998), met en lumière les enjeux et les difficultés rencontrées au cours de leur développement. Les caractéristiques présentées ci-après sont récapitulées sous la forme d'un tableau dans la section suivante (1.1.4).

À partir de la littérature sur la croissance des startups technologiques

Boissin et al. (2019) cherchent à déterminer les trajectoires de croissance des startups soutenues par le ministère de l'Enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation à partir des modes de financement (autofinancement, dette et levée de fonds). Ils soulignent déjà que les dynamiques de croissance des entreprises technologiques sont insuffisantes et mettent en évidence deux trajectoires types à partir de ces indicateurs de financement. D'une part, une trajectoire semblable à une entreprise traditionnelle, qui atteint progressivement la rentabilité avec un modèle économique à l'équilibre. D'autre part, une trajectoire de croissance qui fait apparaître plus tardivement la rentabilité, avec un financement à partir de levées de fonds et de dette (les fonds levés servant à financer les phases de R&D). Compte-tenu des levées de fonds considérables réalisées par les startups deeptech⁷ et des coûts de R&D très importants auxquelles elles font face avant de

⁷ De 1,08 milliards d'euros levés en 2018, les startups deeptech françaises ont levé 2,59 milliards d'euros en 2022. Les données sont celles diffusées dans le cadre des 4 ans du plan deeptech le 28 mars 2023, en page 5 de la présentation téléchargeable à partir du site suivant : <https://presse.bpifrance.fr/bilan-du-plan-deeptech-a-4-ans-doublement-du-nombre-de-startups-deeptech-creees-entre-2018-et-2022/>. Si l'on ramène ces chiffres au nombre de tours de table, Bpifrance en comptabilise 184 en 2022 (<https://sh1.sendinblue.com/3gsstmj40hxpne.html?t=1673948302>), ce qui donne un montant moyen levé par tour de 14,1 millions d'euros. Il est intéressant de comparer ce montant moyen levé par les startups deeptech au montant moyen des levées de fonds dans l'écosystème entrepreneurial français : selon Maddyness, en 2022, 13,17 milliards d'euros ont été levés lors de 839 tours, ce qui correspond à un montant moyen de 15,7 millions d'euros (<https://www.maddyness.com/2023/01/03/13-milliards-euros-leves-2022/>). Ce comparatif mis en rapport avec la jeunesse de l'écosystème français autour des startups deeptech souligne bien la rapidité de la croissance des montants levés par les startups deeptech.

pouvoir commercialiser leurs innovations, cette trajectoire de croissance est caractéristique des situations rencontrées dans l'entrepreneuriat deeptech.

L'étude des déterminants de la survie et de la croissance des startups proposant des technologies de l'information et de la communication (TIC) réalisée par Lasch et al. (2005) met en avant un comportement propre à ces startups ; les déterminants classiques, définis à partir des catégories entrepreneur, entreprise et environnement économique, n'étant pas forcément retrouvés. Au contraire, ils montrent que le capital au démarrage et l'intégration de capitaux au cours du développement sont des facteurs de succès et de croissance ainsi que l'existence de clients au démarrage. Le nombre de salariés au démarrage est aussi explicatif de la croissance : plus ils sont nombreux au démarrage, plus le potentiel de croissance de l'entreprise en termes d'effectifs est élevé. Par ailleurs, les auteurs ne manquent pas de souligner que les startups TIC « sont par nature porteuses d'une grande incertitude, à la fois sur les produits, sur les technologies de production et sur les besoins des consommateurs » (p.51) ; ce qui justifie que les startups TIC fassent l'objet d'une étude particulière et nous conforte dans le choix de s'intéresser plus en détail aux startups deeptech.

D'un point de vue théorique, les startups deeptech sont proches des *New Technology-Based Firms* (NTBF). Définies par Storey et Tether (1998), les NTBF sont des entreprises indépendantes, de moins de 25 ans, et basées sur une invention ou une technologie risquée ou encore qui créent de nouvelles industries. Cette définition étroite peut être élargie à toutes les entreprises, de type PME, qui proposent des « *high-technologies* » indépendamment du secteur d'activités. Ce sont ces deux perspectives qui sont prises en considération par les auteurs dans leurs travaux sur les NTBF. Ces dernières présentent de bons taux de survie mais une croissance limitée : c'est un des principaux résultats de l'étude menée par Rannikko et al. (2019) portant sur une cohorte d'entreprises suédoises. On retrouve ce même résultat en s'intéressant aux entreprises françaises lauréates du concours d'innovation i-Lab depuis 1999 dont les caractéristiques les rapprochent des NTBF. La synthèse d'enquête sur les lauréats du concours d'innovation i-Lab réalisée en 2018⁸ à l'occasion de la 20^e édition du concours fait état d'un très bon taux de pérennité, s'élevant à 63 % avec un âge moyen de 9 ans sur l'ensemble des entreprises lauréates (soit 1933 entreprises). En revanche, la croissance des entreprises lauréates est également limitée : on note que l'effectif moyen des répondants à l'enquête (soit environ un quart des lauréats) est de 12 salariés et que seulement 25 entreprises lauréates depuis 1999 ont fait l'objet d'une introduction en bourse (Euronext ou le NASDAQ Europe). Dans la mesure où Bpifrance considère les lauréats du concours i-Lab comme des startups deeptech, ces constats fournissent déjà des premiers indices concernant le développement des startups deeptech.

À partir de l'étude de la survie des startups technologiques

Néanmoins, il convient de discuter brièvement le propos sur les taux de survie des startups à caractère technologique. Ce point fait particulièrement débat dans la communauté scientifique, qui ne s'accorde pas sur un taux de réussite (indépendamment même du type de startup considérée). Romme (2022) indique au contraire que les importants taux d'échecs sont la preuve

⁸ La synthèse est consultable sur le lien suivant : <https://www.bpifrance.fr/nos-actualites/le-concours-i-lab-20-ans-dinnovation>.

des risques nombreux auxquels les startups deeptech sont soumises. Ce débat amène à considérer la question de la différence entre la survie des entreprises et l'échec de leur modèle d'affaires, c'est-à-dire l'incapacité à déployer le produit sur un marché.

On entend par là que l'échec d'un modèle d'affaires n'entraîne pas nécessairement la disparition de l'entreprise considérée. Certains écosystèmes entrepreneuriaux peuvent en effet être propices à la survie d'entreprises aux perspectives de croissance particulièrement limitées, grâce à l'existence de dispositifs d'aides publiques notamment. C'est un phénomène qui a été rendu visible en France à travers le déploiement massifs des dispositifs d'aides pendant la période de la pandémie de la Covid-19⁹. Cela a eu pour conséquence directe une diminution considérable et immédiate du nombre de défaillances d'entreprises, à savoir des redressements et des liquidations judiciaires, relevé par la Banque de France¹⁰. La Figure 1 fait apparaître le nombre mensuel de défaillances d'entreprises en France à partir des données collectées par la Banque de France. La comparaison entre les moyennes sur les périodes 2010-2019 et 2020-2023 corrobore le propos. Un certain nombre d'entreprises ont vraisemblablement survécu à la période de la Covid-19 grâce aux dispositifs publics mis en place, ne faisant que retarder leur cessation de paiement, la courbe rattrapant progressivement son niveau pré-pandémique depuis 2023 : on se retrouve face à des cas d'échecs avec survie de l'entité.

D'autres écosystèmes, bien au contraire, peuvent être propices à de forts taux de mortalité tout en favorisant la réutilisation des compétences développées à travers le réseau des acteurs. C'est la thèse que défendent Ferrary et Granovetter (2009) à propos de l'écosystème de la Silicon Valley et plus particulièrement du rôle des capital-risqueurs. Ces derniers disposent en effet du pouvoir de faire survivre ou de faire mourir les startups par le fait même de les financer dès les premières phases, envoyant ou non un signal positif aux autres acteurs de l'écosystème. Ainsi, Ferrary et Granovetter (2009) précisent que les capital-risqueurs ne financent par an que 3 ou 4 startups sur plus de 500 demandes reçues. Les auteurs insistent sur la proximité des capital-risqueurs de la Silicon Valley avec les entreprises dans lesquelles ils investissent. Cela va jusqu'à la mise en place de collaborations avec les startups qui bénéficient ponctuellement de l'aide de leurs investisseurs sur certains postes. Ces mécanismes permettent alors aux capital-risqueurs de devenir garants de la connaissance entrepreneuriale de l'écosystème : « *By financing start-ups, venture capitalists accumulate entrepreneurial knowledge. They are the memory of the complex network of the Silicon Valley.* » (Ferrary & Granovetter, 2009, p.350). Les auteurs parlent d'une « *collective learning function* ».

Ces éléments compliquent significativement l'analyse concernant la survie des entreprises. Dans le cadre de notre tentative de caractérisation des startups deeptech, nous choisissons de nous référer à deux études qui présentent l'avantage d'être basées sur des échantillons significatifs d'entreprises à dimension technologique, garantissant une certaine validité des conclusions, à savoir les travaux de Rannikko et al. (2019) sur les NTBF et l'étude « conduite » sur les lauréats du concours i-Lab.

⁹ Un panorama des mesures de la politique du « Quoi qu'il en coûte » est proposé par Math (2022).

¹⁰ Les parutions mensuelles du suivi des défaillances sont disponibles sur le site de la Banque de France : <https://www.banque-france.fr/statistiques/chiffres-cles-france-et-etranger/defaillances-dentreprises>

ÉVOLUTION DU NOMBRE DE DÉFAILLANCES D'ENTREPRISES EN FRANCE ENTRE DÉCEMBRE 1990 ET AOÛT 2023

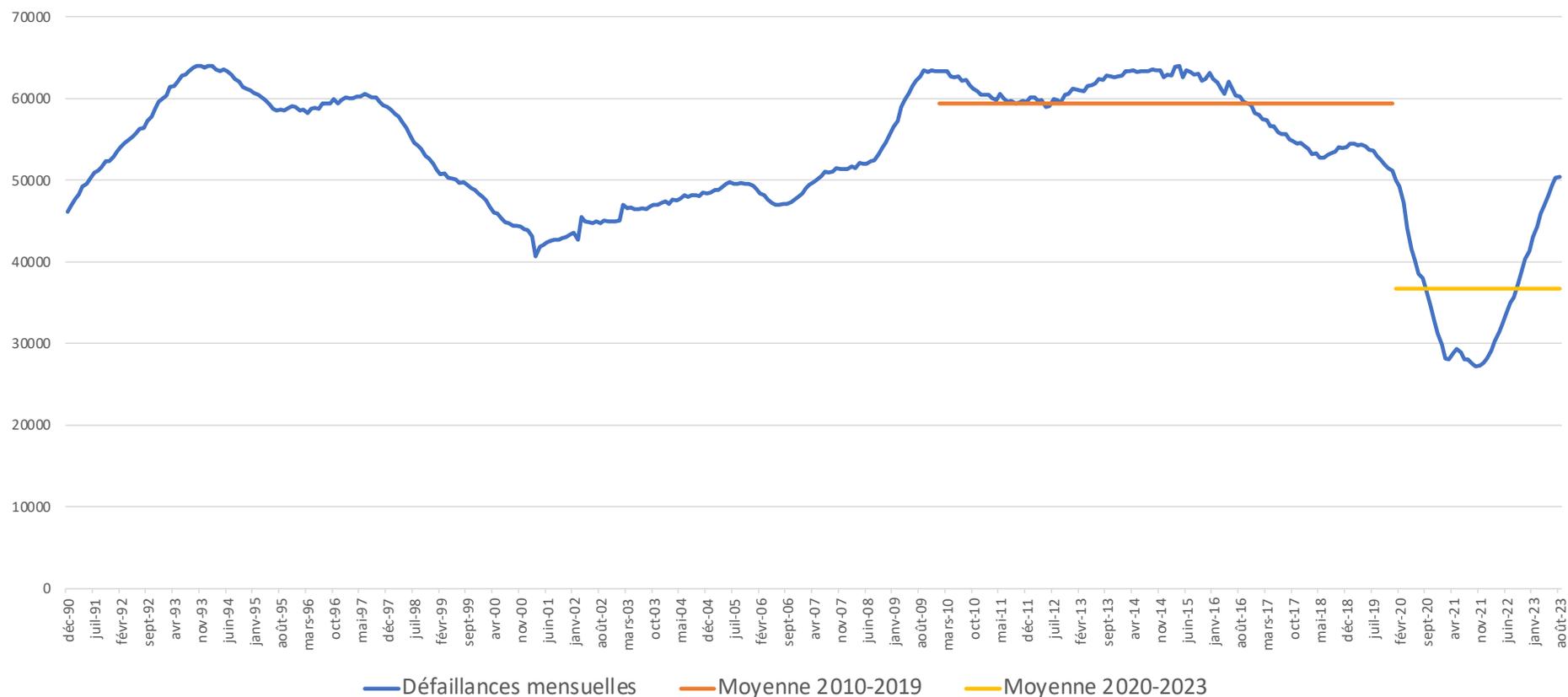


Figure 1. Observation de l'impact du déploiement en France des dispositifs d'aides aux entreprises pendant la période de la pandémie de la Covid-19 au niveau de l'évolution du nombre de défaillances d'entreprises

Source des données nécessaires à l'élaboration du graphique : <https://webstat.banque-france.fr/fr/#/node/5384339>

À partir du rôle des investisseurs

Par ailleurs, si l'on en revient au rôle des investisseurs de capital-risque, ces derniers font face à une situation de double tyrannie lorsqu'il s'agit d'investir dans des NTBF. Murray et Marriott (1998) explicitent la situation en indiquant qu'ils sont confrontés simultanément au risque du projet, notamment en *early stage* et d'autant plus à travers l'internationalisation des projets portés par les NTBF dont la croissance est nécessaire, mais également aux coûts liés à la taille du fonds de capital-risque lorsque celui est petit. En effet, les auteurs indiquent qu'un fonds de petite taille connaît un risque supplémentaire lié à la tension entre les besoins de spécialisation et les besoins de diversification au sein même du fonds. La tendance pour les petits fonds est alors de se spécialiser pour limiter les coûts d'information, alors que la diversification permet d'atténuer le risque global pour l'investisseur. Il est clair que cette situation complique l'accès aux fonds pour les startups porteuses d'innovations technologiques, et d'autant plus lorsque les montants nécessaires au déploiement des technologies augmentent, c'est-à-dire dans les phases avancées du développement.

À partir d'une comparaison avec des concepts proches

Les travaux menés par Arantes et al. (2019) précisent la définition de NTBF en introduisant la notion d'indépendance vis-à-vis d'une autre organisation de laquelle serait issue l'entreprise considérée. Les *spin-off* (ou *spinout*), qui sont par définition issues d'une organisation préexistante (une entreprise privée ou une structure académique), sont considérées par ces auteurs comme des NTBF dépendantes. La distinction proposée entre NTBF dépendantes et indépendantes permet de mettre en évidence leurs caractéristiques propres. *A fortiori*, les auteurs différencient plusieurs types de NTBF dépendantes, dont les *spin-off* académiques, qui se caractérisent alors par un investissement en capital important (souvent à partir de fonds de capital-risque publics), une internationalisation du marché et des activités de R&D dont les résultats sont transférés de la recherche académique vers une application industrielle. Cette diffusion technologique est leur principal apport, d'autant plus que leur impact économique est faible. C'est de ce type de NTBF que les startups deeptech se rapprochent le plus.

Basilio Ruiz de Apodaca et al. (2023) mettent en évidence plusieurs concepts se rapprochant des startups deeptech. Ils citent en particulier les « *high-tech firms, technology-based companies, knowledge-intensive enterprises, disruptive technologies, or even innovation-driven enterprises* » (p.3), tout en montrant que les terminologies existantes restent encore floues pour distinguer avec précision les différents types d'entreprises, voire que ces termes ne renvoient pas toujours à des innovations technologiques. C'est par exemple le cas des « *innovation-driven enterprises* » pour lesquelles l'innovation peut être relative au modèle d'affaires ou encore celui des « *technology-based companies* » qui peuvent porter aussi bien sur des innovations technologiques à partir de modèles d'affaires déjà existants voire de l'intégration de technologies existantes mais également sur des innovations technologiques en rupture, comme pour les startups deeptech. La proximité de ces concepts avec les startups deeptech n'est donc pas toujours avérée (ou elle mérite, au moins, d'être précisée). Christensen et al. (2015) proposent d'ailleurs une clarification du concept de « *disruptive innovation* » en indiquant d'une part que la rupture est dynamique, c'est-à-dire que c'est l'évolution du produit ou du service dans le temps qui constitue la rupture, et d'autre part que les modèles

d'affaires construits par les entreprises fournissant des solutions en rupture sont sensiblement différents de ceux existants. Une innovation de rupture est portée par l'entreprise possédant le moins de ressources qui est capable de mettre au défi les autres acteurs établis. Un nouvel entrant se concentre donc sur des segments négligés par les entreprises établies ou bien sur un marché qui n'existe pas encore.

À partir d'une étude des entreprises *high-tech* aux États-Unis, Maidique et Hayes (1984) dressent une liste des critères de succès, qu'ils sont ensuite en mesure de regrouper en deux types différents et paradoxalement contraires. Une entreprise *high-tech* à succès doit chercher simultanément à se focaliser sur le modèle économique, à assurer la cohésion de l'organisation et à garantir le sens de l'intégrité d'une part, et d'autre part à faire preuve d'adaptabilité, à développer une culture entrepreneuriale et à mettre en place un management pragmatique. L'entreprise *high-tech* fait donc face à un dilemme managérial important entre un travail de structuration pour garantir une stabilité ainsi qu'une nécessaire innovation induisant une prise de risque. Les auteurs ajoutent que ce paradoxe se retrouve également lorsqu'il s'agit de passer d'une petite entreprise à une entreprise en croissance rapide. La proximité des startups deeptech avec les entreprises *high-tech* et l'intérêt que nous portons dans nos travaux sur la phase de scale-up suffisent à comprendre que l'on retrouvera ce paradoxe.

La littérature grise met aussi en exergue un nouveau concept pour regrouper les startups proposant des produits manufacturés, dits *hardware*, sous la terminologie de « *hard tech* ». La mise en parallèle des startups dites *clean tech* et des startups *high-tech* réalisée par In et Monk (2020) montre que ces jeunes entreprises paraissent d'une part plus risquées et font a priori face à de plus grandes incertitudes, et d'autre part, elles nécessitent des infrastructures qui induisent des temps de développement plus longs et des coûts plus importants. On peut déjà y voir des caractéristiques semblables à celles des startups deeptech. Quand elles ne sont pas confondues avec les startups deeptech, les startups *hard tech* sont l'objet d'écrits indiquant leurs particularités vis-à-vis des modèles classiques de développement. Werwath (2019) souligne par exemple l'insuffisance des méthodologies du *Lean Startup* dans le cas des startups *hard tech*. En considérant un recouvrement significatif des critères de définition des startups deeptech et des startups *hard tech*, on peut déjà en déduire une difficulté à appliquer cette théorie classique en entrepreneuriat. Ce propos sera plus amplement explicité dans le chapitre 2, mais on peut déjà indiquer que les auteurs de la méthodologie du *Lean Startup* précisent dès leurs premiers travaux la difficulté à appliquer cette méthodologie aux cas de startups présentant des cycles de développement longs dus à des ruptures technologiques (Eisenmann et al., 2013).

Enfin, aucune précision n'a été faite jusqu'alors concernant les secteurs d'application. Seule la définition des startups TIC effectue une restriction sur les secteurs concernés ; aucun des autres objets de recherche précédemment cités se rapprochant des startups deeptech ne spécifie de secteurs, ce qui amène à tous les considérer. Le paragraphe suivant montrera que le déploiement de ces entreprises sur l'ensemble des secteurs est aussi une caractéristique commune aux startups deeptech : bien que les usages du vocable peuvent préciser certains secteurs, les définitions les plus communément admises ne prennent pas en considération de contraintes sectorielles. C'est pourquoi les startups TIC ne seront finalement pas prises en compte dans le récapitulatif suivant.

1.1.4. Multiplicité des caractéristiques propres aux startups deeptech à partir de celles des divers objets de recherche proches

Le Tableau 1 résume la revue de la littérature précédente dans le but de proposer une liste des caractéristiques des startups deeptech ainsi que des autres structures proches. Une première lecture de ce tableau amène à penser que les propriétés des startups deeptech correspondent à la réunion des caractéristiques de chacun des types de startups considérés. Ainsi, une startup deeptech cumule l'ensemble des propriétés des entreprises technologiques, des NTBF, des entreprises *high-tech* et des startups *hard tech*. La récente littérature relative aux startups deeptech ajoute des caractéristiques supplémentaires qui accentuent la particularité de leur développement.

En effet, en sus de l'existence d'une stratégie de gestion de la propriété industrielle, deux critères apparaissent comme étant propres aux startups deeptech : l'interconnexion de l'écosystème et la dimension d'impact. D'une part, dans l'éditorial de la revue *Journal of Small Business and Enterprise Development*, Kask et Linton (2023) définissent un principe relatif à la gestion du réseau de parties prenantes pour assurer l'industrialisation des technologies portées par les startups deeptech ; ils vont jusqu'à dire que : « *only with the right and supportive network in place, deeptech startups can be successful in developing, commercializing and scaling production of their technology to have an impact and benefit society* ». D'autre part, le rapport proposé par de la Tour et al. (2021) fait état d'une étude auprès de plus de 1200 startups deeptech ayant mis en évidence que 97 % d'entre elles répondent à au moins un des objectifs de développement durable de l'ONU, soulignant par-là même le choix du développement de solutions technologiques aux effets positifs sur les grands défis contemporains. Ces critères semblent donc particulièrement pertinents pour distinguer les startups deeptech des startups technologiques au sens large.

À l'inverse, la littérature met en évidence deux caractéristiques des startups technologiques (au sens large) qui ne sont pas explicitement reliées aux startups deeptech : les cas de trajectoires de croissance semblables à des entreprises traditionnelles (c'est-à-dire une croissance basée sur une augmentation progressive du chiffre d'affaires) que connaissent aussi des entreprises technologiques (Boissin et al., 2019) et le dilemme managérial entre la nécessaire structuration d'une entreprise *high-tech* et le besoin d'innovation pour maintenir une capacité générative (Maidique & Hayes, 1984). Il est raisonnable de penser que ces propriétés sont aussi partagées par les startups deeptech, ce que les différents cas d'étude pourront illustrer dans la suite.

Ainsi, le caractère distinctif des startups deeptech relève bien de l'accumulation des caractéristiques différenciantes des entreprises technologiques au sens large vis-à-vis des entreprises non-technologiques. Cette première expression des spécificités des startups deeptech justifie la particularité de ce type de jeunes entreprises, nécessitant des modèles de financement appropriés à leur développement. Les caractères propres ainsi mis en évidence sont autant de degrés de liberté d'actions pour la puissance publique dans sa mission d'accompagnement et de soutien à leur émergence et à leur développement.

En somme, cette caractérisation dépasse la simple liste de critères en laissant transparaître les difficultés de gestion auxquelles les startups deeptech sont confrontées. Ces difficultés portent plus particulièrement sur les aspects relatifs à la conception de technologies de rupture, à travers les dépenses en R&D et le lien avec le monde académique ; ainsi que sur le déploiement sur le marché.

Les difficultés de gestion induites par ces caractéristiques se rapportent a priori à une phase assez avancée du développement, c'est-à-dire dès lorsqu'il s'agit d'entrer dans une étape de croissance, nécessitant des financements importants sans garantie de réussite compte-tenu des risques élevés des projets. La revue de la littérature laisse donc déjà sous-entendre que la gestion du développement des startups deeptech est particulièrement complexe dans une phase de forte croissance. C'est bien le passage à l'échelle des startups deeptech qui nous intéressera expressément dans la suite du propos.

Tableau 1. Caractérisation des startups deeptech à partir d’une revue de la littérature portant sur des types d’entreprises technologiques

Caractéristiques	Entreprises technologiques	NTBF (dont spin-off)	Entreprises high-tech	Startups hard tech	Startups deeptech
Une croissance limitée	(Boissin et al., 2019)	(Rannikko et al., 2019)			Synthèse des lauréats du concours i-Lab (cf. section 1.1.3)
Une probabilité plus élevée de survie		(Rannikko et al., 2019)			Synthèse des lauréats du concours i-Lab (cf. section 1.1.3)
Une trajectoire de croissance pouvant être semblable à une entreprise traditionnelle (croissance du chiffre d'affaires)	(Boissin et al., 2019)				
Un investissement en capital important pour palier une rentabilité tardive, grâce à la dynamique de l'écosystème de capital-risque (plus particulièrement en France)	(Boissin et al., 2019)	(Arantes et al., 2019)			(Maghsoudnia et al., 2017 ; <i>Panorama des fonds de capital-risque deep tech - Financement des start-up à forte intensité technologique</i> , 2021 ; Portincaso et al., 2021)
Une internationalisation du marché		(Arantes et al., 2019)			Programmes d'accompagnement de la Commission européenne pour le déploiement des innovations de rupture sur les marchés européens (EIC Scale Up 100 ¹¹)
Un long temps de pénétration du marché voire un marché à créer			(Bernasconi & Monsted, 2000)	(In & Monk, 2020)	(Schuh, Studerus, et al., 2022)

¹¹ Le détail du programme est fourni par le conseil européen de l'innovation : https://eic.ec.europa.eu/eic-funding-opportunities/business-acceleration-services/eic-scale-100_en

Des projets présentant des risques élevés et une incertitude importante (intrinsèque aux projets)		(Murray & Marriott, 1998 ; Storey & Tether, 1998)	(Bernasconi & Monsted, 2000 ; Liao & Welsch, 2008)	(In & Monk, 2020)	(Basilio Ruiz de Apodaca et al., 2023 ; Schuh, Studerus, et al., 2022)
Des besoins en financement élevés pour la R&D	(Boissin et al., 2019)		(Bernasconi & Monsted, 2000)	(In & Monk, 2020)	(Basilio Ruiz de Apodaca et al., 2023)
Un transfert technologique du monde académique au monde industriel		(Arantes et al., 2019)			(Denis-Rémis & Heully, 2020)
Un dilemme managérial entre structuration et innovation			(Maidique & Hayes, 1984)		
Une insuffisance de la méthodologie du <i>Lean Startup</i>				(Werwath, 2019)	(Eisenmann et al., 2013)
Un écosystème interconnecté, en particulier avec le monde de la recherche					(Basilio Ruiz de Apodaca et al., 2023 ; de la Tour et al., 2019 ; Kask & Linton, 2023)
Une dimension d'impact vis-à-vis des grands défis					(Basilio Ruiz de Apodaca et al., 2023 ; Chaturvedi, 2015 ; de la Tour et al., 2021 ; N. Harlé et al., 2017a ; Schuh, Studerus, et al., 2022 ; Siegel & Krishnan, 2020)
Existence d'une stratégie de gestion de la propriété industrielle					(Romasanta et al., 2021) Critère de Bpifrance pour l'accès aux financements fléchés sur les startups deeptech ¹²

¹² Les critères sont donnés sur le site de la plateforme : <https://www.lesdeeptech.fr/decouvrir-la-deeptech/>

1.2. La tentative d'une caractérisation des startups deeptech à partir d'une analyse quantitative

Dans le but d'enrichir la première caractérisation des startups deeptech réalisée à partir de la revue de la littérature, nous cherchons à percevoir leurs spécificités à partir d'une analyse quantitative portant sur une base de données de startups qualifiées de deeptech par Bpifrance. Si la nature des données utilisées ne présage pas de mettre en évidence des difficultés de gestion propres à la croissance des startups deeptech, cette seconde caractérisation reste tout de même nécessaire pour ébaucher un profil des startups deeptech françaises.

1.2.1. L'analyse en composantes principales : un outil statistique pour décrire les bases de données de startups deeptech

L'analyse en composantes principales (ACP ou PCA pour *principal component analysis* en anglais) est une méthode statistique qui a pour objectif de décorrélérer des variables a priori corrélées pour mieux décrire un ensemble de données. L'algorithme prend en entrée un jeu de données, dans le cas présent un ensemble d'entreprises associées à des critères qui forment les variables initialement corrélées, et en sortie il fournit un ensemble de variables décorrélées, appelées composantes principales. C'est sur ces composantes principales que les données initiales sont projetées. Une composante principale est en effet une combinaison linéaire des critères initiaux, les variables corrélées. On peut ordonner les composantes principales selon le poids des critères dans les combinaisons linéaires : la première composante principale fera ainsi apparaître les poids les plus élevés. En analysant les poids respectifs des critères dans la définition des composantes, on peut ainsi différencier des groupes caractérisés par des sous-ensembles de critères.

Pour réaliser les différentes analyses en composantes principales présentées ci-après, nous avons eu recours au langage MATLAB dans son environnement de développement, et en particulier à la fonction `pca` qui réalise l'implémentation de l'algorithme. Utilisée pour obtenir les projections des données sur les nouvelles variables décorrélées, cette fonction permet aussi de quantifier la qualité de la nouvelle projection. Pour cela, la fonction détermine la dispersion des données sur la nouvelle projection, c'est-à-dire qu'elle calcule l'inertie (ou la variabilité) de chaque composante principale à partir de leur variance. En comparant la part d'inertie de chaque composante principale, nous sommes en mesure de savoir lesquelles ont le plus d'influence sur la variabilité de la base de données initiale.

Trois ACP ont été mises en œuvre dans le but de préciser la définition des startups deeptech (ACP 1, section 1.2.2), leurs spécificités vis-à-vis de la phase de scale-up (ACP 2, section 2.2.2) et leurs différences par rapport à d'autres entreprises à caractère technologique en croissance (ACP 3, section 2.3.2). Pour chacune des ACP, nous présenterons la base de données sur laquelle nous nous appuyons pour définir les critères de chacune des analyses. Puis nous présenterons les résultats, en faisant apparaître les projections des critères initiaux sur les deux ou trois premières composantes principales. La pertinence des tracés choisis est déterminée à partir de la part d'inertie de chaque composante principale. Le code en langage MATLAB de chacune des ACP réalisées est fourni en annexe.

1.2.2. Illustrer l'émergence de solutions issues de la recherche technologique à partir des lauréats du concours i-Lab

Créé en 1999 par le ministère en charge de la Recherche, le concours i-Lab a vocation à soutenir le transfert de technologie de la recherche vers le monde économique. Ce sont près de 3600 lauréats qui ont déjà été primés et qui ont pu bénéficier d'un accompagnement et d'une aide financière. La subvention obtenue a pour but de soutenir les dépenses en recherche et développement de l'entreprise lauréate créée sur le territoire français. Si les entreprises ne sont pas sélectionnées selon l'obtention passée d'un financement public, les entreprises lauréates bénéficient d'un soutien public à leur développement. Pour éviter un biais dans les données, nous avons conservé les informations relatives au fait qu'une entreprise ait pu être précédemment lauréate de ce même concours (dans une autre catégorie). Par ailleurs, Bpifrance considère que les startups lauréates du concours i-Lab sont des startups deeptech, ce qui justifie que nous cherchons à caractériser les startups deeptech à partir des lauréats du concours i-Lab.

La base de données des lauréats i-Lab¹³ fait apparaître plusieurs informations relatives notamment aux secteurs d'application des solutions et à la région d'origine des entreprises. Ces informations constituent les critères de l'ACP présentés ci-après. Dans le but de traiter ces données pour réaliser une caractérisation de ces entreprises lauréates, nous réalisons une ACP. On aurait pu penser que cette seconde caractérisation issue d'une analyse quantitative servirait à renforcer la première caractérisation (présentée dans le Tableau 1), mais les données à disposition, malgré la qualité de la base, ne suffisent pas à étudier les phénomènes relatifs à la phase de croissance. La seconde caractérisation ainsi obtenue ne servira donc pas à confirmer ou à infirmer la première, mais sera utile pour affiner notre connaissance des startups deeptech et de leurs propriétés.

ACP 1 – Caractérisation des startups deeptech à partir des données du concours i-Lab

Préparation des données

La première étape de l'analyse consiste en la préparation des données. Nous avons commencé par effectuer des regroupements au niveau des domaines d'activités et des régions d'origine des entreprises considérées. Ces regroupements ont pour but de limiter les cas isolés sans pour autant les supprimer (il s'agit des cas où il y a trop peu d'entreprises dans une région ou dans un secteur donné).

Les deux tableaux suivants sont construits de la même manière : la première colonne correspond aux critères fournis initialement, la deuxième aux regroupements effectués par nos soins en vue de l'analyse et la troisième contient les abréviations des dénominations des regroupements qui apparaissent dans les légendes des figures de l'ACP. Les regroupements proposés constituent alors des critères pour l'ACP.

¹³ La base de données est publique et disponible sur le site du gouvernement : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/laureats-i-lab-concours-national-daide-a-la-creation-dentreprises-de-technologies-innovantes-1/>. Dans le cadre de cette étude, il s'agit de la version téléchargée le 22 décembre 2022.

Critères de l'ACP

L'analyse en composantes principales réalisée sur les données des lauréats i-Lab depuis 2010 dresse un premier portrait des startups deeptech. Nous ne conservons les données que des lauréats à partir de 2010 pour garantir la représentativité de l'échantillon en prenant compte de l'apparition tardive du concept de deeptech. Au total, ce sont 1078 entreprises lauréates i-Lab que nous avons analysées. Cela représente environ 80 lauréats par année, ce qui est proche de l'ordre de grandeur du nombre de startups deeptech créées par an en France sur cette période (compte-tenu des objectifs fixés par le plan Deeptech), renforçant la représentativité de l'échantillon. Les 19 critères sur lesquels l'analyse a été conduite sont les suivants, pour lesquels on précise entre parenthèses les abréviations respectives :

- la présence d'une dirigeante (**femme**)
- le type de candidature, le concours s'effectuant soit dans la catégorie « en émergence » pour les projets n'ayant pas toujours atteint l'étape de la création juridique de l'entreprise ou « création-développement » pour les entreprises créées (**creation_developpement**)
- le fait d'avoir obtenu un Grand Prix, destiné à des projets qui se sont démarqués (**prix**)
- le fait d'avoir déjà été lauréat par le passé, quelle que soit la catégorie du concours (**deja_laureat**)
- les 5 domaines d'activités regroupés et abrégés dans le Tableau 2
- les 6 regroupements régionaux déterminés à partir du nombre de lauréats et proposés dans le Tableau 3
- l'existence d'une unité ou d'une structure de recherche liées au projet (**lien_recherche**).

Tableau 2. Regroupements et abréviations utilisées dans les légendes des figures de l'ACP 1 pour les domaines d'activités des entreprises considérées

Domaines	Regroupements	Abréviations
<i>Biotechnologies et pharmacie Pharmacie, Sciences du vivant & Biotechnologies Technologies médicales Pharmacie & biotechnologies</i>	Santé et vivant	sante
<i>Chimie et matériaux Chimie & Sciences des matériaux Chimie & environnement</i>	Chimie	chimie
<i>Électronique, Signal & Télécommunications Électronique, traitement du signal & instrumentation</i>	Électronique	elec
<i>Génie des procédés Matériaux, mécanique & procédés industriels Mécanique & Travail des métaux</i>	Mécanique et matériaux	meca
<i>Services informatiques et autres Informatique, logiciel & TIC Numérique, technologies logicielles & communication</i>	Informatique et numérique	info

Tableau 3. Regroupements des régions d'origine des entreprises considérées selon le nombre de lauréats et abréviations utilisées dans les légendes des figures de l'ACP 1

<i>Régions</i>	<i>Critère de regroupement</i>	<i>Abréviations</i>
Corse Guadeloupe Guyane La Réunion Martinique Nouvelle-Calédonie Polynésie Française	Moins de 10 lauréats	COM
Bourgogne-Franche-Comté Centre-Val de Loire Normandie Pays de la Loire	Moins de 50 lauréats	BFC - CVL - PDL - NOR
Bretagne Hauts-de-France Nouvelle-Aquitaine	Moins de 70 lauréats	BRE - HDF - NAQ
Grand Est Provence-Alpes-Côte d'Azur	Moins de 100 lauréats	GES - PAC
Auvergne-Rhône-Alpes Occitanie	Moins de 200 lauréats	ARA - OCC
Île-de-France	Plus de 300 lauréats	IDF

On notera que le dernier critère est le seul qui soit commun avec la première caractérisation proposée dans le Tableau 1 (on peut le faire correspondre avec la caractéristique « Un écosystème interconnecté, en particulier avec le monde de la recherche »).

Résultats de l'ACP

Tout d'abord, pour qualifier la dispersion des données sur la projection réalisée avec les composantes principales, nous représentons la part d'inertie de chaque composante. La distinction entre les composantes principales ayant le plus d'influence sur la variabilité des données s'effectue en observant un coude sur le graphe obtenu. La Figure 2, qui représente ce graphe, ne permet pas de distinguer avec précision ce coude ; compte-tenu des différences de parts d'inertie entre les composantes, nous nous intéressons aux trois premières, dont les projections sont représentées ci-après. Il faut tout de même préciser que leurs influences restent limitées vis-à-vis des autres composantes (parts faibles).

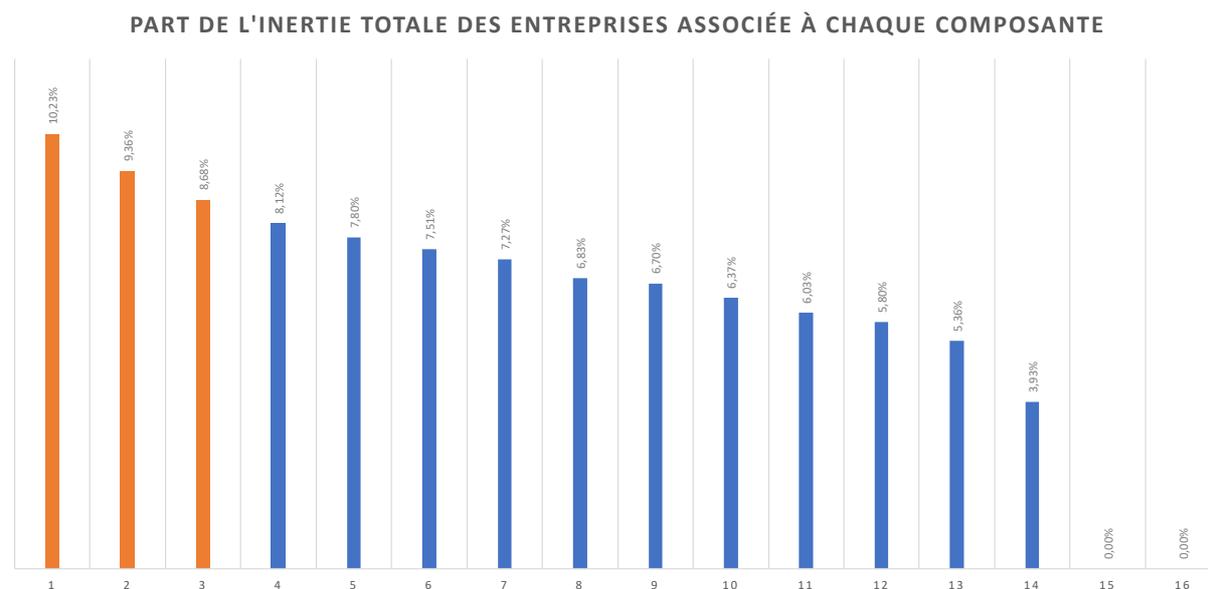


Figure 2. Observation de la part d'inertie de chaque composante et détermination des composantes à l'effet significatif (en orange)

Les

Figure 3, Figure 4 et Figure 5 correspondent au résultat de l'ACP présentée à partir des trois premières composantes principales. Les projections orthogonales des vecteurs représentant les critères de l'ACP sur chacun des axes (c'est-à-dire des composantes principales) correspondent aux poids respectifs des critères dans la détermination des composantes (c'est-à-dire les constantes des combinaisons linéaires associées).

La

Figure 3 fait ainsi apparaître que les secteurs de la santé et du numérique tendent à avoir des comportements contraires ; tandis que la catégorie « création-développement » du concours i-Lab et le fait d'avoir une dirigeante influent sur cette première composante dans le même sens que le secteur de la santé (axe des abscisses), alors que le lien avec des structures de recherche est plutôt corrélé avec le secteur du numérique. Au niveau de la deuxième composante (axe des ordonnées), la différenciation se fait par rapport aux régions d'origine, avec une opposition nette entre les entreprises issues d'Île-de-France, où les lauréats sont les plus nombreux et la majorité des autres régions. La différenciation des entreprises est donc très marquée au niveau des régions d'origine et des secteurs d'application. En considérant les éditions du concours, le poids de l'Île-de-France et de la santé semble s'accroître (les points représentant les éditions les plus récentes étant plus proches des deux axes).

En plus de conforter l'observation sur la première composante principale, la Figure 4 met en évidence les critères prépondérants pour la troisième composante principale. Ce sont les critères relatifs aux régions qui ont le plus de poids. On souligne alors la corrélation entre les lauréats en provenance d'Auvergne-Rhône-Alpes et d'Occitanie avec les applications dans le secteur de l'électronique (le lien est à faire avec l'industrie des semi-conducteurs autour de Grenoble et celle de l'aéronautique à Toulouse), ainsi qu'avec le fait d'obtenir un Grand Prix dans le cadre du concours. La Figure 5 permet de compléter les deux figures précédentes pour obtenir la vue

complète de la projection sur les trois composantes principales. Elle fait apparaître d'autant plus clairement le poids des régions dans la répartition des entreprises sur la projection.

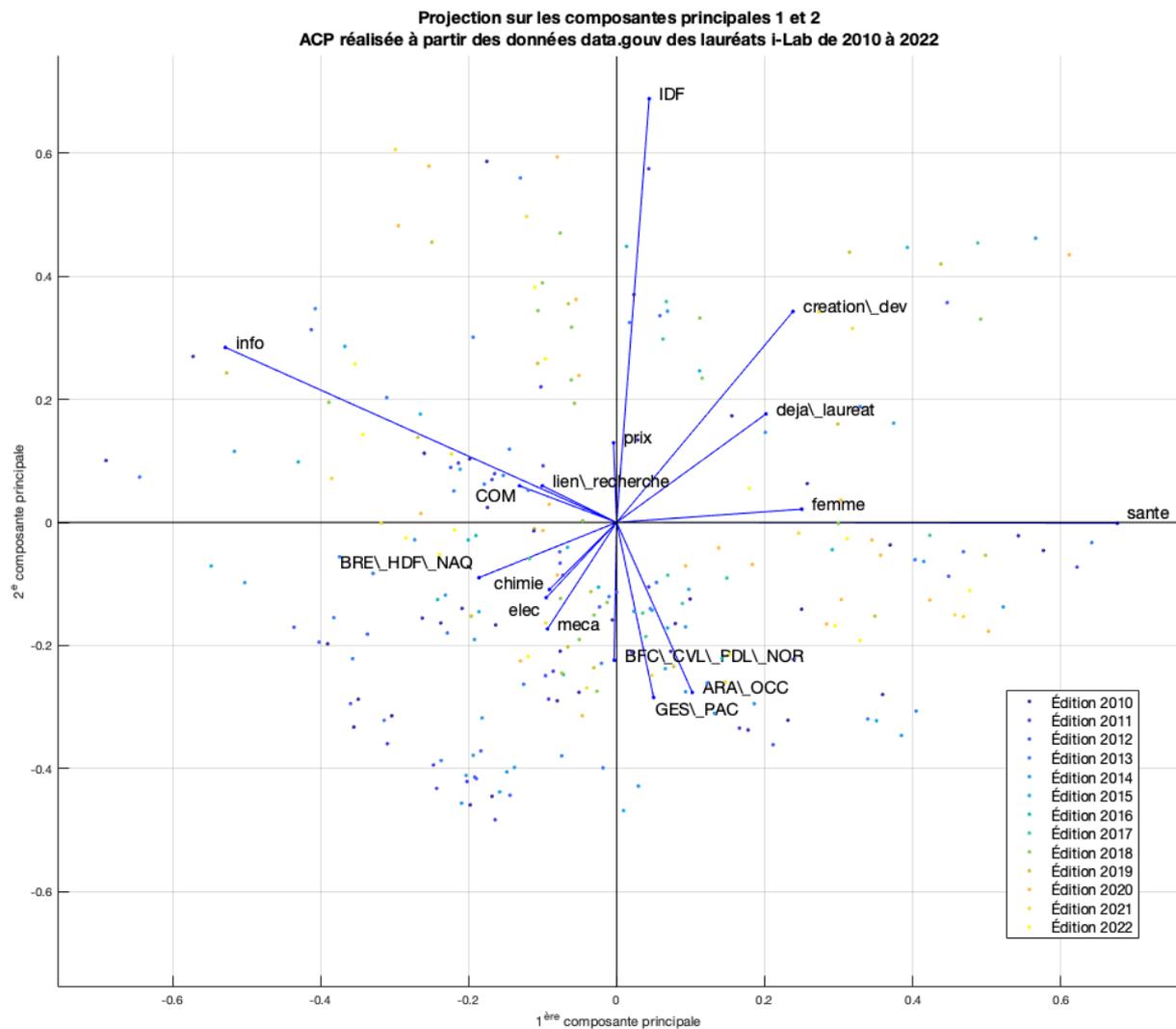


Figure 3. Projection des données de la base des lauréats du concours i-Lab entre 2010 et 2022 sur les composantes principales 1 et 2 déterminées par une ACP réalisée avec le logiciel MATLAB et visualisation du poids des critères sur ces composantes

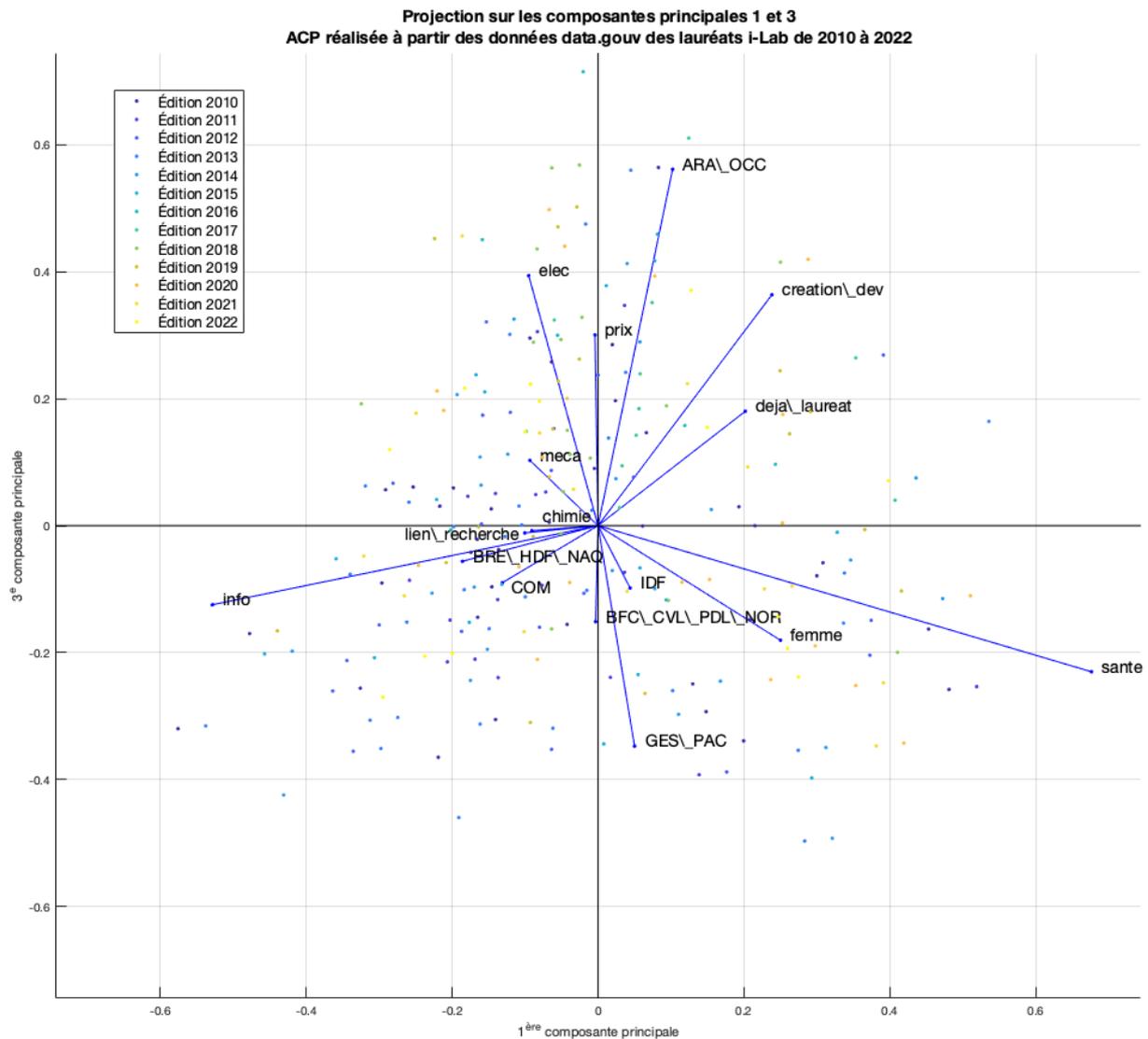


Figure 4. Projection des données de la base des lauréats du concours i-Lab entre 2010 et 2022 sur les composantes principales 1 et 3 déterminées par une ACP réalisée avec le logiciel MATLAB et visualisation du poids des critères sur ces composantes

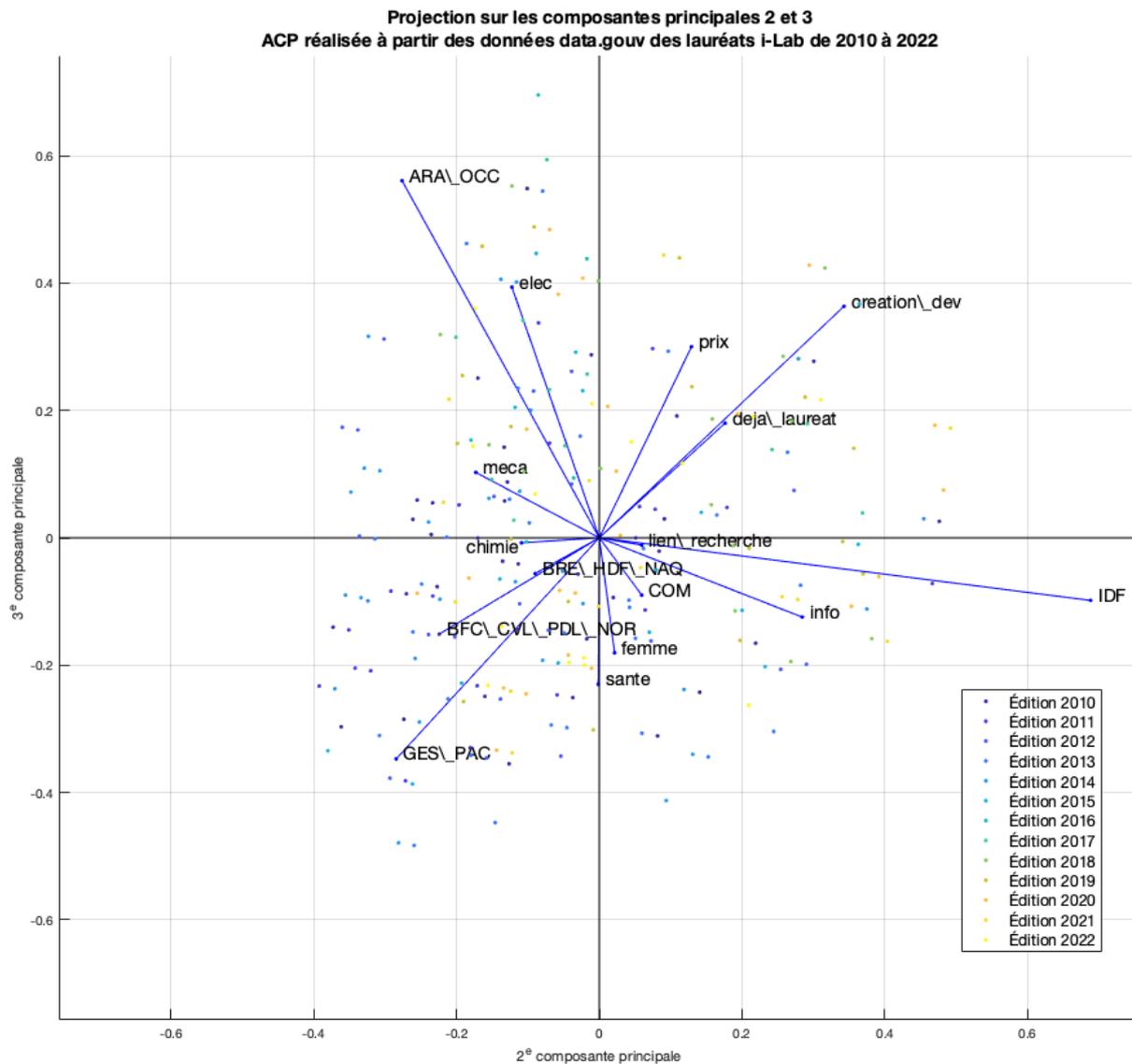


Figure 5. Projection des données de la base des lauréats du concours i-Lab entre 2010 et 2022 sur les composantes principales 2 et 3 déterminées par une ACP réalisée avec le logiciel MATLAB et visualisation du poids des critères sur ces composantes

1.2.3. L'insuffisance de l'analyse quantitative pour saisir les déterminants du passage à l'échelle

Comme présagé, la nature des données de la base des lauréats du concours i-Lab n'est pas en mesure d'enrichir la revue de la littérature ayant mis en exergue certaines difficultés de gestion relatives à une étape de croissance pour une startup deeptech. Notre intérêt pour la question du passage à l'échelle nous conduira dans la partie suivante à réaliser deux autres analyses quantitatives à partir des données de l'observatoire des startups deeptech et des programmes FT120 et Next40.

Nous retiendrons tout de même de cette première analyse en composantes principales que les entreprises lauréates du concours i-Lab, considérées comme des startups deeptech par Bpifrance, se caractérisent en premier lieu par leur secteur d'application (la santé ressortant largement en tête) et leur région d'origine (elles sont significativement plus nombreuses en Île-de-France). La prédominance du secteur de la santé n'est pas surprenante puisque les biotech et les medtech connaissent depuis longtemps des caractéristiques de développement proches des startups deeptech (les temps nécessaires à la réalisation des essais cliniques étant un bon exemple de la proximité des difficultés rencontrées).

Néanmoins, la répartition de l'influence des composantes principales sur la variabilité de notre échantillon ne permet pas de conclure sur la prédominance de quelques régions ou secteurs d'activités, mis à part l'Île-de-France et la santé ainsi que les régions Auvergne-Rhône-Alpes et Occitanie en lien avec l'électronique (on peut y voir l'industrie des semi-conducteurs très présente dans la région de Grenoble et l'influence de l'aéronautique du côté de Toulouse). Par conséquent, nous veillerons dans la suite à prendre en compte une acception large des startups deeptech sans restriction à un secteur particulier ou à une zone géographique et à considérer ces éléments lors du choix des startups faisant l'objet d'études de cas et présentées dans le chapitre 3.

2. Les interrogations multiples partagées par les acteurs du développement des startups deeptech face à l'énigme de leur passage à l'échelle

Le constat de la difficulté à comprendre comment les startups deeptech réussissent leur passage à l'échelle est partagé au sein de l'écosystème d'accompagnement, et en premier lieu par les acteurs publics. Ce sont les perspectives de résolution des défis mondiaux contemporains qui motivent ces acteurs à agir en faveur du développement des startups deeptech.

2.1. Face à des défis mondiaux, une dynamique commune

L'intérêt porté sur la deeptech est croissant, en témoignent les nombreuses études menées par des organisations indépendantes internationales. La Commission européenne et le Parlement européen ont par exemple soutenu le projet de plateforme *European Startups* développé pendant deux ans par les structures d'informations et d'analyse Dealroom et Sifted ; ces dernières mettent plus particulièrement en évidence dans un de leurs rapports le rôle de la puissance publique dans le déploiement des startups deeptech (Dealroom & Sifted, 2021). La banque mondiale s'est aussi

intéressée au sujet du financement des startups deeptech et a publié une note conjointe avec Bpifrance, dressant ainsi un panorama des acteurs du financement et de l'investissement selon les étapes de développement (Nedayvoda et al., 2021). En Inde, un rapport de l'association indienne axée sur les technologies, NASSCOM (*National Association of Software and Service Companies*), montre que le nombre de startups deeptech indiennes a connu un taux de croissance annuel moyen supérieur à 40 % entre 2017 et 2020 (NASSCOM, 2021). C'est surtout Israël qui fait figure de proue dans le monde de l'entrepreneuriat deeptech : l'écosystème israélien, qui comptait déjà 150 startups deeptech en 2020, est souvent pris comme un exemple d'intégration du transfert de technologie, des travaux de recherche et du financement, notamment au sein de l'université Technion (Nedayvoda et al., 2020).

Cette dynamique se mesure également à travers les multiples événements, de dimension mondiale, dédiés à l'écosystème deeptech qui ont vu le jour ces dernières années : le *Deeptech Summit*, de l'organisation singapourienne SGInnovate, existe depuis 2018 ; la présidence suédoise du Conseil de l'Union européenne accueille à Stockholm en juin 2023 une grande conférence sur l'entrepreneuriat deeptech, le financement de la croissance et la construction d'un marché européen ; en mars 2023 avait lieu la huitième édition du *Global Summit*, l'événement international de l'organisation Hello Tomorrow à destination des porteurs de projets d'innovations technologiques. En outre, la création de nouvelles formations spécifiques comme le programme *Deeptech Founders* à destination des chercheurs-entrepreneurs depuis 2018 ou le Mastère Spécialisé Entrepreneuriat Deeptech à Mines Paris lancé en 2018 (Denis-Rémis & Heully, 2020) est aussi un indice de cet engouement, partagé par le monde de la recherche et les industriels (en reconversion ou en tant que potentiels futurs clients de ces innovations).

Si toutes ces actions sont mises en œuvre, c'est aussi parce que les startups deeptech interrogent par leur complexité et d'autant plus lorsqu'il s'agit de passer d'une jeune entreprise innovante à une société solidement établie. Quand l'économiste Mariana Mazzucato fait l'éloge du rôle de l'Agence pour les projets de recherche avancée de défense (*Defense Advanced Research Projects Agency* ou DARPA) aux États-Unis dans l'émergence et le soutien aux entreprises technologiques, d'autres constatent le retard de l'Europe dans les financements des phases avancées du développement et appellent à une plus grande participation des gouvernements à cet effort (Aernoudt, 2017), en particulier en mobilisant les fonds dits *late stage* (Tibi, 2019).

2.2. En France, des moyens publics alloués au développement des startups deeptech en augmentation

2.2.1. Le renforcement du plan Deeptech

Depuis le lancement du plan Deeptech en janvier 2019, les moyens alloués au développement des startups deeptech n'ont cessé d'augmenter. L'accélération du plan Deeptech passe par un renforcement des actions existantes qu'il s'agisse des concours d'innovation (i-PhD, i-Lab, i-Nov) ou des différents dispositifs d'aide spécifiques aux startups deeptech (Aide au Développement Deeptech, Bourse French Tech Émergence (BFTE) déclinée avec la Bourse French Tech Lab pour les projets ante-crédation d'entreprise), mais également par un renforcement de notre

capacité à transformer les découvertes scientifiques en innovation (après la création des 13 SATT, l'État annonce la mise en place de 25 pôles universitaires d'innovation (PUI) dans le cadre du plan France 2030). Enfin, il s'agit également de renforcer la valorisation des travaux issus de la recherche ainsi que les programmes de recherche thématiques, à travers l'appel à projets Maturation/Prématuration en lien avec les stratégies nationales de valorisation de la recherche. En complément des actions de financement et de soutien à l'écosystème, un fonds dédié aux startups deeptech, doté de 100 millions d'euros est créé dans le but de combler les difficultés de financement dits *late stage*. C'est bien tous les niveaux de la chaîne de financement, des startups comme de l'écosystème, qui sont pris en compte dans les mesures de la puissance publique.

Le deuxième volet du plan Deeptech se concentre sur la croissance des startups deeptech créées. Le gouvernement s'est fixé l'objectif d'avoir 10 licornes à l'horizon 2030 et de créer 100 sites industriels par an. Plusieurs critères définissent une licorne, et en particulier le fait que l'entreprise existe depuis moins de 10 ans et qu'elle a été valorisée à plus d'un milliard de dollars avant son entrée en bourse. On en comptabilise début 2023 déjà 5 au sein des startups deeptech : Exotec, Ledger, OVHCloud, Owkin, et Shift Technology. Le Plan France 2030, à travers le Plan Startups et PME industrielles est venu renforcer les moyens dédiés aux phases avancées du développement en allouant 2,3 milliards au soutien à ces entreprises. Ces moyens financiers sont vus comme un levier pour réussir la réindustrialisation, fortement promue par le directeur général de Bpifrance lui-même (Dufourcq, 2022). Compte-tenu des moyens considérables déployés et de l'ambition des objectifs, l'enjeu de la compréhension des mécanismes de développement des startups deeptech est clef pour une utilisation pertinente des ressources fléchées au service de l'atteinte des objectifs.

2.2.2. La question des descripteurs du développement des startups deeptech soulevée par Bpifrance

En charge de l'opérationnalisation du plan Deeptech, la Direction Deeptech de Bpifrance s'interroge à de multiples égards. Les interrogations portent par exemple sur le rôle de l'écosystème dans le développement des startups. Qu'il s'agisse de l'écosystème d'accompagnement ou de financement, le rôle de la puissance publique est clef : dès lors, sur quels paramètres agir pour soutenir la croissance des startups deeptech ? De plus, face à l'importance des défis à relever et la promesse apportée par les solutions de rupture des startups deeptech, un des objectifs majeurs pour la puissance publique est de s'assurer que le potentiel d'innovation promis se développe et que les efforts en matière de recherche et de financement publics soient bien mis au service de ces défis. Outre les questions relatives à l'émergence des startups deeptech, il s'agit déjà de vérifier l'impact positif des moyens déployés par la puissance publique en déterminant si les startups deeptech qui en bénéficient sont dans une trajectoire de forte croissance ou si elles ne font que se maintenir dans un état stable. L'enjeu est de constituer une liste de descripteurs permettant de saisir la performance des startups deeptech, et plus particulièrement de mesurer la capacité à se développer en vue d'une industrialisation.

Nous nous appuyons pour cela sur les données de l'observatoire des startups deeptech à partir desquelles nous cherchons à caractériser leur passage à l'échelle. L'observatoire des startups

deeptech¹⁴ a été élaboré par Bpifrance dans le but de suivre l'évolution des indicateurs de développement des startups deeptech en France. Il a vocation à alimenter les réflexions menées par les acteurs de l'écosystème de la deeptech, en mettant en évidence la répartition des startups deeptech sur le territoire, l'origine des technologies développées, les montants des levées de fonds réalisées. Les données sont récupérées auprès des partenaires de la Direction Deeptech, qui sont les organismes de transfert de technologie (OTT), les universités, le réseau Bpifrance déployé sur le territoire, mais également à partir des bases de données déjà existantes (societe.com, infogreffe.fr, dealroom.co par exemple). En outre, la sélection dans certains dispositifs de financement de Bpifrance, spécifiquement à destination des startups deeptech, donne lieu à une intégration directe au sein de l'observatoire. Une part non négligeable des startups de l'observatoire sont donc clientes de Bpifrance et bénéficient d'un soutien financier public, sans que cela ne génère un biais trop important dans les données compte-tenu de la grande diversité des sources et plus largement du rôle de Bpifrance dans l'écosystème entrepreneurial français¹⁵. Ce sont plus de 2000 entreprises qui ont été recensées par l'observatoire depuis le lancement du plan Deeptech. À partir des données à disposition sur l'observatoire de Bpifrance, la deuxième ACP réalisée met en évidence les caractéristiques des startups deeptech et de leur phase de scale-up, décrite à travers les financements dont les startups bénéficient en vue de leur passage à l'échelle. Il faut par ailleurs préciser que les données de l'observatoire ne sont pas reliées aux caractéristiques des startups deeptech présentées dans le Tableau 1.

ACP 2 – Caractérisation des startups deeptech et de leur phase de scale-up à partir des données de l'observatoire de Bpifrance

Préparation des données

Compte-tenu de la diversité des données relatives aux domaines d'activités présentes dans l'observatoire, nous choisissons la sectorisation la plus simple à disposition, les startups étant réparties dans un ou plusieurs secteurs du Tableau 4 ci-après.

Critères de l'ACP

L'ACP est réalisée sur une base de données contenant 2330 startups deeptech, créées à partir de 2010. Les variables initiales de la base de données sont les suivantes (les abréviations sont indiquées entre parenthèses) :

- l'âge de l'entreprise (**age**)
- le nombre de collaborateurs (**nb_emploi**)
- le total des montants levés (**total_levees**)
- la présence de Bpifrance parmi les investisseurs (**is_Bpifrance_investor**)

¹⁴ Une version publique est consultable sur le site internet suivant : <https://observatoire.lesdeeptech.fr/intro>

¹⁵ Ce sont 40 % des PME et 60 % des ETI recensées par l'INSEE en 2019 qui ont obtenu un soutien de la part de Bpifrance, d'après le bilan d'impact des dix années d'existence de Bpifrance : <https://presse.bpifrance.fr/bpifrance-publie-un-rapport-évaluant-l'impact-des-10-premieres-annees-de-son-action-sur-leconomie-et-le-tissu-productif-francais-10-ans-d'impact-2013-2023/#:~:text=%2D%20En%2010%20ans%2C%20Bpifrance%20a,ont%20quasiment%20doublé%20depuis%202013.>

- si l'entreprise bénéficie d'un financement pour une phase de scale-up (*is_scale-up*)
- si l'entreprise a déjà été lauréate i-Lab (*is_i-Lab*)
- les domaines d'activités des entreprises, comme indiqué dans le Tableau 4 ci-dessous :

Tableau 4. Abréviations utilisées dans les légendes des figures de l'ACP 2 pour les domaines d'activités des entreprises considérées

<i>Secteurs</i>	<i>Abréviations</i>
<i>Agritech et Foodtech</i>	agri
<i>Autres</i>	autres
<i>Biotech, Medtech et e-santé</i>	sante
<i>Énergie et Greentech</i>	ener
<i>Industrie 4.0 : Robotique et Internet of Things</i>	robot
<i>Numérique : Intelligence Artificielle et ordinateur quantique</i>	num

Résultats de l'ACP

Dans le but de ne représenter que les projections les plus utiles à la description de l'échantillon, nous commençons par visualiser la part des composantes principales dans la variabilité, donnée par la Figure 6.

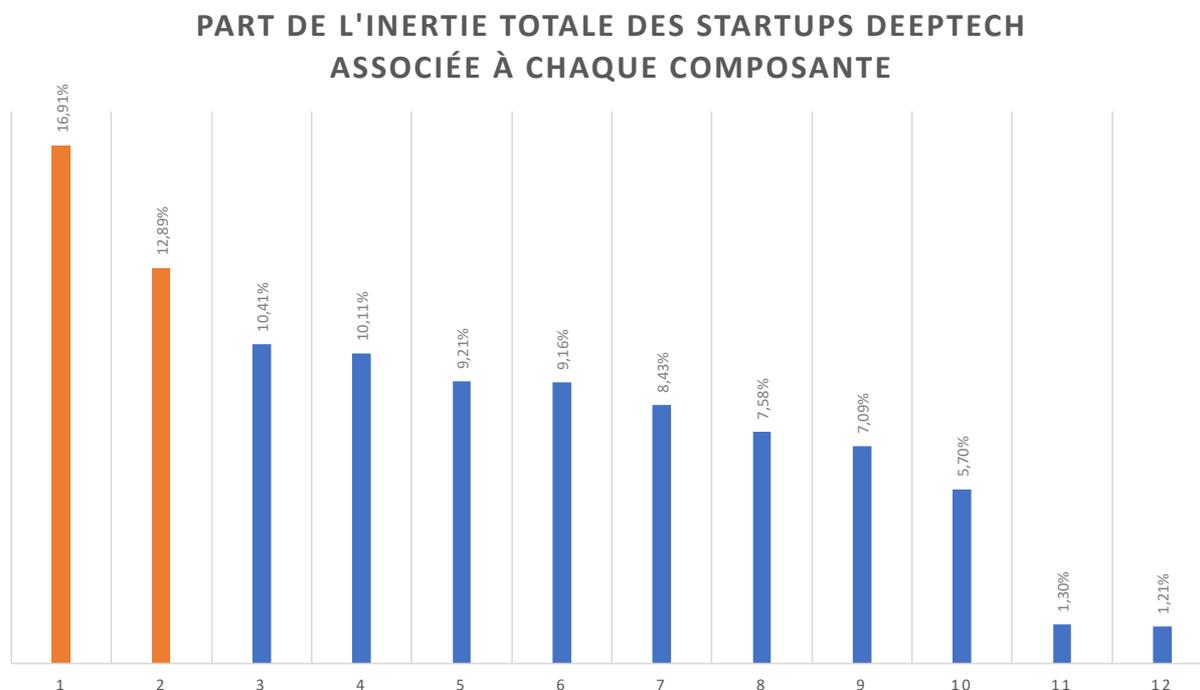


Figure 6. Observation de la part d'inertie de chaque composante et détermination des composantes à l'effet significatif (en orange)

Ainsi, la projection des données sur les deux premières composantes principales suffira à mettre en évidence les critères à l'influence la plus forte sur l'échantillon constitué par les données de l'observatoire des startups deeptech. Cette projection est représentée dans la Figure 7. On notera qu'en plus des critères listés précédemment, les années de création sont aussi indiquées en couleur, selon ce qui est précisé dans la légende de la figure. Cette précision permet d'observer le positionnement des entreprises selon leur âge vis-à-vis des nouveaux axes définis par les composantes principales. Sans surprise, plus les années de création sont lointaines, plus la startup a des chances d'être en phase de scale-up.

Sur cette projection en deux dimensions, les critères ayant les normes les plus élevées sont, dans l'ordre : le secteur de la santé, le nombre de collaborateurs, les autres secteurs, la phase de scale-up (déterminée à partir d'un financement obtenu dans ce but). Il est utile de noter plus particulièrement la polarisation de la première composante principale sur les aspects relatifs à la phase de scale-up, puisque l'on retrouve les descripteurs classiques en tête des critères ayant le plus de poids (le nombre de collaborateurs, le financement de la phase de scale-up, mais également la présence de Bpifrance comme investisseur, l'âge et le montant total des levées). La présence du critère relatif à Bpifrance est déjà un marqueur du rôle des financements publics dans cette phase importante. La deuxième composante principale est plus influencée par les questions sectorielles (santé, autres, numérique). Les corrélations qui apparaissent dans ce résultat ne permettent pas de relier le domaine d'activités des startups deeptech à un potentiel plus grand d'atteindre la phase de scale-up. Ce résultat va dans le sens de la première ACP et nous invite à construire un échantillon pour notre étude ultérieure à partir de startups ayant des domaines d'activités variés.

Nous retiendrons de cette deuxième analyse en composantes principales que les données de l'observatoire des startups deeptech sont en mesure de différencier les entreprises en scale-up vis-à-vis des autres, selon les critères classiques de définition du scale-up (en particulier les outils de financement de cette phase et le nombre de collaborateurs). On note également une corrélation entre les financements obtenus pour le scale-up et les descripteurs classiques de cette phase, à savoir le nombre de collaborateurs, les montants des levées de fonds et l'âge des startups. Néanmoins, si ces descripteurs caractérisent la phase de scale-up, ils ne fournissent pas d'indication sur le succès de cette étape et encore moins sur les difficultés à relever durant cette étape. Par exemple, l'augmentation du nombre de collaborateurs ne dit rien sur les postes-clés créés ou renforcés pendant cette phase. Ainsi, ces données ne permettent pas de conclure quant à la réussite de la phase de scale-up. Nous chercherons dans la suite à comprendre les difficultés du passage à l'échelle pour définir des descripteurs adaptés.

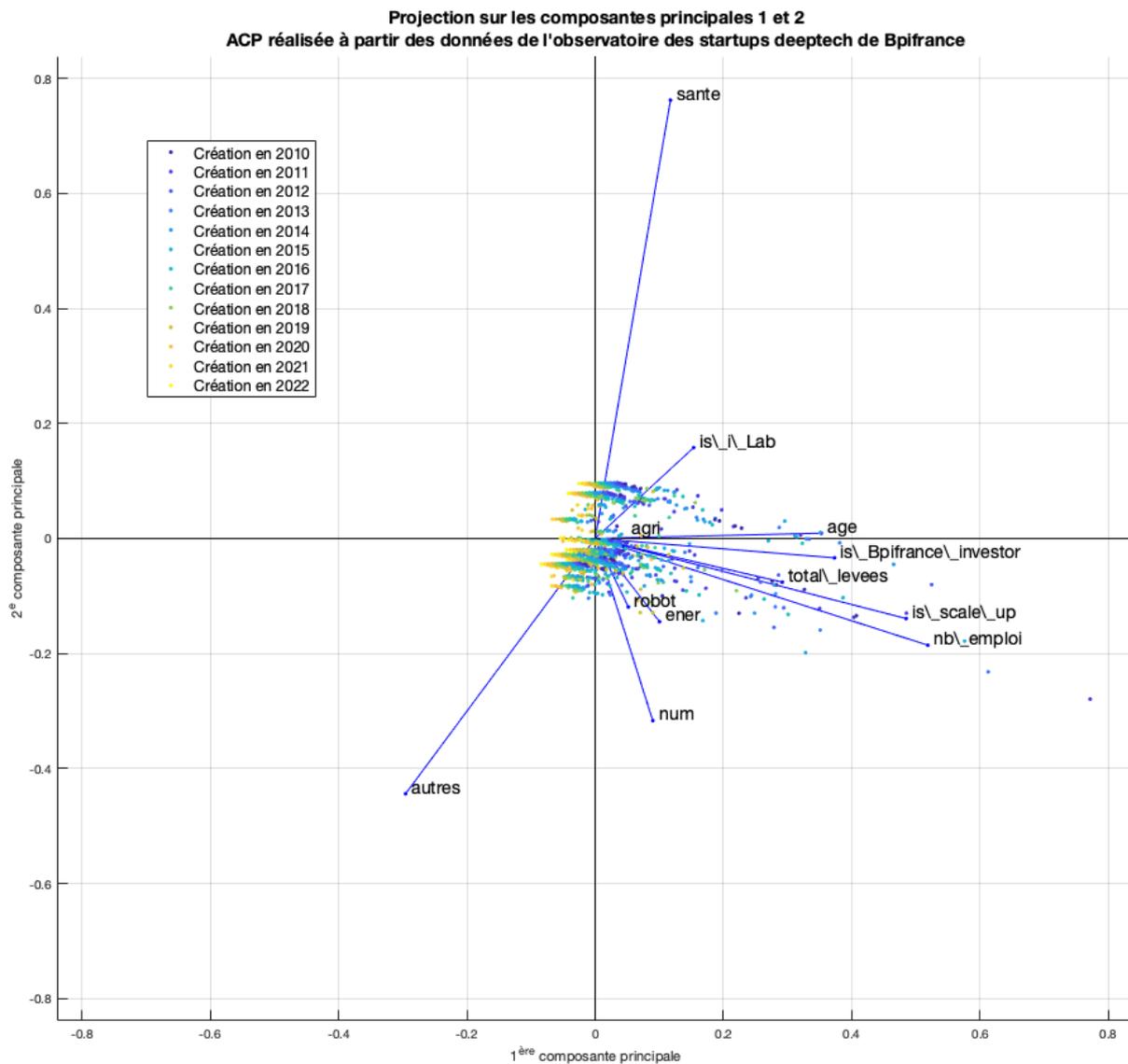


Figure 7. Projection des données de la base de l'observatoire des startups deeptech de Bpifrance sur les composantes principales 1 et 2 déterminées par une ACP réalisée avec le logiciel MATLAB et visualisation du poids des critères sur ces composantes

2.3. L'enjeu de la croissance au cœur des programmes portés par l'État

Plusieurs dispositifs et programmes ont été lancés et promus par l'État au cours des deux dernières décennies. Le plan Deeptech, évoqué dans la section précédente, est une bonne illustration des leviers mis en place par l'État pour favoriser la réussite des startups deeptech. Ces dernières bénéficient d'un large éventail de produits de financement ainsi que de plusieurs fonds d'investissement pour leur faire passer avec succès la phase de scale-up. Les moyens alloués sont considérables et la puissance publique maintient simultanément d'autres formes d'aides au développement.

2.3.1. Le bilan contrasté du concours i-Lab

Le concours i-Lab, pionnier dans les opérations conduites, fournit à présent un label reconnu et dont les montants de subvention versés peuvent aller jusqu'à 600 000 €. Une synthèse à partir d'une enquête réalisée par Bpifrance auprès des lauréats depuis la création du concours révèle en 2018 plusieurs caractéristiques du profil des lauréats et de leur devenir¹⁶. La représentativité de l'échantillon des répondants ayant été jugée satisfaisante par les responsables de l'enquête, trois résultats nous semblent importants à mettre en évidence :

- le taux de pérennité des lauréats est significativement élevé lorsque l'on le compare au taux moyen des entreprises ;
- en revanche, l'effectif moyen n'est pas très élevé et il faut au moins attendre 5 ans d'existence pour y voir une augmentation ;
- la croissance semble se réaliser sur le temps long puisque l'on observe une intensification du chiffre d'affaires au-delà de 8 ans d'existence, tandis que le chiffre d'affaires moyen est d'un million d'euros.

On peut dès lors y voir une capacité certaine à faire émerger et à soutenir des jeunes entreprises innovantes ainsi qu'à les maintenir dans des états de développement assez précoces. Cela nous laisse penser que les mécanismes pour réaliser le déploiement des technologies de rupture sont encore mal compris : des moyens considérables sont déployés sans pour autant assurer une croissance pérenne des lauréats. Les résultats de cette enquête, bien qu'encourageants, restent insuffisants pour permettre de comprendre le passage à l'échelle.

2.3.2. Des startups deeptech en forte croissance au sein des programmes FT120 et Next40

Face au constat de la difficulté à saisir la phase de scale-up, corroboré par le rapport Tibi (2019), la puissance publique a déployé de nouveaux leviers : les programmes French Tech 120 (FT120) et Next40, lancés en 2020, labellisent des startups ayant un potentiel de croissance, autrement dit « en capacité de devenir des leaders technologiques de rang mondial »¹⁷. Ce sont au total 120 entreprises qui intègrent le FT120 dont 40 d'entre elles le Next40. Les entreprises sélectionnées sont ensuite accompagnées par la Mission French Tech, qui fournit entre autres un

¹⁶ La synthèse de l'enquête est disponible ci-après : <https://www.bpifrance.fr/nos-actualites/le-concours-i-lab-20-ans-dinnovation>.

¹⁷ <https://www.economie.gouv.fr/starts-ups-promotion-2022-french-tech-next40120#>

point de contact privilégié pour les aider dans leur développement ainsi que des relais dans différentes structures publiques. On compte dans leur rang quelques startups deeptech.

Les programmes FT120 et Next40 portés par la Mission French Tech soulignent à la fois l'intérêt de la puissance publique dans l'émergence de jeunes entreprises innovantes au service de la résolution des grands défis, mais ils témoignent aussi de la difficulté à assurer un développement pérenne aux entreprises à forte dimension technologique : la faible proportion des startups deeptech¹⁸ au regard des grands défis qu'elles considèrent ainsi que la très forte proportion de solutions web ou logicielles dans les startups du Next40¹⁹ sont déjà des indices quant aux obstacles du passage à l'échelle de technologies de rupture *a fortiori hardware*.

Le Tableau 5 suivant illustre, pour l'ensemble de la promotion 2022, la part des startups deeptech dans les programmes FT120 et Next40 ainsi que leurs âges moyens. On notera que les startups deeptech sont d'ailleurs plus jeunes, ce qui laisse à penser qu'elles ont besoin de moyens financiers plus importants un peu plus en amont dans leur développement (les situations où les startups deeptech réalisant des chiffres d'affaires considérables au début de leur développement étant rares).

Tableau 5. Part des startups deeptech dans les programmes FT120 et Next40 de la promotion 2022 et comparaison de l'âge moyen des startups deeptech avec l'ensemble

	Nombre de startups deeptech	Âge moyen
Next40	9	7,56 ans
<i>Comparaison avec l'ensemble</i>	23 %	9,58 ans
FT120	22	8,32 ans
<i>Comparaison avec l'ensemble</i>	18 %	9,01 ans

Pour intégrer ces programmes, les entreprises doivent répondre à plusieurs critères récapitulés par la Figure 8. Les entreprises sont sélectionnées avant tout sur leur capacité à générer du chiffre d'affaires ou à lever des fonds, qui sont aussi des indicateurs classiques pour qualifier la phase de scale-up comme cela sera détaillé dans le chapitre 2. Depuis 2020, les évolutions des critères d'éligibilité ont été limitées. On notera tout de même que la promotion 2023 est la première à intégrer des engagements sociaux et environnementaux.

Il est aussi important de remarquer l'existence d'un critère régional induisant un biais puisque la Mission French Tech cherche aussi à sélectionner des entreprises réparties sur l'ensemble du territoire. Pour s'en émanciper, on ne gardera qu'un unique critère dans l'analyse proposée ci-après pour indiquer les entreprises basées en Île-de-France, qui sont très largement majoritaires (82 sur 120).

¹⁸ Sur les quatre premières promotions, les startups deeptech représentent environ 20 % des entreprises sélectionnées (à partir de la liste des startups de l'observatoire de Bpifrance).

¹⁹ Sur les promotions 2020 et 2021 du Next40, plus de 90 % des entreprises du programme proposent des solutions web ou logicielles.

Ces programmes étant dédiés à de jeunes entreprises innovantes, qu'elles soient ou non deeptech, nous avons recours à la base de données des entreprises de la promotion 2022 du FT120 et du Next40 pour tenter de différencier les startups deeptech des entreprises innovantes par rapport à la question de la croissance. Il s'agit de faire le lien entre le critère deeptech et les critères classiques de définition de la croissance, pour cela nous avons de nouveau recours à une ACP.

Critères d'éligibilité du programme French Tech Next40/120



	FRENCH TECH 120		
	Next40	Sélection sur critère de levée de fonds (40 places)	Sélection sur critère de chiffre d'affaires (40 places)
Critères communs obligatoires	Premier exercice fiscal clôturé à partir de 2000 Siège social en France Entreprise innovante* Entreprise indépendante (pas de rachat, ni d'introduction en bourse)		
Critère régional	Les deux meilleures startups, une en matière de levée fonds et une en matière d'hyper-croissance, de chaque région (Outre-mer inclus) seront automatiquement sélectionnées		
Critères de sélection automatique (critères non obligatoires mais si l'un d'eux est validé, l'admission est automatique)	Licorne (valorisation de l'entreprise > 1 Md\$) OU Une levée au cours des 3 dernières années ≥ 100M€ (part primaire)		
Critères quantitatifs (critères minimum à respecter et ensuite sélection sur la base d'un classement)	Levées de fonds parmi les plus importantes de ces trois dernières années ET Chiffre d'affaires ≥ 5M€ pour le dernier exercice clos, avec une croissance moyenne* d'au moins 30% sur les 3 derniers exercices fiscaux clôturés	Une levée de fonds dans les trois dernières années d'au moins 20 M€, en equity (part primaire uniquement)	Chiffre d'affaires ≥ 5M€ pour le dernier exercice clos ET • CA ≥ 10 M€ : croissance moyenne* du chiffre d'affaires ≥ 25% (tolérance à 20%) sur les 3 derniers exercices fiscaux clôturés • CA entre 5 et 10 M€ : croissance moyenne* du chiffre d'affaires ≥ 50% (tolérance à 40%) sur les 3 derniers exercices fiscaux clôturés

* Pour être considérée comme entreprise innovante, il faut remplir l'un des critères suivants :
- avoir le statut JEI (Jeune Entreprise Innovante)
- avoir bénéficié d'un financement public à l'innovation, notamment de Bpifrance, au cours des 5 dernières années
- être soutenue par un VC français ou étranger
- être accompagnée au cours des 5 dernières années par une structure d'accompagnement dédiée aux entreprises innovantes
- faire partie de la promotion actuelle du French Tech Next40/120

* La croissance moyenne sera calculée en prenant la croissance de 2018 à 2019, puis de 2019 à 2020, et enfin en faisant la moyenne des deux croissances.

Figure 8. Critères d'éligibilité des programmes FT120 et Next40 pour la promotion 2022

Source : <https://lafrenchtech.com/fr/la-france-aide-les-startup/french-tech-120-2/?cn-reloaded=1>

ACP 3 – Différenciation des startups deeptech et des entreprises innovantes à partir des données des programmes FT120 et Next40 de la promotion 2022

Les données des programmes FT120 et Next40 ont été récupérées sur le site Dealroom²⁰ et ont été croisées avec les données de l'observatoire des startups deeptech de Bpifrance²¹ pour intégrer le critère deeptech. Nous effectuons une nouvelle ACP dans le but de différencier les startups deeptech des autres entreprises sélectionnées par ces programmes.

²⁰ La base de données complète est accessible sous réserve d'un compte : <https://app.dealroom.co/lists/26121>.

²¹ Dans une version interne d'août 2022.

Préparation des données

Afin de limiter le biais du critère régional dans la sélection au programme sans réduire la taille de la base de données, la seule région conservée dans les critères de l'ACP est l'Île-de-France. En outre, pour les entreprises présentes à l'international, leurs données de localisation à l'étranger étant plus fournies, nous en faisons apparaître certaines et nous regroupons sous la dénomination « autres » les cas où les entreprises sont localisées au Canada, aux Pays-Bas ou en Turquie (ces trois localités étant les plus représentées après celles déjà précisées).

Par ailleurs, nous complétons manuellement la base de données en introduisant la situation en 2021 de chaque entreprise de la promotion 2022, à savoir : ayant déjà été dans le programme FT120 auparavant et en particulier en 2021, ayant été dans le programme Next40 en 2021 ou n'ayant jamais participé au programme dans le passé.

Critères de l'ACP

Pour caractériser les 120 entreprises sélectionnées dans la promotion 2022 du programme FT120, 23 critères ont été retenus (les abréviations étant précisées entre parenthèses) :

- la présence dans le programme Next40 en 2022 (**Next40**)
- la situation de l'entreprise en 2021 : alumni du FT120 (**FT120_Alumni**), sélectionnée dans le FT120 et qui ne sont pas dans le Next40 (**FT120_2021**), sélectionnée dans le Next40 (**Next40_2021**), en dehors du programme (**Hors_programme**) ; on notera que l'on a choisi de décorrélérer les critères relatifs à l'appartenance au FT120 et au Next40 pour la promotion 2021
- le fait d'être membre de l'observatoire des startups deeptech de Bpifrance (**deeptech**)
- la typologie de modèle d'affaires : les clients sont des entreprises (**B2B**) ou les clients peuvent être des entreprises ou des particuliers (**B2B&B2C**)
- l'âge de l'entreprise (**age**)
- la présence de l'entreprise dans une région étrangère (**Allemagne, Angleterre, Espagne, Italie, Etats-Unis, Asie, Israel, Autres**)
- l'étape de croissance : en germe (**seed**), début de croissance (**Early_GS**), croissance avancée (**Late_GS**)
- le nombre de tours de levées de fonds réalisés (**Nombre_tours**)
- le montant total des levées réalisées (**Total_fonds_leves**)
- la localisation du siège social en Île-de-France (**IDF**).

Résultats de l'ACP

C'est la première composante principale qui explique de façon très significative la variabilité de notre échantillon de données, comme cela peut être observé sur la Figure 9. Compte-tenu de cette forte influence, la composition détaillée de la combinaison linéaire des critères la définissant revêt un intérêt. Elle est ainsi présentée dans le Tableau 6.

PART DE L'INERTIE TOTALE DES ENTREPRISES DU FT120 ASSOCIÉE À CHAQUE COMPOSANTE

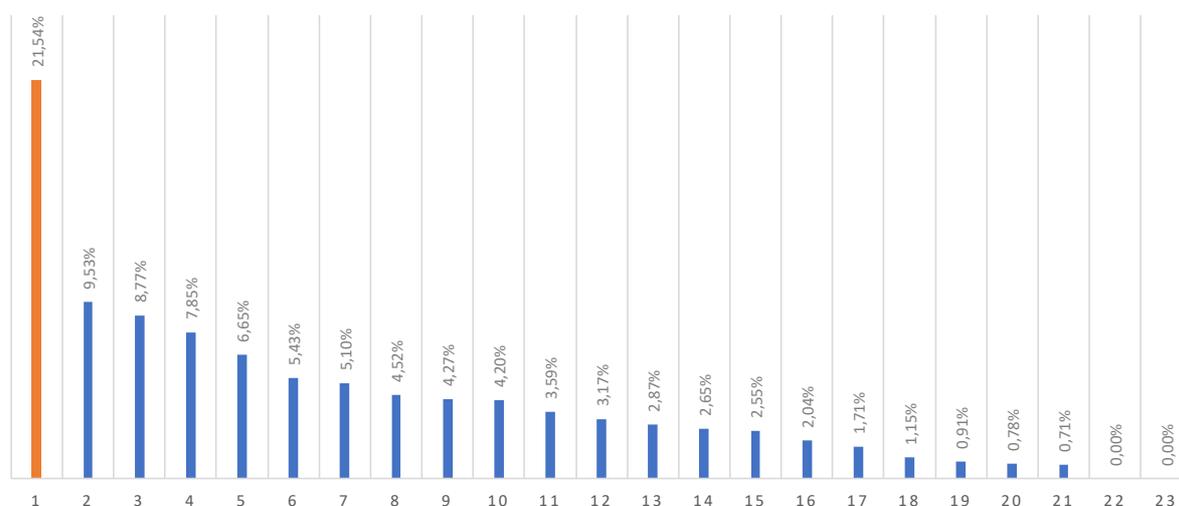


Figure 9. Observation de la part d'inertie de chaque composante et détermination des composantes à l'effet significatif (en orange)

Tableau 6. Ordre des critères et normes associées pour la première composante principale

Critères	Explicitation	Normes
Total_fonds_leves	Montant total des levées de fonds	0,344
Nombre_tours	Nombre de tours réalisés	0,325
Next40	Membre de la promotion 2022 du Next40	0,320
Next40_2021	Membre de la promotion 2021 du Next40	0,310
Angleterre	Entreprise avec une présence en Angleterre	0,291
Asie	Entreprise avec une présence en Asie	0,269
Allemagne	Entreprise avec une présence en Allemagne	0,269
Espagne	Entreprise avec une présence en Espagne	0,260
Etats Unis	Entreprise avec une présence aux États-Unis	0,256
Autres	Entreprise avec une présence au Canada, aux Pays-Bas ou en Turquie	0,173
IDF	Siège social basé en Île-de-France	0,172
Late_GS	Étape de croissance : late	0,171
Early_GS	Étape de croissance : early	0,161
Israel	Entreprise avec une présence en Israël	0,153
FT120_2021	Membre de la promotion 2021 du FT120	0,151
Hors_programme	Non membre des programmes en 2021	0,144
Italie	Entreprise avec une présence en Italie	0,130
age	Âge de l'entreprise	0,109
Seed	Étape de croissance : seed	0,053
deeptech	Membre de l'observatoire des startups deeptech	0,043
B2B_B2C	Type de modèle d'affaires : B2B & B2C	0,018
FT120_Alumni	Membre de la promotion 2021 du FT120	0,015
B2B	Type de modèle d'affaires : B2B	0,008

Si le nombre de startups deeptech est trop faible dans les programmes FT120 et Next40 pour faire ressortir ce critère dans le cadre de l'ACP, il faut noter que l'on retrouve assez précisément le cahier des charges des programmes comme critères aux poids significatifs dans la définition de cette première composante principale. L'internationalisation des marchés, représentée par les localisations géographiques, est également une preuve de la forte croissance que connaissent les entreprises sélectionnées dans les programmes.

Pour la deuxième composante principale, les normes les plus élevées sont relatives aux critères définissant des étapes de croissance (*late growth stage* et *early growth stage*). Malgré la faible part de cette deuxième composante dans l'inertie des données, on note le rôle du facteur de croissance. Cela n'est en rien surprenant puisque les entreprises sont sélectionnées sur ce critère. Il peut être également souligné le poids du critère deeptech sur la troisième composante principale (le critère deeptech étant largement le plus fort), alors même que le nombre de startups deeptech dans les programmes n'est pas significatif. La projection des données sur les trois principales composantes est donnée dans les Figure 10 et Figure 11 ci-après. Par rapport à la première composante principale, le critère deeptech est corrélé dans le même sens que les critères indiquant une croissance importante (levées de fonds et expansion à l'international). On retrouve deux des caractéristiques mises en évidence par la revue de la littérature, à savoir un investissement en capital important et l'internationalisation du marché (cf. le Tableau 1 de la section 1.1.4). C'est plus particulièrement au niveau de la troisième composante principale que le critère deeptech est le plus marqué. Néanmoins, la part d'inertie de cette composante principale reste trop faible pour considérer qu'il induit une différenciation entre des profils de startups, si ce n'est entre les entreprises présentes dans des pays extra-européens qui auraient une tendance plus importante à être des startups deeptech et celles présentes dans des pays européens qui n'en seraient pas.

La composante principale portant le critère deeptech n'a pas un poids suffisant pour conclure que ce critère est différenciant au niveau de la base de données des startups des programmes du FT120 et du Next40 ; ce qui nous amène à penser que les critères choisis pour réaliser l'analyse ne sont pas adaptés aux spécificités des startups deeptech. Nous retenons tout de même de cette dernière analyse que les startups deeptech sélectionnées par les programmes FT120 et Next40 présentent des trajectoires de croissance marquées selon les descripteurs classiques de la croissance, tels qu'utilisés pour définir les critères d'éligibilité des programmes. Malheureusement, les données à disposition ne permettent pas de décrire les trajectoires de croissance en termes de nombre d'emplois créés, de création de partenariats ou de capacités de production mises en place, et encore moins vis-à-vis des capacités d'innovation relatives au développement de la R&D et à la réponse aux grands défis contemporains. Pourtant, le financement de la phase de scale-up, à laquelle des startups deeptech accèdent et pour laquelle elles peuvent exceller, ne bénéficie pas qu'à la seule structuration de l'entreprise pour faire face à un changement d'échelle mais bel et bien aussi à la R&D.

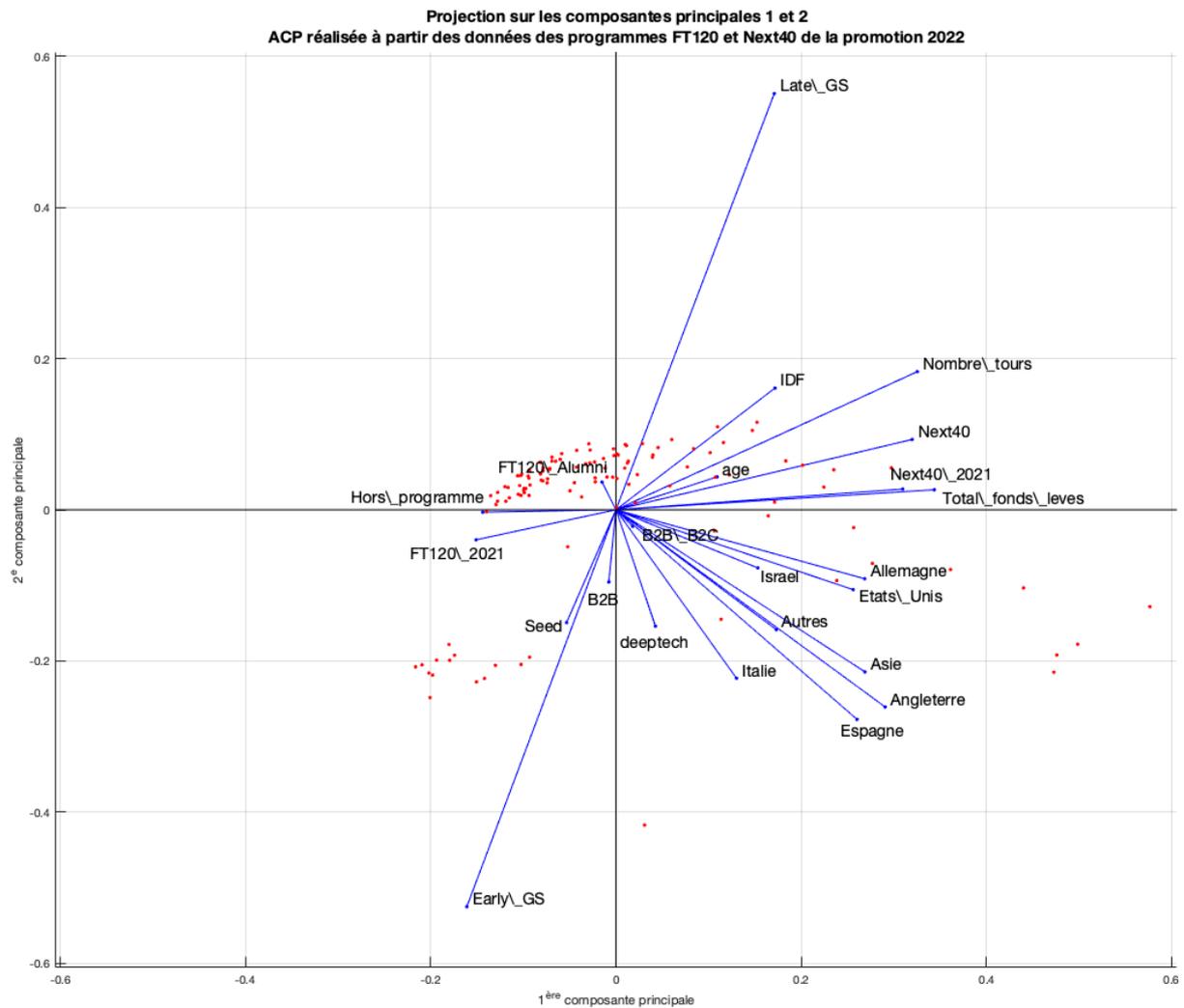


Figure 10. Projection des données de la base des programmes FT120 et Next40 (2022) sur les composantes principales 1 et 2 déterminées par une ACP réalisée avec le logiciel MATLAB et visualisation du poids des critères sur ces composantes

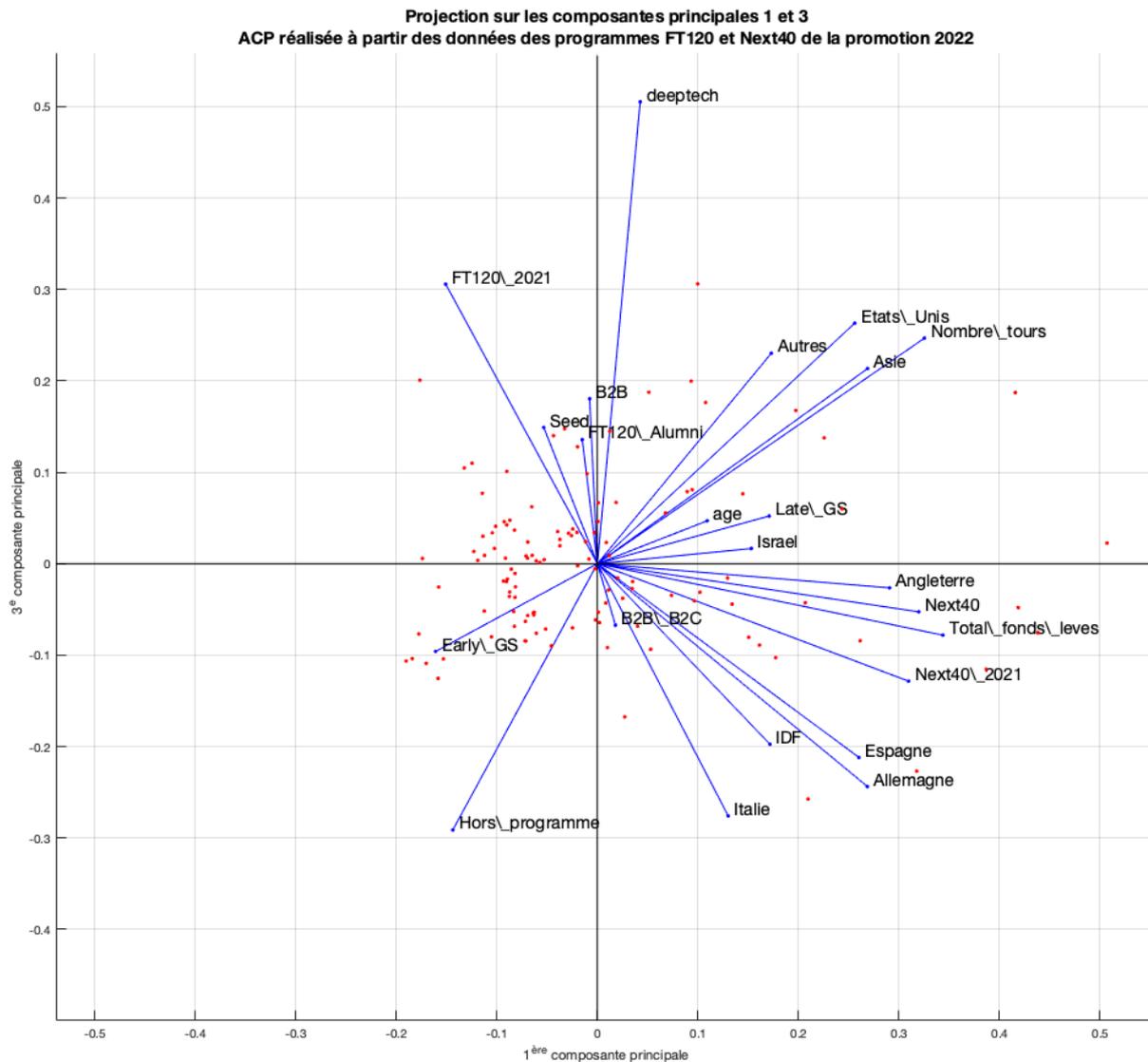


Figure 11. Projection des données de la base des programmes FT120 et Next40 (2022) sur les composantes principales 1 et 3 déterminées par une ACP réalisée avec le logiciel MATLAB et visualisation du poids des critères sur ces composantes

2.3.3. Un soutien financier simultané au scale-up et à la R&D

La littérature en entrepreneuriat met en exergue l'existence d'un champ d'étude sur les entreprises technologiques, présentant quelques caractéristiques communes aux startups deeptech, comme détaillé précédemment dans la section 1.1.3. Les leviers de croissance mis en évidence restent proches de ceux connus et utilisés pour les entreprises non-technologiques, alors que les problématiques du financement des nouvelles technologies font apparaître les difficultés inhérentes à l'innovation. Les politiques publiques s'intéressent tout particulièrement à la question de la croissance des entreprises innovantes, qui nécessitent des financements considérables.

Dans une étude des défis rencontrés par les politiques publiques pour le financement du scale-up, Duruflé et al. (2017) mettent d'ailleurs en garde contre la confusion entre le financement des jeunes entreprises innovantes connaissant une forte croissance, qu'il faut différencier des PME établies, et le financement de la R&D, dont les outils sont destinés à un ensemble plus large d'entreprises, dont les grands groupes font partie. Ils poursuivent le propos en expliquant que le financement du scale-up ne devrait être dédié qu'à la gestion de la croissance à travers la structuration de l'organisation pour atteindre de nouveaux marchés, réaliser des partenariats et consolider le réseau, cette phase étant bien différente de celle de lancement qui la précède. Les auteurs ne précisent pas par ailleurs si leurs résultats portent sur des startups avec une dimension particulièrement technologique, sans toutefois les exclure ; la caractéristique principale étant le potentiel de forte croissance. Si le risque de confusion entre le financement du scale-up et de la R&D existe, on peut aussi y déceler l'attrait des startups technologiques pour les financements de la R&D lorsqu'elles déploient des programmes de R&D ambitieux, qu'elles se trouvent ou non en phase de scale-up. L'effort de R&D apparaît dès lors comme continu et conjoint à l'effort de structuration.

À ce stade, il est intéressant de relever que les effets des subventions relatives aux efforts de R&D sur les entreprises innovantes en phase de scale-up ont été étudiés par Testa et al. (2019). Leurs travaux soulignent d'une part les bénéfices résultant des subventions pour la R&D à destination des entreprises technologiques en scale-up, même si les résultats sur l'emploi et les ventes en particulier apparaissent à moyen terme (au-delà de deux années après la réception de la subvention). D'autre part, l'obtention de ces subventions destinées à la R&D sont aussi des signaux positifs à destination des acteurs du capital-risque, plus enclin alors à investir durant cette étape de scale-up. En outre, les auteurs concluent sur l'intérêt des financements fléchés vers des objectifs technologiques pour les porteurs d'innovations de rupture lorsqu'il s'agit de croître.

Si l'on s'intéresse plus en détails aux solutions de financement proposées par Bpifrance à destination des startups deeptech, on remarque qu'elles répondent au double besoin de financement conjoint de la structuration de la phase de scale-up et de la R&D. En effet, les outils de financement du scale-up prennent en compte les besoins de financement de la R&D : la majorité voire quasi-totalité des produits de financement du scale-up dont bénéficient les startups deeptech servent aussi à financer la R&D. Ce résultat s'observe à partir d'une analyse des données des produits de financement de Bpifrance à destination des startups deeptech. La base de données à disposition est constituée d'une liste de produits de financement, des montants totaux distribués entre 2011 et mai 2023 pour chacun de ces financements, ainsi que du nombre de startups bénéficiaires. Nous avons alors étudié les cahiers des charges de chacun des produits de

financement pour déterminer s'ils contenaient des éléments relatifs au scale-up (financement de l'industrialisation, financement de la commercialisation, démonstrateurs, etc.) et à la R&D (recherche, développement, prototypes, projets collaboratifs, etc.). Il apparaît très clairement dans la Figure 12 que les solutions de financement à destination du scale-up proposées par Bpifrance et dont ont bénéficié les startups deeptech financent simultanément la R&D pour la grande majorité d'entre elles.

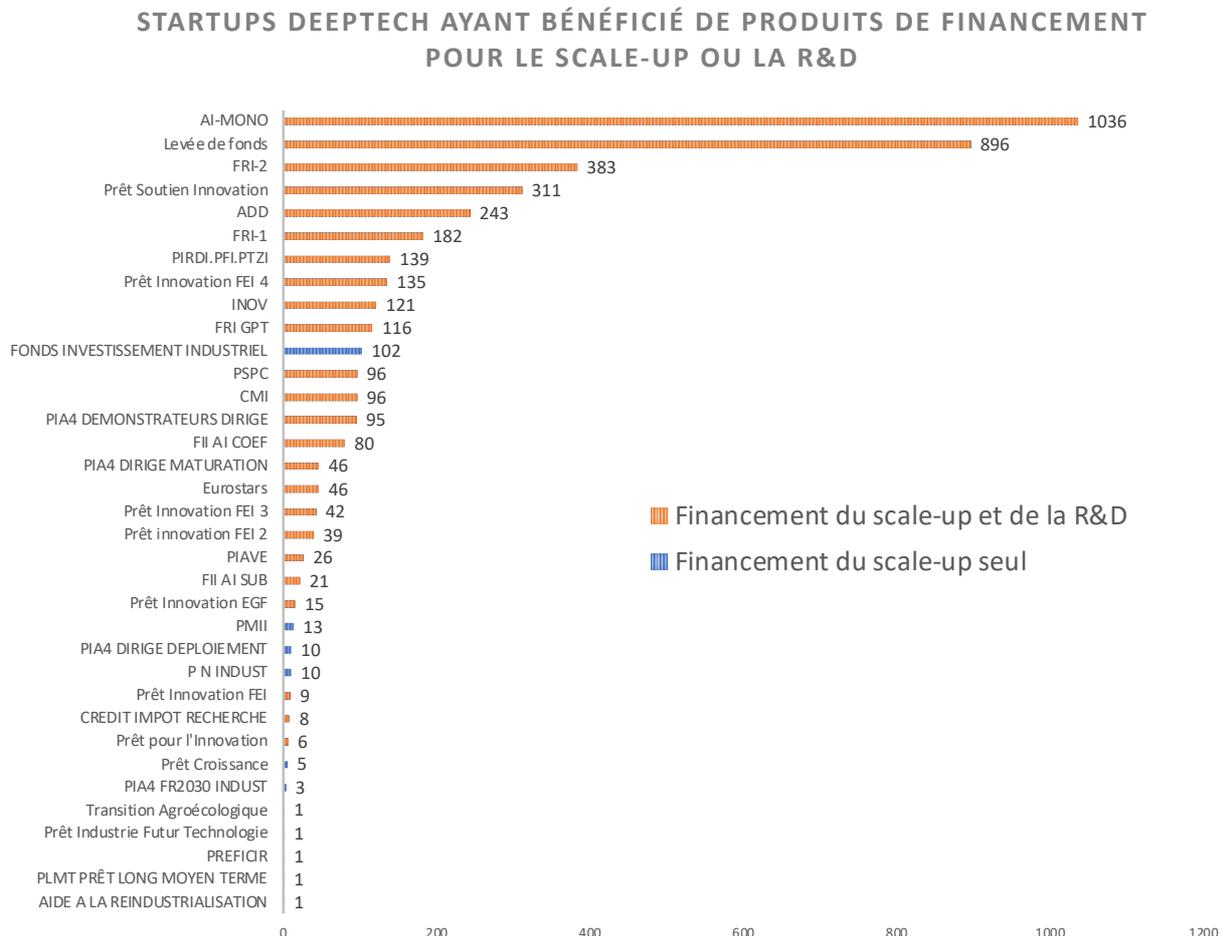


Figure 12. Solutions de financement du scale-up de Bpifrance accordées aux startups deeptech et différenciées selon le soutien simultané à la R&D

Ce résultat se retrouve quand on s'intéresse aux montants totaux associés à chaque solution de financement. Dans la Figure 13 on fait ainsi apparaître l'ensemble des solutions de financement dont ont bénéficié les startups deeptech, qu'il s'agisse ou non de solutions dédiées au scale-up. On remarque alors que sur l'ensemble des produits financiers dont bénéficient les startups deeptech, les plus gros montants sont dédiés au financement conjoint du scale-up et de la R&D.

Ce constat de l'intérêt et de la réalité des financements simultanés du scale-up et de la R&D peut aussi s'expliquer par la nature même de la phase de scale-up. En particulier, cela ouvre la voie à une nouvelle perception du scale-up, non plus comme une étape dans le développement entre deux périodes précises, mais comme un ensemble d'enjeux qui viennent en sus des précédents. Une telle hypothèse remet déjà en question les descripteurs classiques utilisés pour saisir cette phase de forte croissance.

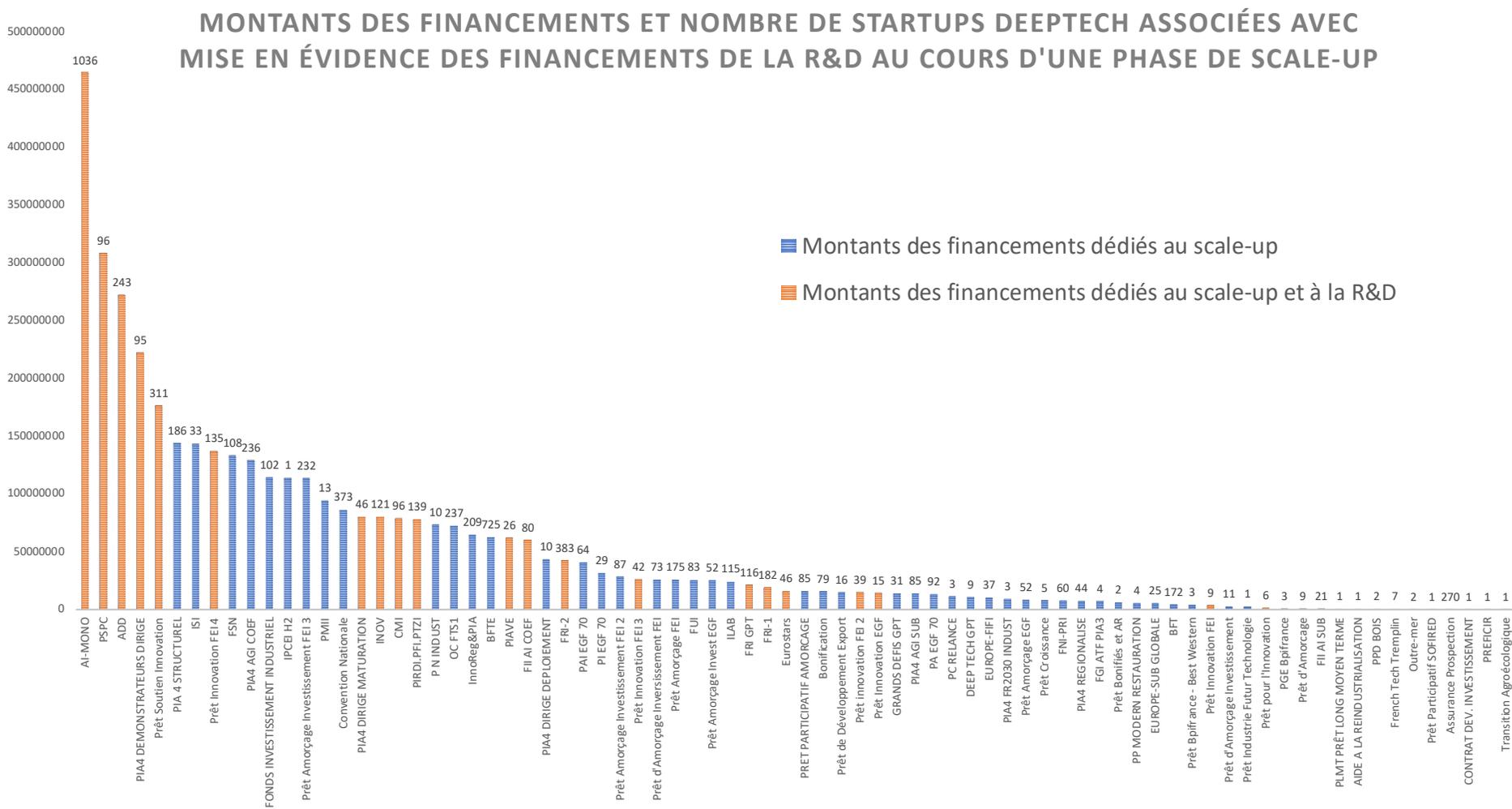


Figure 13. Montants des solutions de financement du scale-up de Bpifrance accordées aux startups deeptech et différenciées selon le soutien simultané à la R&D

3. Décrire et gérer les multiples efforts à fournir pour passer à l'échelle

3.1. L'impasse des descripteurs classiques de la croissance

Une comparaison des startups technologiques et non-technologiques semblerait, au premier abord, être un moyen de souligner les caractères spécifiques des entreprises proposant des innovations technologiques. Étonnamment, la littérature en entrepreneuriat ne fait pas état de différences notables, si ce n'est vis-à-vis de la propension au risque, par essence plus élevée pour les entreprises technologiques. Si les trajectoires de développement ne présentent pas de différences significatives (phases de croissance et activités principales comparables), Liao et Welsch (2008) mettent en évidence que les différences les plus importantes sont plutôt issues des activités périphériques, gérées à d'autres moments en fonction du temps de mise sur le marché. Il n'y aurait donc pas de spécificités visibles de la startup deeptech, si l'on conserve les indicateurs classiques de la croissance.

Néanmoins, la littérature en entrepreneuriat a également exploré plusieurs typologies d'entreprises proches des startups deeptech, comme détaillé dans la section 1.1.3 de ce chapitre, tout en soulignant des indicateurs propres. Ainsi, les startups *high-tech* comme les NTBF sont sensibles durant leur phase de croissance à des paramètres tels que la compétence scientifique des dirigeants, leur expérience technologique, leurs réseaux technico-économiques (Arantes et al., 2019). Le concept de double tyrannie (Murray & Marriott, 1998) est aussi un indicateur des difficultés propres à l'investissement dans les startups technologiques. De nouveaux modèles doivent être mis en place pour assurer le financement de l'innovation (Parpaleix, 2019), et *a fortiori* lorsqu'il s'agit de startups deeptech (Portincaso et al., 2021).

Ces deux résultats semblent opposés ; mais on peut aussi penser que si aucune différence notable n'apparaît entre les entreprises d'innovation technologique et les autres, c'est aussi, précisément, que les descripteurs adoptés jusqu'à présent n'intégraient pas les dimensions propres au développement de la technologie elle-même. Ainsi cette littérature ne caractérise pas clairement les transformations et les apprentissages technologiques : connaissance des phénomènes cœur, évolution du domaine de validité, réduction d'incertitude, exploration des usages envisageables, évolution des architectures technologiques plus ou moins modulaires ou génériques, etc. C'est pourquoi le cadre d'analyse en entrepreneuriat pour la problématique des startups deeptech gagnerait à être élargi pour prendre en compte les questions de conception.

Si les travaux restent à conduire, il semble que le cas des deeptech illustre justement cette thématique : à partir des travaux en conception conjugués aux analyses issues de la littérature en entrepreneuriat, les conditions de croissance favorables aux entreprises deeptech pourraient apparaître plus clairement. Ce sera l'objet du deuxième chapitre.

Pour comprendre la transformation en profondeur de l'entreprise et de ses capacités de conception pendant la phase de scale-up, il est nécessaire d'avoir des descripteurs propres à ces enjeux. La nature des données à disposition ne permet pas de saisir les efforts de conception réalisés. En montrant que les outils de financement de Bpifrance cherchent déjà à répondre à un double enjeu, à savoir le passage à l'échelle simultanément au soutien à l'effort de R&D, il apparaît d'autant plus pertinent de concevoir de nouveaux descripteurs. Il s'agirait par exemple de pouvoir quantifier

l'activité inventive réalisée tout au long du développement (à travers l'évolution du nombre de brevets déposés, la répartition des emplois entre les équipes en R&D et les autres services, la dépense en R&D ou encore la nature des partenariats réalisés).

3.2. Les startups deeptech face à une phase de scale-up en superposition : l'exemple de la startup DNA Script

Pour illustrer notre propos, nous baserons notre réflexion sur un exemple de startup deeptech à partir duquel nous avons élaboré les premières hypothèses de notre travail. Il s'agit de la startup française DNA Script, créée en 2014, fournissant un système de synthèse de molécules d'ADN à la demande à destination des chercheurs dans des structures publiques et privées et dont le modèle d'affaires est proche de celui d'une imprimante (vente d'une machine et de consommables). Leur innovation technologique repose sur le procédé de synthèse de la molécule d'ADN réalisé à partir d'enzymes, en remplacement des procédés chimiques classiques. La synthèse enzymatique permet en effet de s'émanciper d'un certain nombre de contraintes propres au procédé chimique, généralement coûteux, nécessitant une main d'œuvre qualifiée pour manipuler des solvants organiques nocifs et réalisant des cycles de synthèse lents avec des limitations en termes de longueur du brin d'ADN synthétisé. Ce procédé apporte une rupture certaine dans le marché de la synthèse d'ADN et a nécessité plusieurs années de R&D pour aboutir à un produit fini.

À partir de sources de données secondaires variées (médias, brevet, outils de communication de l'entreprise) et du travail d'enquête mené par Philippe Mustar (2020), nous retraçons l'histoire de DNA Script jusqu'en 2020 en classifiant les faits selon le type d'activité mené, à savoir :

- la conception technique (preuves de concept, grandes étapes du développement, réussites particulières) ;
- le développement de l'écosystème à travers les partenariats réalisés et les relations créées avec des acteurs de l'accompagnement ;
- la gestion des ressources humaines (pour mettre en évidence les augmentations successives du nombre de collaborateurs) ;
- les brevets déposés, comme preuves de l'activité inventive réalisée et signe d'une activité d'innovation à venir ;
- les aspects financiers qui relèvent surtout des grandes étapes dans le financement de la startup, et plus particulièrement des levées de fonds ;
- les aspects relatifs au marché et à la mise en place du modèle d'affaires.

Dans la frise chronologique présentée dans la Figure 14, nous avons cherché à différencier les efforts mis en œuvre par la startup tout au long de son développement. On remarquera dans un premier temps que les activités avant la création de la société sont plus restreintes et correspondent à une première étape de recherche (activité d'invention principalement). La création de la société introduit ensuite de nouvelles considérations financières et permet également de commencer le dépôt des premiers brevets (appartenant dès lors à la société). L'effort de conception technique porte alors sur la conception d'un produit à partir des premiers brevets déposés, ce que l'on peut considérer comme étant une activité d'innovation, qui démarre à partir de la réalisation de la

première preuve de concept en 2015. L'année 2019 représente un tournant dans la trajectoire de développement. Outre l'augmentation du nombre de collaborateurs entraînant un déménagement, c'est aussi l'époque de la levée en série B qui sera étendue dès 2020 : la startup est rentrée en scale-up (d'ailleurs on notera sa présence dans le programme FT120 dès la promotion 2020). Si la startup entame bien sa phase de scale-up, ce n'est pas pour autant qu'elle cesse de déposer des brevets, ni que ces activités de conception ralentissent. Quant aux questions relatives au marché, on les voit apparaître dès 2017 et elles continuent de se poursuivre dans les prévisions annoncées en 2020 pour 2022.

Au lieu d'assister à une réduction des activités pour se focaliser sur la structuration et la validation du marché, on observe une accumulation d'activités, les efforts relatifs au scale-up venant en superposition des activités existantes. L'exemple de DNA Script nous permet ainsi d'élaborer l'hypothèse d'une phase de scale-up en superposition des activités précédentes. La structuration relative à la phase de scale-up s'exprime dès lors sur un champ d'activités plus large, impliquant d'élargir aussi la portée des indicateurs à définir.

Chapitre 1 – Soutenir le développement des startups deeptech : la mission de Bpifrance comme opérateur du plan Deeptech

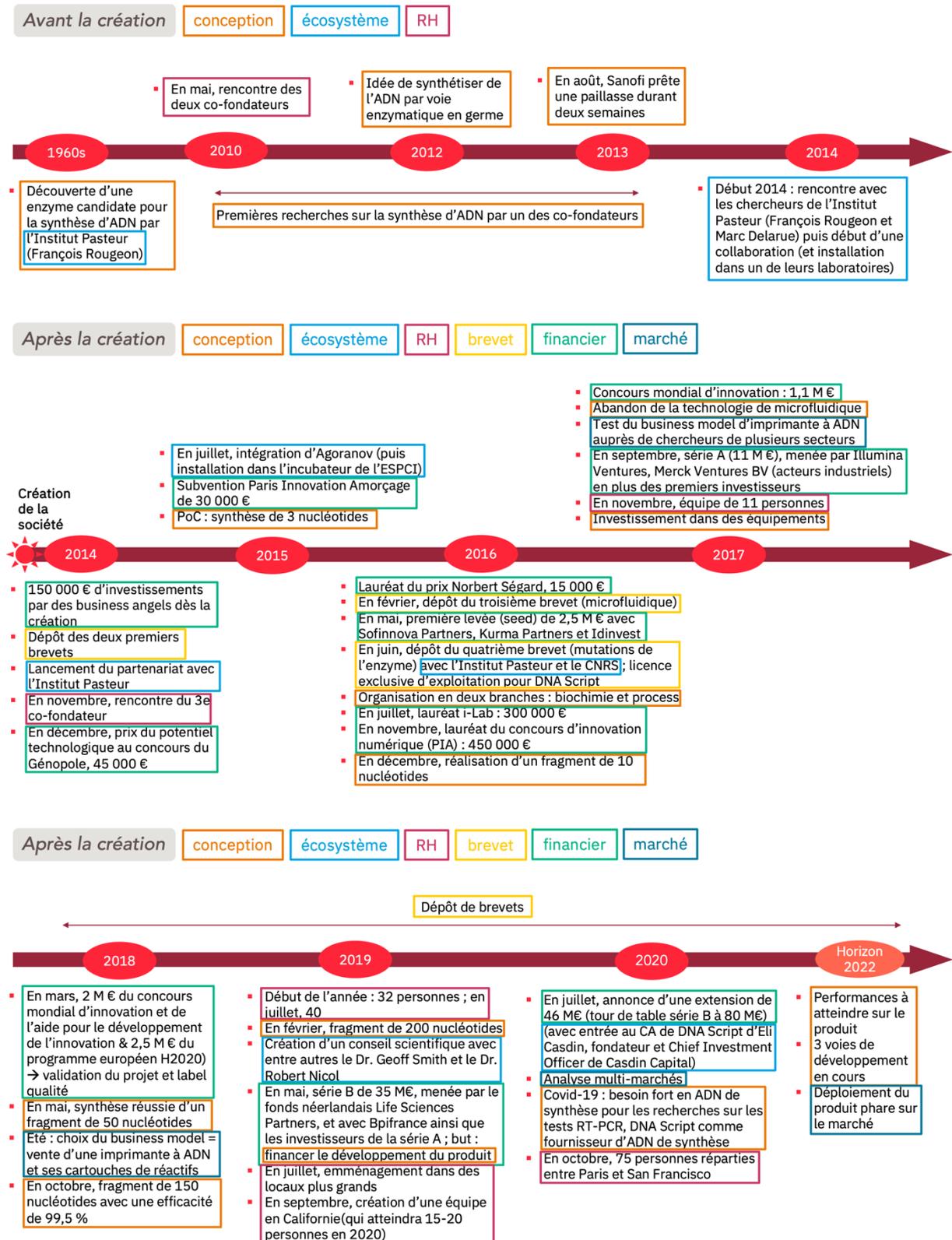


Figure 14. Chronologie du développement de la startup DNA Script à partir de la rencontre des fondateurs jusqu'en 2020

3.3. De nouveaux descripteurs pour saisir les spécificités du scale-up des startups deeptech

La prise en considération de la superposition des activités à gérer par l'entreprise en phase de scale-up appelle à un renouvellement des indicateurs de cette étape de développement. Si les descripteurs classiques ne permettent pas d'en saisir toute la complexité lorsqu'il s'agit de startups deeptech, comme souligné dans la section 3.1, Bpifrance se pose naturellement la question des descripteurs pertinents du passage à l'échelle. Compte-tenu de la nature diverse des activités mises au jour dans la section précédente, c'est aussi la question du langage d'expression de ces nouveaux descripteurs qui se pose ainsi que celle de la gestion des changements structurels internes. En particulier, il s'agira de prendre en compte les spécificités du développement de technologies de rupture, propre aux startups deeptech, en allant au-delà des seules questions relatives à l'accès au marché et aux financements déjà traitées par la littérature existante (ce qui sera vu plus en détails dans le chapitre 2).

Si les transformations propres à la phase de scale-up s'opèrent au sein de la startup, c'est aussi au niveau des dynamiques écosystémiques que les changements se répercutent. Par exemple, la proximité avec des structures de recherche est déjà une des caractéristiques propres aux startups deeptech, ce qui soulève la question de la gestion et du développement de ses partenariats, parmi d'autres, lorsque l'entreprise cherche à passer à l'échelle. L'étude de la transformation de l'écosystème et des relations entre les acteurs est aussi un moyen de mieux comprendre les mécanismes du scale-up.

4. Pertinence du choix des startups deeptech comme objet d'étude

4.1. Intérêt des startups deeptech pour la compréhension des mécanismes propres au scale-up

Trois éléments nous semblent utiles pour justifier de l'intérêt du cas des startups deeptech dans la compréhension des mécanismes propres au passage à l'échelle, que l'on pourrait généraliser à d'autres types d'entreprises.

Premièrement, les temps de développement des startups deeptech étant significativement plus longs compte-tenu des risques technologique et marché engendrés, cet étalement dans le temps doit permettre de mieux distinguer les moments-clefs du scale-up.

Deuxièmement, l'émergence de modèles d'affaires de type plateforme laisse suggérer une augmentation du nombre de marchés potentiels : les marchés d'implantation de la solution développée étant plus nombreux, la probabilité d'atteinte d'au moins l'un d'entre eux est a priori plus grande que s'il n'y en avait qu'un. De plus, le passage à l'échelle peut aussi avoir lieu sur plusieurs marchés simultanément.

Troisièmement, les startups deeptech font aussi apparaître des situations où l'on observe de forts signaux de croissance apparents (comme une intensification des recrutements ou des montants de levées de fonds élevés) sans pour autant que le modèle d'affaires ait été préalablement

validé. Le cas du redressement judiciaire de la startup Sigfox, spécialisée dans l'internet des objets, est une malheureuse illustration de ce paradoxe : malgré ces 350 collaborateurs et plus de 280 millions d'euros levés, L'Usine Digitale dans un article paru le 27 janvier 2022²² évoque « un pivot raté » entre la vente d'infrastructures de télécommunication et la vente de services liés à l'internet des objets (IoT). Il s'agit bien d'un cas où tous les éléments du modèle d'affaires n'avaient pas été validés alors que les indicateurs d'un scale-up étaient au vert.

Ces premiers indices font apparaître les startups deeptech comme de bons candidats à une compréhension plus précise du passage à l'échelle.

4.2. Intérêt de la question du scale-up des startups deeptech pour la puissance publique : une arme face aux grands défis ?

Si malgré les difficultés soulevées précédemment, le scale-up des startups reste une phase si prisée, et en particulier par la puissance publique, ce n'est pas pour les seuls profits financiers engendrés par l'augmentation du chiffre d'affaires ou les perspectives de sortie d'investissement par la revente des startups à des grands groupes. En effet, au-delà de ces considérations financières, l'émergence de nouveaux défis mondiaux, comme la récente pandémie de la COVID-19 l'a illustrée, fait naître de fortes attentes concernant le développement et le déploiement de nouvelles solutions technologiques. C'est d'ailleurs la nécessité d'une large diffusion de ces solutions qui permet de considérer ces problématiques sociétales comme des *grand challenges* par George et al. (2016).

Ces grands défis soulignent l'impératif de l'innovation pour nos politiques publiques, que Pfothenauer et al. (2019) considèrent comme un « *deficit model of innovation* » : notre difficulté commune à répondre à ces défis est liée au manque d'innovations, et la diversité des enjeux à traiter, dans tous les domaines, fait de ces innovations un véritable objet de politique publique. Au-delà du soutien à l'innovation dans les lieux historiques des activités de conception que sont les centres de recherche et de développement des grands groupes (Le Masson & Weil, 2010), un accent particulier est désormais porté sur le soutien au développement de nouvelles structures pour concevoir, développer et déployer ces solutions en rupture. Dans la mesure où ces grands défis partagent des caractéristiques communes, mises en évidence par Ferraro et al. (2015), il s'agit de chercher la réponse à donner à grande échelle.

Au niveau de l'Union Européenne, l'économiste Mariana Mazzucato développe dans un de ses rapports (Mazzucato, 2018), le concept de *mission-oriented* pour la recherche et l'innovation dans le but d'organiser et de coordonner l'action à grande échelle des acteurs, transdisciplinaires et trans-sectoriels, d'une même thématique, issue des objectifs de développement durable de l'ONU. Les missions définies ont pour but de faire émerger des solutions qui peuvent passer à l'échelle. Cela nécessite alors de ne plus simplement considérer les valorisations rapides pour permettre la sortie des investisseurs et des entrepreneurs au détriment de dynamiques d'innovation plus larges. Tout un courant de travaux se développe ainsi autour des « *responsible innovations* », définies comme : « *a collective commitment of care for the future through responsive stewardship of science and*

²² L'article est disponible sur le lien suivant : <https://www.usine-digitale.fr/article/pourquoi-sigfox-ancien-symbole-de-la-french-tech-est-placee-en-redressement-judiciaire.N1778297>

innovation in the present » (Owen et al., 2013, p.36), et nécessitant l'émergence de nouveaux modèles de gouvernance portés par les gouvernements (Voegtlin & Scherer, 2017).

En portant des innovations de rupture pour résoudre les grands défis de notre ère, les startups deeptech font partie des capacités d'innovation que la puissance publique peut soutenir et employer pour apporter des solutions particulièrement nouvelles. Compte-tenu de la mondialisation de ces défis, les solutions doivent être déployées à cette même échelle.

Synthèse du chapitre 1

Ce premier chapitre aura permis d'établir une caractérisation des startups deeptech à partir d'une revue de la littérature, mettant ainsi en évidence la complexité de la gestion du développement de ce type d'entreprises technologiques. Elles restent tout de même peu étudiées par la littérature académique : c'est à partir d'autres types proches d'entreprises technologiques que nous sommes en mesure d'appréhender les enjeux de gestion du passage à l'échelle des startups deeptech. C'est pour répondre à cette difficulté que Bpifrance, comme opérateur du plan Deeptech, cherche à déterminer les moyens d'action adaptés à leur développement. Compte-tenu des bases de données à disposition de Bpifrance, nous avons eu la volonté de compléter notre première caractérisation par une analyse quantitative pour tenter de définir plus finement ce que sont les startups deeptech françaises. Mais la nature des données de la base des lauréats du concours d'innovation i-Lab ne permet pas de faire ressortir d'autres critères que ceux du secteur d'activité et de la région d'implantation, ce qui n'illustre pas les problématiques de gestion de ces entreprises.

Ces problématiques se retrouvent plus particulièrement au moment du passage à l'échelle, qui concentre l'intérêt des acteurs de cette dynamique mondiale compte-tenu de la dimension d'impact face aux grands défis portés par les startups deeptech. En France, la puissance publique met à disposition de plus en plus de moyens pour soutenir leur scale-up. Notre deuxième analyse quantitative montre justement que les startups deeptech françaises en phase de scale-up répondent bien aux indicateurs classiques d'une étape de croissance et font, pour une partie significative d'entre elles, l'objet d'un soutien de Bpifrance. Cependant, cette analyse ne permet pas de conclure quant à la réussite à moyen ou long terme de ces startups en scale-up et ne précise pas non plus leurs difficultés de gestion propres et relatives à des phases de forte croissance. Les descripteurs utilisés pour réaliser les bases de données ne sont effectivement pas assez spécifiques aux cas des startups deeptech et à la complexité de leur développement.

Pourtant l'État français se dote de moyens considérables pour soutenir les entreprises ayant un potentiel de réussite a priori élevé, voire aussi un potentiel d'impact face à des enjeux majeurs. C'est dans ce but qu'ont été créés les programmes FT120 et Next40, dans lesquels on retrouve quelques startups deeptech. Notre dernière analyse quantitative a ainsi cherché à différencier les startups deeptech des autres entreprises sélectionnées dans ces programmes. Le critère deeptech n'apparaît pas comme étant différenciant, ne permettant pas de conclure quant aux spécificités du comportement des startups deeptech vis-à-vis d'entreprises dans cette phase de scale-up. En s'intéressant finalement aux solutions de financement fournies par Bpifrance à destination de ses entreprises deeptech clientes, on remarque que le financement du scale-up s'accompagne le plus souvent d'un financement de la R&D. Cette dernière analyse laisse transparaitre une partie des efforts de conception à fournir par les startups deeptech au cours du passage à l'échelle, qui demande donc de nouveaux descripteurs.

Dans la mesure où les startups deeptech portent par essence une promesse d'un impact, l'intérêt d'une diffusion large des technologies de rupture qu'elles proposent justifie de se pencher sur l'étude de ce phénomène critique qu'est le scale-up. Nous chercherons donc à caractériser cette phase-clef dans la recherche de résolution des grands défis dans le chapitre suivant.

**Chapitre 2 – De la reproduction d’un modèle
d’affaires à la constitution d’un patrimoine de
création : regards croisés des champs de recherche
sur la conception en phase de scale-up**

Chapitre 2 – De la reproduction d’un modèle d’affaires à la constitution d’un patrimoine de création : regards croisés des champs de recherche sur la conception en phase de scale-up

1. L'étape de croissance dans le cycle de vie des entreprises.....	80
1.1. Une représentation de la réussite entrepreneuriale façonnée par les mythes industriels.....	80
1.2. L'apport des <i>social ventures</i> à la définition du passage à l'échelle.....	83
1.3. Le scale-up vu comme une phase de développement : difficultés intrinsèques et obstacles multiples.....	84
1.3.1. <i>La nature du passage à l'échelle selon la littérature : une étape du processus de croissance</i>	84
1.3.2. <i>La difficile identification du démarrage du scale-up</i>	85
1.3.3. <i>La proposition d'une phase de transition pour franchir les obstacles au scale-up</i>	87
2. Le monde du numérique aux origines de la notion de scale-up : quelle extrapolation au cas des startups technologiques ?.....	88
2.1. Le scale-up, une terminologie issue de l'informatique devenue archétypale des startups du numérique.....	88
2.2. Différencier les startups du numérique des startups deeptech pour spécifier la gestion de leur développement.....	90
2.3. Une focalisation sur les aspects relatifs au marché insuffisante pour caractériser le scale-up des startups deeptech.....	93
3. Le passage à l'échelle des startups vu par la littérature : les théories entrepreneuriales au service de l'adéquation entre le produit et le marché.....	94
3.1. Caractérisation à partir de la littérature sur la <i>business model scalability</i> : la validation d'un modèle d'affaires, un passage obligé.....	94
3.1.1. <i>La reproduction d'un modèle d'affaires validé comme définition du scale-up</i>	94
3.1.2. <i>Les dimensions du modèle d'affaires sur lesquelles portent les validations</i>	96
3.1.3. <i>Évolution du modèle d'affaires et expérimentations en scale-up, des indices d'une reproduction pas toujours fidèle</i>	98
3.1.4. <i>Une stratégie de diversification : la constitution d'un portefeuille de modèles d'affaires</i>	98
3.2. L'apport de la méthodologie du <i>Lean Startup</i> pour le passage à l'échelle : des outils pour la validation du modèle d'affaires.....	99
3.2.1. <i>L'atteinte du product-market fit comme objectif principal</i>	99

3.2.2.	<i>Tester les hypothèses constitutives du modèle d'affaires avec des minimum viable products successifs</i>	100
3.2.3.	<i>Les pivots, un exemple de la difficulté à atteindre le scale-up</i>	101
3.3.	Enrichir la perception du scale-up des startups deeptech avec des méthodes complémentaires.....	102
4.	Introduire un nouveau cadre d'analyse à partir de la notion de préservation	103
4.1.	Intérêt du concept de routines issu du champ de l'apprentissage organisationnel	103
4.2.	Assurer une spécificité comme avantage concurrentiel : la tension entre préservation et création	104
4.3.	Distinguer la validation des éléments du modèle d'affaires de la préservation de l'architecture de conception	106
5.	L'entrepreneuriat vu comme une science de la conception	107
5.1.	Dépasser la destruction créatrice.....	107
5.2.	<i>Entrepreneurship as design</i> , une forme d'entrepreneuriat dans l'inconnu.....	108
6.	Les enjeux de conception pour les startups technologiques	109
6.1.	Lever simultanément les inconnus marché et technologique	109
6.2.	Une relecture de la notion d' <i>absorptive capacity</i>	110
6.3.	Introduire le patrimoine de création pour distinguer validation et préservation...	111
6.4.	Formulation des questions de recherche.....	112

La réussite entrepreneuriale est, dans l'opinion populaire, en lien avec un déploiement très large d'une solution, comme les récits communs autour des succès industriels l'illustrent (section 1.1). Dans la mesure où cette solution peut répondre à un des grands défis contemporains, son passage à l'échelle gagne significativement en désirabilité. Pour une startup, son succès est conditionné à sa capacité à atteindre l'étape de croissance qu'est le scale-up (partie 1). Mais plébisciter des solutions technologiques à impact ne garantit pas la réussite des entreprises qui les développent et les difficultés intrinsèques au scale-up sont un frein à cette réussite, *a fortiori* dans le cas des startups à caractère technologique vis-à-vis des startups du numérique (partie 2).

À partir du constat empirique de la difficulté à saisir la phase de scale-up pour une startup technologique, nous nous référons d'abord à la littérature sur la *business model scalability* (section 3.1) et en entrepreneuriat (section 3.2) pour faire un état de l'art des connaissances. Considérant simultanément la réalité partagée des difficultés du développement rencontrées par les startups du numérique comme technologiques ainsi que leurs différences marquées induisant des mécanismes de développement qui leur sont propres, nous élargissons notre revue de la littérature au champ de la conception pour compléter la connaissance de ces mécanismes de gestion du scale-up des startups technologiques, encore mal compris et peu étudiés.

La littérature en conception ouvre alors la voie à une nouvelle définition du scale-up : cette phase intense de développement des startups pourrait être d'abord une phase de structuration forte des capacités de conception ayant émergé au cours des premiers développements. C'est en dépassant la notion de validation du modèle d'affaires que l'on peut proposer un point de vue original basé sur la préservation (partie 4), non pas des éléments constitutifs du modèle d'affaires mais de l'architecture même déployée pour concevoir. C'est ce qui nous conduit à considérer l'entrepreneuriat comme une science de la conception (partie 5).

En outre, la dimension technologique intrinsèque à la typologie de startups considérées engendre également la nécessité de mettre en place une structuration qui garantisse aussi des capacités de conception futures, c'est-à-dire la générativité de l'entreprise. Ce mouvement, à la fois préservant et génératif, peut être saisi à travers la notion de patrimoine de création (partie 6). Notre revue de la littérature nous amène à formuler l'hypothèse centrale de notre travail, c'est-à-dire une nouvelle définition du scale-up, considérant dorénavant cette étape comme une phase de constitution du patrimoine de création.

1. L'étape de croissance dans le cycle de vie des entreprises

1.1. Une représentation de la réussite entrepreneuriale façonnée par les mythes industriels

Depuis la deuxième révolution industrielle²³, des industries à succès ont participé activement à la construction d'un modèle de réussite d'un projet entrepreneurial, pour lequel le

²³ L'emploi de la formule est réalisé à dessein, notamment parce qu'elle permet aussi de renvoyer à l'actuelle révolution numérique. Jarrige (2015) souligne ce qui fait le succès de cette période et de la perception que l'on peut en avoir :

succès s'appréhende à travers les indicateurs de la croissance (chiffre d'affaires, clients et parts de marché, collaborateurs, etc.). Le Masson et al. (2006) dressent une liste des explications de la croissance d'une entreprise : « l'invention exceptionnelle, la maîtrise d'une technologie-clé, le modèle statistique, l'entrepreneur providentiel, la créativité ou le bon management de projet » (p.112). À partir des recherches effectuées sur le cas de l'entreprise Tefal (Chapel, 1997), ils discutent ces idées usuelles et proposent un autre cadre d'analyse. Bien qu'il soit tentant de fournir une première explication des succès industriels à partir de cette liste de causes très endogènes de la croissance et qui s'appuient sur des traditions de recherche bien ancrées (Penrose, 1959 ; Schumpeter, 1911), la complexité pressentie du passage à l'échelle dans des cas d'entreprises technologiques amène à chercher à dépasser le mythe de la réussite entrepreneuriale basée sur la rencontre permise entre un produit fabuleux et un marché prêt à le recevoir. Nous proposons de revenir sur trois succès industriels incontestés au regard des indicateurs classiques de la croissance, pour lesquels un deuxième niveau d'analyse permet de dépasser cette seule mythologie et d'ouvrir la voie à une autre perception de la réussite du passage à l'échelle.

Le cas du développement des constructeurs automobiles au XX^e siècle est caractéristique d'une diffusion²⁴ massive d'un nouveau produit au sein de la population mondiale. On considère à présent qu'il y a plus d'un milliard d'automobiles en circulation dans le monde, confirmant la permanence de la rencontre des véhicules avec un marché en demande. Au-delà de cette diffusion incontestable, l'historien Patrick Fridenson met en lumière le rôle profondément transformateur de l'industrie automobile dans la perception de l'entreprise mais aussi dans la société française dès la fin de la Seconde guerre mondiale. Selon lui, « L'Automobile fait changer la grande entreprise d'échelle (Renault dans les années trente dépasse les 30 000 ouvriers et possède un réseau commercial étendu sur soixante pays étrangers), d'organisation du travail, de système de vente. » (Fridenson, 1972, p.5) ; puis il ajoute que « L'Automobile a aussi conduit à des transformations dans l'ordre social et politique. Elle provoque un bouleversement des structures de l'emploi. » (p.6). C'est bien sur le long terme que cette transformation a lieu ; comme l'indiquent Midler et al. (2012), il s'agit dès lors de garantir le maintien des capacités d'innovation dans le cadre de grandes entreprises matures, ce qui participe à révéler la puissance transformatrice de l'industrie automobile. De récents travaux de recherche menés en partenariat avec Renault mettent en évidence comment une de ces grandes entreprises établies assure le maintien de ses capacités d'innovation à travers l'organisation de l'expertise en vue de l'identification de nouvelles trajectoires de conception (Deval et al., 2020). Ce premier exemple nous amène à prendre conscience de l'importance de l'organisation des savoirs accumulés qui rendent possible une générativité tout au long du processus de développement de l'entreprise.

Si l'on a tendance à penser que la réussite entrepreneuriale tient à la qualité du produit vendu, il ne faut pas négliger non plus la grande variété de nature des innovations comme un des éléments du succès entrepreneurial. Sur ce point, la montre Swatch en est une parfaite illustration.

« Les économistes qui inventent puis promeuvent la notion de révolution industrielle avant 1945 sont fascinés par l'accroissement de la production et par les gains de productivité permis par les nouvelles formes d'organisation du travail et la multiplication des innovations techniques. » (p.16-17).

²⁴ La diffusion d'un produit est définie par Garel et Mock (2012) comme étant un « processus qui décrit et explique l'adoption de l'innovation, puis sa conquête d'un large échantillon de la population » (p.9).

Le groupe suisse Swatch, qui comptabilise près d'une vingtaine de marques, est en effet une des plus grandes entreprises horlogères au monde et se démarque par le nombre d'unités vendues. Son succès est d'autant plus remarquable que la montre Swatch, qui a fait sa renommée, a été conçue au cours de la crise horlogère de la fin des années 1970 qui a tout particulièrement atteint l'écosystème suisse. Alors que la montre Swatch n'est pas un produit présentant des fonctionnalités innovantes pour le consommateur (mis à part son design), c'est au niveau de son processus d'industrialisation que la rupture technologique a eu lieu. C'est ce que démontrent Garel et Mock (2012) en revenant sur l'histoire de la conception de la Swatch. La révolution qu'ont proposée les concepteurs de cette montre en plastique tient dans la capacité à mettre au point un processus de fabrication automatisé et à très bas coût, tout en garantissant la qualité horlogère suisse. La réussite de ce qui n'était qu'un projet au départ caché de la direction de l'entreprise se mesure aujourd'hui en plusieurs centaines de millions d'exemplaires vendus au total, plus de 160 usines dans le monde et un chiffre d'affaires du groupe atteignant 7,5 milliards de francs suisses en 2022. Avec la montre Swatch, c'est aussi l'industrie horlogère suisse qui a réussi à sortir de la crise dès les années 1980. En s'arrêtant au seul produit, on perd l'occasion de prendre conscience de l'importance des processus de conception. Le travail d'analyse mené par Garel et Mock (2012) appelle ainsi à s'intéresser plus particulièrement à l'observation des processus structurant les activités de conception dans une phase aussi complexe que celle du passage à l'échelle.

Un dernier exemple d'entreprise dont la répercussion est mondiale, et dont le succès est contemporain de ce travail de recherche, est celui de l'entreprise deeptech de biotechnologies Moderna, devenue l'une des sociétés-clefs face à la pandémie de la Covid-19 par l'intermédiaire de sa technologie de vaccin à ARN messenger. Elle dispose en effet dès janvier 2021, soit un an après les premières mesures de confinement des populations, des autorisations de mise sur le marché de son vaccin aux États-Unis et en Europe. Son chiffre d'affaires en 2022 a atteint 19,26 milliards de dollars et elle compte alors plus de 4000 salariés. Inconnue du grand public avant la pandémie de la Covid-19, la rapidité de la production et du déploiement mondial des vaccins mis au point est à souligner : à première vue, Moderna a réussi l'exploit de réaliser un passage à l'échelle express, dans un domaine particulièrement réglementé. Deux éléments peuvent contrebalancer cette idée. D'une part, l'entreprise a été créée en 2010 dans le but de mettre au point un vaccin à ARN messenger. Ce sont donc 10 années de recherche et développement qui se sont écoulées avant la pandémie et qui ont été utiles pour accumuler des savoirs et structurer les travaux de recherche. D'autre part, si les délais relatifs à la réalisation et à la validation des essais cliniques successifs sont généralement longs, la réussite de Moderna a en partie tenu à la capacité des autorités à mettre en place un protocole d'homologation et de qualification d'urgence²⁵ et à celle de Moderna de répondre à ces exigences dans le temps imparti. Cette question de la réglementation ne peut pas être considérée comme un facteur endogène de la croissance au même titre que la solution technique ou la vision de l'entrepreneur. En sus du rôle des institutions de régulation, le développement d'autres vaccins, qu'ils soient ou non basés sur la même technologie, par des entreprises différentes a aussi concouru à l'émergence et à la structuration d'un écosystème propice à une forte croissance. Enfin, le passage

²⁵ Un communiqué de presse de l'OMS du 30 avril 2021 y fait explicitement référence : <https://www.who.int/fr/news/item/30-04-2021-who-lists-moderna-vaccine-for-emergency-use>

à l'échelle du vaccin contre la Covid-19, démontré par Moderna, n'est que le début d'un programme plus ambitieux présenté par la société dès mars 2022²⁶ : ce sont une quinzaine de maladies, comme le VIH et le paludisme, qui font l'objet de projets de développement de vaccins à ARN messenger. En s'attaquant à d'autres pathogènes avec la même technologie reposant sur l'ARN messenger, comme elle a déjà pu le faire par le passé, Moderna s'appuie sur une technologie générique pour la diffuser largement sur plusieurs marchés. Cette capacité à déployer une technologie générique peut aussi être considérée comme un élément de passage à l'échelle.

Ces différents exemples mettent déjà en évidence plusieurs mécanismes que l'on cherchera à observer dans la suite des travaux : l'accumulation des savoirs, le renforcement des capacités d'innovation garantissant la générativité, ou encore la généricité de la technologie pour un déploiement d'un ensemble de produits sur différents marchés. Cela laisse présager l'existence d'une diversité des modalités de passage à l'échelle. En somme, les critères de la réussite entrepreneuriale peuvent eux-mêmes être discutés : en proposant une définition d'un « contrat d'entreprise », Segrestin et Hatchuel (2012) mettent en évidence la pluralité des objectifs poursuivis, dont « au-delà du profit, une mission d'innovation et de progrès collectif pour l'entreprise » (p.20) ; ils poursuivent en explicitant : « À cet égard, ce qui compte, ce n'est pas seulement le capital qu'elle accumule, mais les brevets qu'elle détient, les savoir-faire qu'elle suscite, les techniciens qu'elle forme, les méthodes de travail qu'elle déploie. » (p.33). Cette refondation du rôle de l'entreprise ouvre la voie à une acception plus large de la réussite que la seule augmentation des ventes et du chiffre d'affaires, ancrée dans les mythes industriels, en considérant les autres missions que l'entreprise peut se donner.

1.2. L'apport des *social ventures* à la définition du passage à l'échelle

Le cas des *social ventures* fournit une bonne illustration d'un autre type de réussite entrepreneuriale. Les études sur les *social ventures* les définissent comme des entreprises dont le rôle est bien plus de répondre aux grands défis contemporains que de maximiser leur profit (Haugh, 2007). C'est pourquoi elles sont aussi qualifiées d'hybrides dans la mesure où elles cherchent à allier deux logiques a priori opposées : la logique commerciale, pour obtenir les financements nécessaires au maintien voire au développement de l'entreprise, et la logique sociale relative à l'objectif d'impact qu'elles se donnent.

Dès lors, ce sont plusieurs facteurs qui doivent être pris en compte dans le processus de croissance : à la fois le plan économique, mais aussi les volets social et environnemental. Blundel et Lyon (2015) présentent les débats qui ont lieu au sein de la communauté de recherche formée autour des *social ventures* et soulignent notamment que le but du scale-up de ce type d'entreprises peut se définir relativement à son impact, jusqu'à ne plus considérer la taille. Les auteurs en concluent que l'augmentation de la taille de l'entreprise n'est qu'un des éléments à mesurer dans le passage à l'échelle des *social ventures*. En effet, si le passage à l'échelle de la dimension d'impact peut

²⁶ L'annonce est détaillée dans un article du Monde du 8 mars 2022 : https://www.lemonde.fr/economie/article/2022/03/08/moderna-devoile-son-plan-pour-prevenir-les-futures-pandemies_6116530_3234.html

être réalisé au sein de l'entreprise elle-même, il est aussi possible de répliquer la solution au sein d'autres organisations.

Cette réflexion sur la taille de l'entreprise comme étant secondaire dans la problématique de la croissance rejoint les travaux de l'économiste Edith Penrose. Dans son ouvrage le plus célèbre, elle critique en effet le débat autour de la croissance des entreprises : « *It is often presumed that there is a 'most profitable' size of firm and that no further explanation than the search for profit is needed of how and why firms reach that size.* » (Penrose, 1959). Elle met en avant une des limites à la croissance de la taille des entreprises en indiquant l'importance des services managériaux vus comme des ressources inexploitées et appelle ainsi à une prise en compte des facteurs organisationnels dans le mécanisme de croissance (Penrose, 1955). On doit en effet à ses travaux les prémices de la théorie du management par les ressources.

Compte-tenu de la dimension d'impact vue comme une caractéristique différenciante des startups deeptech (d'après le Tableau 1 au chapitre 1), les travaux sur les *social ventures* appellent à définir une mesure appropriée du passage à l'échelle pour les startups deeptech. Quelle que soit la mesure choisie, le scale-up n'en demeure pas moins une étape complexe dans le processus de développement.

1.3. Le scale-up vu comme une phase de développement : difficultés intrinsèques et obstacles multiples

Fombrun et Wally (1989) font apparaître plusieurs tiraillements lors du passage d'une petite entreprise à une entreprise en croissance rapide. Il s'agit de savoir maintenir simultanément la compétitivité, basée sur l'innovation, la prise de risque et l'autonomie dans le management tout en structurant la société, ce qui la rend bureaucratique, conservatrice et plus résistante à l'innovation. Ce paradoxe, qui affecte directement le management de l'entreprise, avait déjà été mis en évidence par Maidique et Hayes (1984) dans le cas des entreprises high-tech. Ce même paradoxe est repris par Tippmann et al. (2022) qui proposent un modèle théorique pour faire face à ce qu'ils nomment le « *global scaling paradox* » dans le cas d'entreprises multinationales. Les trois mécanismes qu'ils développent tendent à définir une stratégie dite de « *replicable innovation* ».

Ainsi, l'extrapolation de ces différents travaux aux cas de startups deeptech laisse déjà entrevoir les difficultés intrinsèques à la phase de scale-up, puisqu'elles n'échappent pas non plus à ce paradoxe.

1.3.1. La nature du passage à l'échelle selon la littérature : une étape du processus de croissance

S'intéresser au passage à l'échelle comme une phase de croissance nécessite également de prendre en considération la diversité des trajectoires de croissance, relevée par Boissin et al. (2019). Ils mettent en évidence l'intérêt de varier les indicateurs pour différencier les types de croissance. La littérature sur la croissance cherche aussi à différencier les entreprises qui cherchent à atteindre une forte croissance (« *high growth* »). À partir d'une cohorte de jeunes entreprises technologiques suédoises, Rannikko et al. (2019) soulignent que seule une faible part des entreprises connaît – voire souhaite connaître – ce phénomène de forte croissance. Dans leur échantillon de plus de 1000

jeunes entreprises technologiques, moins de 2 % d'entre elles (selon les définitions retenues) auront été considérées comme étant dans cette situation. La revue de la littérature et la mise en rapport des *high growth firms* avec les *scale-ups* proposées par Monteiro (2018) permettent cependant de conclure que les startups connaissant une phase de scale-up peuvent bien être considérées comme des entreprises en forte croissance. Compte-tenu de la variété des types de croissance et des indicateurs pour les définir, le propos développé dans la suite ne traitera pas toutes les questions de la croissance, mais cherchera à mieux comprendre les mécanismes de gestion propres à la phase de scale-up pour une startup deeptech.

Le modèle proposé par Kazanjian et Drazin (1990) relatif à la croissance des startups technologiques met en évidence quatre étapes dans ce processus : la première de conception et développement d'un prototype, qui sera dans une deuxième étape commercialisé sous la forme d'un premier produit pendant que l'entreprise sera en train de se structurer ; selon les résultats obtenus, une phase de croissance peut démarrer, elle correspond alors le plus aux caractéristiques du scale-up (augmentation des volumes produits, transformation managériale, crises ou chocs possibles dans la construction d'un système efficace) ; enfin, l'entreprise peut entrer dans une phase de stabilité sur le plan organisationnel mais aussi au niveau de son positionnement marché qu'elle doit maintenir. Un autre modèle, aussi en quatre étapes, a vocation à être plus généralisable : Passaro et al. (2016) prennent quatre cas d'étude répartis entre des startups industrielles et des startups du numérique, dont les différences complexifient le travail de modélisation. Cette proposition définit une phase dite d'expansion comme étant un temps de développement de nouvelles compétences en matière de management (au sens de la gestion des collaborateurs) et de lien avec les partenaires et membres de la chaîne de valeur (clients et fournisseurs), mais il n'est pas question de développements technologique ou commercial, qui ont eu lieu dans la phase précédente. Il faut tout de même noter que ces différents travaux ne sont pas spécifiques aux startups technologiques.

De récentes recherches reprennent la littérature en cycle de vie pour proposer une déclinaison de ce champ au cas des startups deeptech. On retrouve aussi dans le propos de Schuh et al. (2022) quatre étapes de développement : le démarrage, la R&D, l'étape de croissance et l'étape avancée de diversification du portefeuille de produits. Alors que l'étape de R&D sert à fournir une preuve technique, la preuve relative au marché est fournie dans l'étape de croissance. Caractérisée par une augmentation exponentielle de la demande, cette étape, dite « *growth stage* », est en effet celle du lancement de la production. On voit déjà à travers cette littérature que l'étape de croissance ne fait pas apparaître d'efforts de conception autres que ceux liés à l'industrialisation (au sens premier où il s'agit de monter en cadence) : le produit est fonctionnel, la startup s'est a priori déjà structurée et les aspects relatifs au modèle d'affaires sont connus. Cette absence de difficultés apparentes dans la différenciation de chaque étape appelle à être vérifiée.

1.3.2. La difficile identification du démarrage du scale-up

Dès lors que l'on considère que la phase de scale-up commence après la validation du modèle d'affaires, on en déduit que la phase de test des hypothèses par des *minimum viable products* (MVP) est bien révolue ou qu'un éventuel pivot a été réalisé et n'est plus d'actualité. Ainsi l'on peut faire l'hypothèse du démarrage de la phase de scale-up dès l'arrêt de la mise au point de MVP ou de réalisation d'éventuels pivots. C'est bien ce qu'il laisse à penser à première vue qu'il n'y

a plus d'efforts de conception à fournir en face de scale-up. Mais cela vient justement en contradiction avec l'observation du maintien d'expérimentations lors de cette phase, précisé ultérieurement dans la section 3.1.3. En mettant en évidence la continuité de l'effort de conception à fournir avec la phase de scale-up, on comprend alors que l'identification du moment précis de passage à la phase de scale-up n'est pas évidente.

Un des risques soulignés par Cubero et Segura (2020) est alors celui d'un « *premature venture scaling up* », entraînant une rupture dans la croissance. Les auteurs insistent sur l'évaluation des compétences et des ressources pour la mise en œuvre de l'innovation, qui sont favorisées par un processus de transfert de connaissances adéquat. Cette thèse est reprise par Kornel (2021) qui résume : « Brûler les étapes dans la poursuite de la scalabilité rompt l'équilibre entre la conservation des ressources, l'exploration des marchés et l'innovation des produits. » (p.192) ; il ira même jusqu'à parler du risque de « l'intoxication par le capital » (p.193).

La question du financement de la phase de scale-up est aussi un élément-clé pour en déterminer son démarrage : une note écrite conjointement par les équipes de la Banque Mondiale et de Bpifrance met en parallèle, dans la figure 1, les outils classiques de financement à disposition des jeunes entreprises selon leur étape de développement (Nedayvoda et al., 2021). À l'étape du scale-up, les startups recourent principalement à des financements de projets, à des fonds de capital-risque portés par des grands groupes, à des introductions en bourse, à des acquisitions voire à des véhicules spécifiques ainsi qu'à des structures alternatives. En France, les difficultés de financement du scale-up, et *a fortiori* dans les phases avancées de développement, dites *late stage*, sont d'ailleurs un des obstacles principaux mis en évidence dans le rapport Tibi (2019) rendu au ministre de l'Économie et des Finances. Les comparaisons entre l'Europe et l'Amérique du Nord font état de cette problématique, qualifiée de « *scale-up equity gap* » par Aernoudt (2017), qui souligne l'écart entre la demande des startups et les capacités d'investissement des fonds européens de capital-risque pour ces phases avancées.

En somme, les données analysées dans le premier chapitre sur les programmes d'accompagnement des startups portés par l'État français, le FT120 et le Next40, s'appuient sur des indicateurs qui ne rendent compte d'un passage à l'échelle qu'*a posteriori* : c'est bien parce qu'il y a déjà eu une augmentation du chiffre d'affaires ou du nombre de collaborateurs, que l'on peut considérer que l'entreprise est entrée dans la phase de scale-up. Cette évaluation *ex-post* ne permet pas d'indiquer où se situe l'entreprise par rapport à la phase de scale-up (début ou fin). La preuve en est qu'il reste toujours une incertitude sur la capacité de l'entreprise à se maintenir dans cet état : on peut légitimement se demander ce que deviennent les startups quittant le programme d'une année sur l'autre. Par exemple, face à une startup qui sortirait de l'un de ces programmes, on pourrait légitimement faire l'hypothèse qu'elle n'avait pas encore atteint la phase de scale-up, et qu'elle pourrait être en mesure de réapparaître ultérieurement, alors que tous les indicateurs concordent dès la première fois.

Compte-tenu de la difficulté à déterminer le début de la phase de scale-up, nous chercherons des faisceaux d'indices indiquant le démarrage. Cela nous permettra aussi de fournir une justification la plus objective possible du positionnement dans cette phase pour une startup lorsque nous présenterons les cas d'études. Nous retenons de cette revue de la littérature sur le démarrage du scale-up qu'il s'agit d'être en mesure de prouver que le modèle d'affaires de

l’entreprise est validé et que l’entreprise cherche à réaliser un changement d’échelle. Le Tableau 7 suivant résume les trois indices sur lesquels nous nous appuyerons pour qualifier une startup deeptech en scale-up.

Tableau 7. Indices du démarrage de la phase de scale-up pour une startup deeptech

Indices d’un démarrage du scale-up	Objets de la validation	Références associées dans la littérature
Niveau des investissements ou des recherches de financement	Potentiel du ou des marchés cibles validé par un tiers	(Nedayvoda et al., 2021)
Prototypes testés ou codéveloppés avec un ou plusieurs clients	Technologie mise à l’épreuve et prise en main par un tiers	(Schuh, Studerus, et al., 2022)
Intégration au sein de programmes sélectifs ou lauréats de concours	Lancement d’une montée en cadence (visibilité, intérêt) ; gage de qualité vis-à-vis des futurs clients (aide à la constitution d’une base de clients)	(Boissin et al., 2019)

1.3.3. La proposition d’une phase de transition pour franchir les obstacles au scale-up

Compte-tenu des difficultés mises en évidence dans les paragraphes précédents, l’atteinte de la phase de scale-up présente plusieurs obstacles. Les travaux menés par Picken (2017) cherchent à expliciter ces obstacles et à définir un processus de développement les prenant en compte, entre la création de l’entité et l’existence d’une entreprise établie. L’auteur propose de regrouper les obstacles au sein d’une phase dite de « *transition* », qu’il place en amont de l’étape de scale-up. Il s’agit donc pour l’entreprise de lever chacun des obstacles avant de pouvoir prétendre à passer à l’échelle : c’est ce qu’il considère comme étant le moment où l’entreprise établit les bases d’un modèle d’affaires *scalable* (« *lay the foundation for a scalable business* », p.588). L’étape dite de « *scaling* » consiste, elle, en un ajout de ressources pour faire face à ce changement d’échelle et faire des bénéfices (« *add resources to profitably scale the entreprise* », p.588). Les huit obstacles sont formulés de la sorte (p.589) :

- « 1) *Setting a direction and maintaining focus*
- 2) *Positioning products/services in an expanded market*
- 3) *Maintaining customer/market responsiveness*
- 4) *Building an organization and management team*
- 5) *Developing effective processes and infrastructures*
- 6) *Building financial capability*
- 7) *Developing an appropriate culture*
- 8) *Managing risks and vulnerabilities* »

C’est à l’issue de cette phase de transition que les obstacles sont franchis et qu’il est alors possible de considérer le modèle d’affaires comme validé, et donc a priori reproductible. La phase de transition

serait, dans le langage de la *business model scalability*, l'étape de validation du modèle d'affaires, les obstacles correspondant aux éléments à valider.

De même, Cubero et Segura (2020) identifient plusieurs étapes préliminaires au passage à la phase de scale-up. En particulier, ils montrent que le *product-market fit*, certes nécessaire, ne suffit pas à assurer la réussite du scale-up : c'est en s'appuyant sur des premières ventes et quelques clients que l'entreprise peut plus facilement réussir son passage à l'échelle. La difficulté rencontrée au cours de cette phase de scale-up provient des fortes incertitudes portant à la fois sur le marché et sur la technologie. Romme (2022) récapitule ce propos en représentant la vallée de la mort de l'entrepreneuriat deeptech à partir d'un graphique prenant en ordonnées les ressources (de recherche et commerciales) et en abscisses le *Technology Readiness Level* (TRL), le scale-up ayant lieu après le passage par cette étape difficile et dangereuse.

Ces théories vont bien dans le sens de la difficulté de la phase de scale-up, que leurs auteurs cherchent à contourner en proposant de la faire précéder d'une étape de gestion des points difficiles. Elles ont donc l'avantage de rester compatibles avec la pensée dominante en entrepreneuriat pour laquelle le passage à l'échelle doit s'apparenter le plus possible avec la reproduction de ce qui a été précédemment validé. Toutefois, si les obstacles ont tous été franchis avant le scale-up, cela ne permet pas d'expliquer la poursuite de l'effort de conception souligné par une autre partie de la littérature (Dunford et al., 2010 ; Sanasi, 2022). Le cas de la startup DNA Script détaillé précédemment dans le chapitre 1 (section 3.2) a lui aussi déjà donné quelques indices quant à cette poursuite de l'effort de conception, qui apparaît clairement dans les activités de dépôt de brevets, s'accroissant au cours du temps, ou encore avec les développements autour du produit principal, parfois en réponse à des cas d'usage non anticipés (comme en tant que fournisseur d'ADN pour les recherches sur les tests RT-PCR pendant la pandémie de la Covid-19). En revenant aux origines de la notion de scale-up, nous cherchons à comprendre d'où provient la différence de perception relative aux efforts de conception durant cette étape.

2. Le monde du numérique aux origines de la notion de scale-up : quelle extrapolation au cas des startups technologiques ?

2.1. Le scale-up, une terminologie issue de l'informatique devenue archétypale des startups du numérique

Un bref détour sur l'origine du terme « *scale-up* » permet de recontextualiser son utilisation. Les premiers à en faire usage sont les informaticiens. Dans cette discipline, le scale-up désigne généralement la capacité d'un système à être résilient à des changements d'ordre de grandeur de la demande. Mais il s'avère que plusieurs définitions cohabitent, sans qu'une analyse rigoureuse des définitions existantes n'aboutisse à une définition universelle : Hill (1990) prône déjà l'abandon de la terminologie de « *scalability* » en informatique.

Cela n'a pas empêché la récupération de ce concept par le monde de l'entrepreneuriat, et sa démocratisation à partir d'un rapport du World Economic Forum en 2014, adaptant ainsi son

utilisation aux innovations technologiques, et en introduisant des notions d'impact positif et de création d'emplois. Ce lien initial avec le domaine de l'informatique fournit une explication originelle d'une adaptation vraisemblablement plus naturelle du concept de scale-up aux startups proposant des solutions numériques. Ces dernières sont par essence les plus à même d'acquérir en peu de temps un grand nombre de clients.

Dans la littérature en entrepreneuriat, la croissance des startups est ainsi étudiée à travers la terminologie de scale-up, pour décrire une phase de développement dans laquelle les startups : « *are past their initial exploratory phase, have found their initial product / service offering and market segment, and are entering a growth phase where they seek significant market penetration* » d'après la définition de Duruflé et al. (2017, p.1). La traduction française de scale-up, que nous utiliserons indifféremment dans la suite du propos, est celle de passage à l'échelle. L'image de l'échelle indique qu'il s'agit d'une trajectoire de croissance présentant une pente plus forte que celle d'un escalier. C'est donc la rapidité de l'atteinte de l'étape ultérieure qui est en jeu lorsque l'on spécifie une trajectoire de scale-up par rapport à l'étude de la croissance. La recherche d'une qualification du passage à l'échelle a d'ailleurs fait naître la terminologie de « gazelles » (Duruflé et al., 2017, p.1) pour mettre en évidence la rapidité de la croissance à laquelle les startups font face durant cette étape de leur développement. Si l'on file la métaphore, monter à l'échelle est aussi plus difficile que de gravir un escalier, les barreaux étant plus instables que les marches. C'est plus particulièrement cette instabilité dans la trajectoire de croissance qui nous intéressera dans la suite.

Lorsqu'il s'agit d'étudier la phase de scale-up d'une startup, la littérature cherche à déterminer si le modèle d'affaires est « *scalable* », c'est-à-dire s'il peut intégrer un grand nombre de clients pour augmenter les recettes plus rapidement que les coûts. C'est d'ailleurs cette caractéristique qui permet de différencier les « *high growth firms* » des scale-ups comme le précise Monteiro (2018) : si toutes les *scale-ups* sont des *high growth firms*, l'inverse n'est pas vrai pour autant ; c'est justement la capacité du modèle d'affaires à passer à l'échelle qui permet de différencier les *scale-ups*, c'est-à-dire les startups avec un modèle d'affaire *scalable*, des entreprises en forte croissance, qui, selon la définition classique, sont définies comparativement aux autres entreprises et donc sans préciser une typologie de croissance.

Pour saisir la phase de scale-up, plusieurs indicateurs sont mis en évidence, à commencer par l'augmentation significative des revenus tandis que les coûts augmentent plus lentement (Lund & Nielsen, 2018 ; Stampfl et al., 2013 ; Zhang et al., 2015). Les études sur le modèle d'affaires montrent une augmentation des ventes et du nombre de collaborateurs (Cavallo et al., 2019) ; quant à la littérature en entrepreneuriat, elle met aussi en évidence la croissance du nombre d'employés (Aernoudt, 2017 ; Picken, 2017) ainsi que la pénétration du marché et l'augmentation de la base de clients (Duruflé et al., 2017; Eisenmann et al., 2013). Ce dernier indicateur est plus particulièrement suivi dans le cas des startups du numérique (Huang et al., 2017 ; Stampfl et al., 2013). La phase de scale-up est aussi marquée par un fort besoin en financement, permettant à certaines études d'aller jusqu'à corrélérer la valeur financière de l'entreprise évaluée par des *venture capitalists* (VC) avec l'augmentation du nombre d'employés (Davila et al., 2003). L'étude des écosystèmes de financement permet d'ailleurs d'évoquer un « *scale-up gap* » en Europe pour expliquer la limitation de la croissance des jeunes pousses et leur départ vers des écosystèmes plus propices, comme les États-Unis (Aernoudt, 2017).

Pour comprendre ce qui permet à une entreprise d'atteindre la phase de scale-up, les travaux se sont intéressés à la conception de modèle d'affaires propices au succès. Ils sont regroupés sous le champ de la « *business model scalability* » (Lund & Nielsen, 2018). Il s'agit dès lors de concevoir ce type de modèles d'affaires.

Stampfl et al. (2013) proposent un ensemble de facteurs qui influencent le modèle d'affaires au niveau de sa conceptualisation (technologie, structures de coûts et de revenus, adaptabilité à plusieurs régimes juridiques, effets de réseau, orientation des utilisateurs) et un autre ensemble au niveau de sa réalisation (marché, attractivité vis-à-vis des investisseurs, croissance de l'entreprise, management). Néanmoins, leur revue de la littérature met en exergue que les cas d'étude des travaux de recherche sont majoritairement des startups du numérique. Notre propre recherche sur la base bibliographique Scopus²⁷ fournit des résultats similaires : 9457 articles sortent pour une recherche sur *scale-up* et *digital* tandis que l'on en obtient seulement 2284 pour *scale-up* et *technological*. Cela rend peu pertinente une extrapolation des résultats aux cas des startups technologiques, *a fortiori* deeptech.

Dans la littérature en entrepreneuriat, la méthodologie du *Lean Startup* développée par Ries (2011), ou autrement dit « *hypothesis-driven entrepreneurship* », indique clairement la difficulté à extrapoler les résultats et les méthodes développées lorsque les incertitudes technologiques sont importantes. Les startups technologiques ne sont en effet pas en mesure de réaliser des tests successifs, les MVP, suffisamment rapidement pour avoir des retours d'utilisateurs et modifier le produit en conséquence (Eisenmann et al., 2013). Les outils existants pour les startups du numérique pour construire un *scalable business model* ne sont donc pas suffisants dans le cas de technologies de rupture. L'étude du cas de Tesla Motors par Stringham et al. (2015) met justement en évidence la nécessaire adaptation de la méthodologie du *Lean Startup* dans la situation d'un nouvel entrant sur un marché extrêmement mature : par exemple, dans l'annexe, les auteurs mettent clairement en avant l'adaptation des MVP à la situation avec la définition d'une trajectoire de MVP spécifique.

Afin de saisir plus précisément les difficultés de l'extrapolation des résultats de la recherche en entrepreneuriat et sur les modèles d'affaires au cas des startups technologiques, nous allons analyser les différences entre les startups technologiques (*a fortiori* deeptech) et les startups du numérique, sur lesquelles portent ces résultats initiaux.

2.2. Différencier les startups du numérique des startups deeptech pour spécifier la gestion de leur développement

Une caractérisation des startups deeptech ayant été fournie dans le Tableau 1 (chapitre 1), il s'agit de préciser ce qui est entendu par « startups du numérique » pour comprendre pourquoi les résultats des études sur le scale-up des startups du numérique ne sont pas aisément transposables aux startups deeptech. Pour exhiber les différences, Giones et Brem (2017) définissent trois

²⁷ Recherche faite le 30/03/2023 avec les requêtes suivantes : d'une part *{scalability} OR {scale-up} AND "digital"* et d'autre part *{scalability} OR {scale-up} AND "technological" OR "high-tech" OR "deeptech"*, dans les champs « Titre de l'article, résumé, mots-clés ».

alternatives : *digital entrepreneurship*, *technology entrepreneurship* et *digital technology entrepreneurship*. On retiendra, de leur tableau 1 notamment, que les produits ou services proposés par les startups du numérique sont basés sur Internet, englobant les services dans le cloud, le big data et l'intelligence artificielle ; alors que les startups technologiques développent des produits ou des services issus d'avancées majeures dans la recherche. Le *digital technology entrepreneurship* se situant au barycentre de ces deux pôles avec des solutions basées sur des technologies de l'information et de la communication. En ce qui concerne le marché, ils considèrent que, par essence, les startups du numérique touchent potentiellement des marchés de taille importante nécessitant de passer à l'échelle, tandis que les startups technologiques se situent plutôt sur des marchés de niche. Étant donné la définition des startups deeptech, celles-ci se retrouvent bien sûr dans le groupe *technology entrepreneurship* et aussi dans le groupe *digital technology entrepreneurship* (certes moins naturellement, mais il y a bien des startups deeptech numériques).

Ce premier constat appelle à s'intéresser plus en détails aux différences entre startups deeptech et startups du numérique. En comparaison avec les startups du numérique, les ressources et les activités de conception des startups technologiques sont par essence différentes (Kollmann et al., 2021). Par exemple, les startups du numérique présentent une plus grande flexibilité dans leurs opérations puisqu'elles ne sont pas sujettes à de fortes dépenses relatives à des infrastructures ou parce qu'elles peuvent facilement avoir accès à une expertise technologique souvent internalisée (à l'inverse des startups deeptech qui maintiennent les collaborations avec les laboratoires de recherche desquels elles sont issues). Les auteurs soulignent également les différences de dynamiques de marchés, puisque les startups du numérique sont soumises à une rude concurrence et une obsolescence rapide tandis que les startups deeptech ont par définition de fortes barrières à l'entrée sur le marché limitant aussi le risque de concurrence tant l'expertise est rare.

De plus, les cycles d'apprentissages relatifs en *digital entrepreneurship* se basent principalement sur des tests rapides (Ghezzi, 2019) que les startups deeptech ne peuvent pas mettre en œuvre compte-tenu des coûts de développement. Majoritairement positionnées sur des solutions technologiques *hardware*, les startups deeptech détiennent généralement des actifs de propriété industrielle (Basilio Ruiz de Apodaca et al., 2023), contrairement aux startups du numérique pour lesquelles le dépôt de brevets est moins systématique et dont l'activité d'innovation peut suivre un modèle ouvert comme dans le cas du logiciel libre demandant alors une gestion adaptée des droits de propriété intellectuelle (Ayerbe & Chanal, 2011). Enfin, l'activité de conception relative à la R&D prend une place majeure pour les startups deeptech, qui mobilisent par nature plusieurs disciplines scientifiques (Schuh, Latz, et al., 2022) ; ce que l'on ne retrouve pas en *digital entrepreneurship*, où les startups déploient des technologies du numérique (l'interdisciplinarité est limitée).

Ci-après, le Tableau 8 reprend les caractéristiques des startups deeptech élaborées au chapitre 1 et les met en vis-à-vis de celles des startups du numérique. On note que sur la grande majorité des caractéristiques, les deux types de startups sont opposés.

Tableau 8. Comparaison des caractéristiques des startups deeptech avec celles des startups du numérique à partir de la revue de la littérature

Startups deeptech	Startups du numérique	Revue de la littérature
Une croissance limitée	Des startups en forte croissance majoritairement dans le numérique	Sur la promotion 2023 du programme Next40, 85 % des entreprises sélectionnées fournissent une solution numérique ²⁸ .
Une probabilité plus élevée de survie	De moins bons taux de survie	(König et al., 2019)
Un investissement en capital important pour palier une rentabilité tardive, grâce à la dynamique de l'écosystème de capital-risque (plus particulièrement en France)	Une trajectoire de croissance influencée positivement par le capital-risque et corrélée au montant des levées obtenues	(Cavallo et al., 2019)
Une internationalisation du marché	Marché de taille importante et enjeu d'acquisition rapide d'un grand nombre de parts de marché	(Giones & Brem, 2017)
Un long temps de pénétration du marché voire un marché à créer	Une concurrence forte et une obsolescence rapide	(Kollmann et al., 2021)
Des projets présentant des risques élevés et une incertitude importante (intrinsèque aux projets)	Deux niveaux d'incertitude : - Sur le projet au démarrage - Sur la croissance de l'entreprise	(Cavallo et al., 2019)
Des besoins en financement élevés pour la R&D	Interdisciplinarité limitée	(Giones & Brem, 2017)
Un transfert technologique du monde académique au monde industriel	Une tendance des startups du numérique à s'appuyer sur les compétences créatives des fondateurs	(Passaro et al., 2016)
Une insuffisance de la méthodologie du <i>Lean Startup</i>	Cycles d'apprentissage rapides par des tests successifs conformément au <i>Lean Startup</i>	(Eisenmann et al., 2013 ; Ghezzi, 2019)
Un écosystème interconnecté, en particulier avec le monde de la recherche	Ressources pour l'activité inventive qui ont tendance à être internalisées	(Kollmann et al., 2021)
Une dimension d'impact vis-à-vis des grands défis	<i>L'impact n'est pas un critère différenciant des startups du numérique : les applications dans le monde numérique étant particulièrement variées.</i>	
Existence d'une stratégie de gestion de la propriété industrielle	Émergence de modèles d'innovation ouverte comme le logiciel libre avec une protection intellectuelle adaptée	(Ayerbe & Chanal, 2011)

²⁸ Cette proportion est obtenue par une analyse manuelle de l'activité des 40 entreprises du programme, à partir de la liste fournie par la Mission French Tech : <https://lafrenchtech.com/fr/la-france-aide-les-startup/french-tech-120-2/>.

Compte-tenu des différences mises en évidence dans le Tableau 8, les caractéristiques souvent en opposition des startups du numérique avec les startups technologiques induisent une gestion différenciée de la phase de scale-up. Cela est d'autant plus nécessaire lorsque l'on s'intéresse aux aspects liés au marché, qui, selon la définition originelle du scale-up, sont au centre des évolutions mises en œuvre par la startup dans cette phase. Les mécanismes d'acquisition de parts de marché des startups du numérique doivent être adaptés au cas des startups technologiques. En considérant que les startups deeptech, non encore couvertes suffisamment par la littérature académique, exacerbent les caractéristiques des startups technologiques, et donc la différence avec les startups du numérique, le manque de théorisation et l'intérêt d'un approfondissement sur le cas des startups deeptech apparaissent d'autant plus clairement.

Ces quelques éléments de comparaison soulignent la pertinence d'une approche complémentaire à celle proposée par la littérature en entrepreneuriat et sur les modèles d'affaires qui ne soit pas centrée sur les cas du numérique mais permettent de prendre également en compte la dimension technologique forte (voire *hardware*) des startups deeptech. Par ailleurs, il convient aussi de préciser que la mise en évidence de ces différences ne doit pas cacher la proximité des situations rencontrées par ces deux typologies de startups : toutes deux font notamment face à la problématique de la vallée de la mort, leurs différences influençant principalement la manière de gérer ce passage compliqué (Gbadegeshin et al., 2022).

2.3. Une focalisation sur les aspects relatifs au marché insuffisante pour caractériser le scale-up des startups deeptech

Le scale-up des startups du numérique a déjà fait l'objet de nombreux travaux, permettant de fournir une description d'un passage à l'échelle « classique » qualifié à travers les indicateurs précédemment cités (dans la section 2.1) : augmentation des ventes et des revenus, augmentation du nombre de collaborateurs, ou encore fort besoin en financement. Ces indicateurs étant connus et définis, on voit dès lors l'intérêt de chercher à tendre vers un scale-up classique, indépendamment de la typologie de startups considérées. Cela apparaîtra d'autant plus clairement à la lecture des paragraphes suivants, où l'on définira le scale-up comme une phase de reproduction d'un modèle d'affaires. C'est a priori la situation la moins coûteuse pour les startups : s'il n'y a plus d'explorations à mener puisqu'il s'agit seulement de reproduire l'existant pour augmenter ses parts de marché, alors on peut y voir une phase plus simple que celles qui la précèdent.

Néanmoins, l'hypothèse de l'absence d'explorations pour les startups technologiques et *a fortiori* deeptech a déjà été réfutée, l'activité de conception (R&D notamment) ne cessant pas au moment du scale-up (comme cela a pu l'être précisé dans la section 1.3.2). La littérature grise sur les startups deeptech nous a par ailleurs enseigné dès le chapitre 1 qu'elles demandent de forts besoins en financement et plus encore au moment de leur passage à l'échelle, infirmant déjà l'hypothèse d'une simple reproduction sans explorations complémentaires. Il s'agit alors d'aller au-delà des aspects de pénétration du marché, qui sont ceux sur lesquels la littérature relative aux startups du numérique se focalise, pour déterminer les efforts à mener sur les aspects de conception produit. Cela étant, une certaine vigilance est nécessaire pour ne pas faire une opposition trop rapide entre un scale-up des startups du numérique qui se résumerait aux efforts portant sur une

validation du marché et un scale-up des startups deeptech qui consisterait à porter les efforts sur la seule technologie.

Nous verrons dans la suite du propos que les problèmes techniques rencontrés au cours du développement et en phase de scale-up par les startups deeptech rétroagissent sur l'exploration des marchés. Nous chercherons à étudier le développement des startups deeptech en prenant en considération le rapport entre la technologie et le marché : c'est cette exploration conjointe qui permet de mettre en évidence les rétroactions engendrées.

3. Le passage à l'échelle des startups vu par la littérature : les théories entrepreneuriales au service de l'adéquation entre le produit et le marché

En s'intéressant au *product-market fit*, la littérature en entrepreneuriat propose déjà de considérer le rapport entre la technologie et le marché. C'est à partir des travaux existants sur les startups du numérique que nous construisons une première vision de ce rapport. Si la littérature sur les modèles d'affaires apporte la notion de reproduction, ce sont les méthodologies classiques en entrepreneuriat qui fournissent les outils pour valider le modèle d'affaires à reproduire à partir de l'adéquation du produit développé avec le marché ciblé. La simplicité apparente du mécanisme ne doit pas cacher les nombreux obstacles rencontrés par les startups du numérique lors de leur passage à l'échelle. Compte-tenu des différences entre les startups du numérique et les startups technologiques, on est en mesure de penser que les difficultés seront exacerbées pour les startups deeptech.

3.1. Caractérisation à partir de la littérature sur la *business model scalability* : la validation d'un modèle d'affaires, un passage obligé

Pour s'accorder sur le terme de *business model* ou, en français, de modèle d'affaires, nous nous référons à la définition donnée par Zott et Amit (2010) à partir d'une revue de la littérature. Pour résumer, nous en retiendrons que le modèle d'affaires correspond à l'ensemble des activités d'une entreprise, ainsi qu'à leur structuration et à leur gestion, réalisées en vue de créer de la valeur à partir d'opportunités d'affaires. Osterwalder et Pigneur (2010) ont proposé de visualiser les principaux éléments du modèle d'affaires dans une structure dénommée « *business model canvas* », qui est un outil désormais largement déployé.

3.1.1. La reproduction d'un modèle d'affaires validé comme définition du scale-up

La définition du scale-up comme reproduction d'un modèle d'affaires validé est principalement issue des travaux sur le *Lean Startup*, menés par Ries (2011), repris notamment par Lund et Nielsen (2018) dans leur article sur le concept de la *business model scalability*.

À ce stade du propos, un court détour lexicographique peut se révéler utile pour expliciter l'expression « reproduction d'un modèle d'affaires » et en esquisser les limites. En effet, si l'on se réfère à l'expression en anglais, à savoir « *business model replication* » (Aspara et al., 2010 ; Dunford

et al., 2010), on retrouve dans cette terminologie la notion de copie identique avec le terme « *replication* », utilisé comme tel dans le langage courant mais également en biologie où il renvoie à la copie exacte de matériel génétique. Il est légitime de se demander pourquoi il ne lui a pas été préféré le terme de « *reproduction* » : ce dernier renvoie également à une notion en biologie, la naissance d'un nouvel être vivant, ainsi qu'à la copie d'un processus ou d'une chose sans mention toutefois de l'exactitude de la copie vis-à-vis de l'original. C'est donc la précision de la copie qui différencie « *replication* » de « *reproduction* ». En français, cette nuance n'existe pas, le terme de « *réplication* » ne renvoyant qu'à la définition en biologie²⁹ ; ce qui explique que la traduction la plus proche soit celle de « *reproduction* ». Le français entend, par « *reproduction* », à la fois la même notion biologique relative à la création d'un nouvel être vivant, semblable à ceux dont il est issu, ainsi que la réalisation d'une copie ou d'une imitation. Cette nuance sur la précision devrait nous conduire à user d'une traduction plus fidèle qui serait « *reproduction exacte du modèle d'affaires* ». En faisant le choix d'alléger le propos en nous émancipant de cette précision, nous questionnons déjà la réalité pratique de l'exactitude de la reproduction d'un modèle d'affaires. En outre, cette considération sémantique amène à penser que l'élément-clef de la reproduction est l'objet reproduit, la mesure de l'exactitude de la reproduction se faisant après l'atteinte d'un état qui serait final (par exemple à travers la comparaison des deux modèles d'affaires établis). Les choix sémantiques ferment déjà le débat relatif à une reproduction qui porterait non plus sur le modèle d'affaires mais sur le processus de construction de ce modèle d'affaires. Cette deuxième nuance est d'autant plus frappante qu'en français le vocable de « *réplication* » définit un processus biologique. Cela nous conduit alors à reconsidérer la possibilité de réaliser la reproduction du modèle d'affaires sur le processus de conception de modèles d'affaires.

Précisons par ailleurs ce que la littérature entend sous cette notion de reproduction. Lorsqu'il s'agit de mettre en place une stratégie de reproduction d'un modèle d'affaires, il est notamment question de transferts de connaissances effectués à large échelle (Winter & Szulanski, 2001). Ces transferts engendrent des modifications substantielles de l'organisation (cible) ; tandis qu'à petite échelle, les transferts peuvent s'effectuer en interne. On distingue donc des reproductions qui portent sur des pratiques transférées au sein d'une même organisation ou au niveau d'un ensemble d'organisations. Baden-Fuller et Winter (2008) proposent ainsi un cadre analytique pour qualifier ces reproductions, qu'ils distinguent entre celles basées sur des « *principles* », qui cherchent à répondre à la question « *pourquoi ?* », et celles basées sur des « *templates* », répondant à la question « *comment ?* ». On retrouve la prédominance de la question « *comment ?* » et l'absence de la question « *pourquoi ?* » dans l'approche *Lean Startup* à travers la liste des questions relatives au modèle d'affaires proposée dans la note d'Eisenmann (2012). Une étude du modèle d'affaires selon le cadre « *principles* » pourrait enrichir la vision majoritairement répandue.

Cette définition du scale-up comme reproduction d'un modèle d'affaires validé soulève également plusieurs questions autour de la validation : qu'est-ce que valider ? Qui en a la charge ? Comment valide-t-on ? Bertucci Ramos et Pedroso (2022) fournissent quelques pistes à partir de

²⁹ Définition de « *réplication* » dans le dictionnaire Larousse : « Duplication de la molécule d'ADN en vue d'une division cellulaire. » (cf. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/réplication/68412>)

leur étude de 12 startups brésiliennes proposant des technologies au service de l'agriculture (Agtech) : les startups en scale-up présentent un modèle d'affaires validé et spécifique à la « *market traction* ». La validation du business model a lieu parce qu'on observe une augmentation du nombre de clients, des volumes et des montants des ventes. Cela nous amène à nous intéresser plus en détails aux dimensions du modèle d'affaires qui font l'objet de validation.

3.1.2. Les dimensions du modèle d'affaires sur lesquelles portent les validations

À partir d'une revue détaillée de la littérature, nous mettons en évidence dans le Tableau 9 ci-après les dimensions sur lesquelles portent les validations du modèle d'affaires. La grille d'analyse proposée a été élaborée à partir des axes d'intérêt principaux soulignés par la littérature sur les modèles d'affaires, et en particulier à partir des articles suivants : Demil et al. (2018) et Lecocq et al. (2006). Afin de préciser les dimensions déterminées et d'en saisir le périmètre, nous détaillons chacune grâce à une catégorisation plus fine. La dernière colonne indique les références de la littérature à partir desquelles ces catégories ont été élaborées. Par exemple, le modèle de *business model conceptualization* établi par Stampfl et al. (2013) rend visible les « *ingredients* » ou facteurs (qui s'excluent mutuellement) utiles à l'élaboration d'un modèle d'affaires : ils sont ainsi précisés dans cette dernière colonne ; tout comme les différents obstacles mis en évidence par Picken (2017) et à franchir durant la phase de transition précédant celle de scale-up.

Nous retenons de cette grille d'analyse que le travail de validation du modèle d'affaires consiste à lever les verrous relatifs à chacune des dimensions déterminées dans la première colonne du Tableau 9. C'est la recherche de ces verrous qui nous a amenés à construire notre propre grille d'analyse au lieu de se référer uniquement à des travaux déjà conduits. En effet, Massa et al. (2017) ont déjà mis en évidence plusieurs interprétations du modèle d'affaires, vu comme une donnée empirique, un schéma cognitif ou une représentation formelle des activités. La diversité des interprétations, qui va jusqu'à l'existence de plusieurs représentations formelles, est déjà une preuve de la difficulté à définir les modèles d'affaires. La vaste revue de la littérature conduite par Massa et al. (2017) fournit une validation de notre propre grille, puisque toutes les dimensions citées ci-après sont retrouvées dans leurs propos.

Pour valider le modèle d'affaires, il faut que l'ensemble des verrous liés à ces dimensions ait été levé, ce qui revient à obtenir une description particulièrement précise de la proposition de valeur et à limiter sa variabilité. Par conséquent, on peut s'interroger sur la place laissée à l'incertain et *a fortiori* à l'inconnu : ce niveau de validation est-il raisonnablement atteignable ? L'entreprise ne fait-elle toujours pas face à d'importants inconnus après la validation de son modèle d'affaires ?

Tableau 9. Dimensions classiques selon l'approche *business model*, détails des définitions des dimensions et correspondances avec la littérature

Dimensions classiques du <i>business model</i>	Détails	Références dans la littérature
Clients	Positionnement marché et concurrentiel	Duruflé et al. (2017) ; Picken, (2017) (obstacles 2 et 3)
	Produits ou services (proposition de valeur)	Demil et al. (2018) ; Duruflé et al. (2017) ; Stampfl et al. (2013) (<i>costs and revenue structure & user orientation</i>)
	Clients	Demil et al. (2018) ; Stampfl et al. (2013) (<i>network effects</i>)
Organisation de l'entreprise	Coordination de l'activité collective	Picken (2017) (obstacles 1 et 4)
	Compétences	Demil et al. (2018)
	Dimension identitaire (mission, objectifs)	Picken (2017) (obstacle 7)
Chaîne de valeur	Chaîne de valeur existante	Lecocq et al. (2006)
	Fournisseurs	Lecocq et al. (2006)
	Distributeurs	Lecocq et al. (2006) ; Zhang et al. (2015)
Réseaux / Parties prenantes	Acteurs de l'accompagnement et institutions	Picken (2017) (obstacle 6)
	Investisseurs et conseillers	Picken (2017) (obstacle 6)
	Autres parties prenantes / réseaux	Demil et al. (2018)
Conception technique	Maturation technologique	Eisenmann et al. (2013) ; Stampfl et al. (2013) (<i>technology</i>)
	Portefeuille de brevets (ou stratégie de propriété industrielle)	Eisenmann et al. (2013)
	Proofs of concepts / démonstrateurs	Ries (2011)
Règlementation	Droit et évolutions	Stampfl et al., (2013) (<i>adaptability to different legal regimes</i>) ; Schuh, Latz, et al. (2022) (<i>bureaucratic and legal hurdles for technology transfer</i>)
	Régulateurs	Schuh, Latz, et al., (2022) (<i>regulatory uncertainties</i>)

3.1.3. Évolution du modèle d'affaires et expérimentations en scale-up, des indices d'une reproduction pas toujours fidèle

Pour se rapprocher de notre objet de recherche, intéressons-nous au cas des jeunes entreprises issues du monde académique, appelées spin-off des universités. Bigdeli et al. (2016) soulignent d'une part le peu de travaux académiques relatifs à l'évolution du modèle d'affaires des spin-off des universités. Ces jeunes entreprises partageant au moins un critère commun avec les startups deeptech, à savoir le lien étroit avec le monde de la recherche, les résultats de cette étude peuvent contribuer à apporter un autre éclairage sur le développement des startups deeptech. Les auteurs mettent d'autre part en avant l'évolution du modèle d'affaires tout au long des différentes phases de développement, et ce jusqu'à l'atteinte d'un passage à l'échelle sur le plan opérationnel : le modèle d'affaires reste longtemps en évolution, et ses modifications sont liées aux changements structurels dans l'organisation. Ce sont plus particulièrement sur ces aspects de structure de l'organisation que nous allons porter notre attention par la suite.

De récents travaux (Sanasi, 2022) mettent justement en évidence la poursuite des expérimentations au cours de la phase de scale-up et explicitent leur influence sur la structure de l'organisation. Ces expérimentations peuvent en particulier porter sur le modèle d'affaires (sur des points spécifiques) et influencer la structure de la startup lors de cette phase de scale-up pour assurer le déploiement des ressources issues des apprentissages relatifs à ces expérimentations. C'est la complexité grandissante à laquelle les startups font face durant cette phase, et même après la validation du modèle d'affaires, qui fournit un indice clair quant à la poursuite des expérimentations (Sanasi, 2023). Dunford et al. (2010) montrent aussi que cette notion d'expérimentations au niveau du *business model* se retrouve au moins sur les aspects optionnels du modèle lorsqu'il s'agit d'entrer dans une phase d'internationalisation (ce qui reste une forme de passage à l'échelle).

En s'intéressant à la reproduction des modèles d'affaires, Winter et Szulanski (2001) soulignent que cette reproduction nécessite en elle-même des efforts d'exploration en plus d'impliquer des transferts de connaissances qui doivent être gérés. Cette vision du scale-up comme phase propice aux transferts de connaissances est partagée par Shepherd et Patzelt (2021) qui proposent une modélisation du scale-up à partir de ces transferts : certains mécanismes pouvant jouer sur le scale-up, et inversement, le scale-up pouvant influencer la capacité de l'entreprise à réaliser ces transferts.

Loin d'une représentation figée d'un modèle d'affaires à reproduire, la littérature donne déjà à voir les évolutions d'un modèle d'affaires en constante redéfinition. Nous soutenons l'hypothèse que ces évolutions et les expérimentations associées sont susceptibles de porter sur l'architecture de l'organisation qui déploie ce modèle d'affaires ainsi que sur la conception de cette architecture. Quoiqu'il en soit, il serait réducteur d'associer à chaque organisation un unique modèle d'affaires.

3.1.4. Une stratégie de diversification : la constitution d'un portefeuille de modèles d'affaires

D'autres travaux s'intéressent au cas où les entreprises gèrent simultanément plusieurs *business models* dans le but de générer plus de revenus. La diversification des modèles d'affaires est

un des types de diversification recensés par Aversa et Haefliger (2015) et vus comme un moyen de croissance pour l'entreprise. En considérant que le modèle d'affaires cherche à créer, proposer et capter de la valeur, Gandia et Parmentier (2021) s'intéressent aux connexions entre modèles d'affaires pour assurer une synergie dans la création ou la proposition de valeur, en gardant l'objectif d'une meilleure captation de la valeur. C'est ce que l'on trouve sous le vocable de portefeuille de *business models*.

Faisant état d'une absence d'analyses relatives à leur architecture, les auteurs cherchent alors à comprendre les processus de gestion de la conception de ce type de portefeuilles, à partir de trois cas dans le domaine du numérique. Ils en déduisent trois principes stratégiques : le développement d'une offre modulaire de produits ou services, l'adoption d'une plateforme multiface et la structuration hiérarchique des modèles d'affaires. La notion de plateforme multiface renvoie à des propositions de valeur complémentaires sur des segments de marché différents. Cela ouvre la voie à la question de la conception de modèles d'affaires de plateforme. Compte-tenu des cas d'études choisis par les auteurs (Apple, Google et Microsoft), on en retient que l'apparition de portefeuilles de modèles d'affaires est plutôt tardive dans le cycle de développement des entreprises. Nous essayerons de déterminer par la suite dans quelle mesure la phase de scale-up peut être une phase préparatoire à la constitution d'un portefeuille de modèles d'affaires futur, gage de la pérennité à long terme de la startup.

Nous retiendrons de la littérature sur la *business model scalability* que le scale-up ne peut commencer qu'à la condition d'avoir validé un modèle d'affaires. Ce dernier peut tout de même continuer à évoluer et des expérimentations ont lieu durant la phase de scale-up, pouvant aller jusqu'à réaliser une diversification des modèles d'affaires. Il s'agit à présent d'indiquer les méthodes de validation du modèle d'affaires.

3.2. L'apport de la méthodologie du *Lean Startup* pour le passage à l'échelle : des outils pour la validation du modèle d'affaires

3.2.1. L'atteinte du *product-market fit* comme objectif principal

L'approche *Lean Startup*, introduite par Ries (2011) et précisée par Eisenmann et al. (2013), considère que le scale-up démarre lorsque le produit a rencontré son marché, ce que l'on appelle le *product-market fit* : « *product that profitably meets the needs of the target market's customers* » (p.1). Il est dès lors possible de reproduire le *business model* qui a été validé.

Le processus d'atteinte du *product-market fit* est également explicité dans le *Customer Development model* proposé par Blank et Dorf (2012). Les deux des quatre étapes qu'ils décrivent servent justement à rechercher le modèle d'affaires adéquat à partir de la définition d'hypothèses et la mise en place d'itérations sur les produits. Ces itérations peuvent conduire à effectuer un pivot, ce qui consiste à recommencer le processus. C'est dans un deuxième temps que l'on passe à l'exécution du modèle d'affaires, d'abord sur un nombre restreint de clients puis à plus grande échelle lorsqu'un modèle d'affaires répétable et « *scalable* » a été validé. Les auteurs précisent que ce processus est aussi valable dans le cas où la startup cherche à créer un nouveau marché, c'est-à-dire

lorsqu'il est au départ inconnu. Dans cette situation, la mise en œuvre du processus est bien sûr plus complexe puisqu'il est plus difficile de créer la demande et d'obtenir des retours d'utilisateurs.

Synthétisant le *Lean Startup* et le *Customer Development*, Ghezzi (2019) récapitule un ensemble de pratiques dans les « *Lean Startup Approaches* ». Il montre d'une part que les startups du numérique adoptent massivement ces méthodes et en retirent de nombreux avantages en particulier lorsqu'il s'agit d'atteindre le *product-market fit*. D'autre part, il ne nie pas non plus les difficultés rencontrées comme lors de la définition des MVP ou la définition et la conception des tests.

Les pratiques entrepreneuriales relatives aux premières phases de développement cherchent donc à valider la rencontre d'un produit avec un marché. C'est une étape considérée comme nécessaire à la réalisation d'un passage à l'échelle ultérieure. Plus les éléments de preuve de cette rencontre seront nombreux, plus la startup maximise ses chances de réussir le scale-up. Le point critique réside donc au niveau de la validation des hypothèses élaborées à travers les différents tests mis en place.

L'approche *Lean Startup* met en évidence deux mécanismes pour atteindre la validation du modèle d'affaires et *a fortiori* cette phase de scale-up : le test d'hypothèses à travers la constitution d'un produit avec un ensemble minimal d'activités, les MVP, et le pivot, « *to a revised model that changes some model elements while retaining others* » pour reprendre les définitions données par Eisenmann et al. (2013, p.1). En revanche, si les tests d'hypothèses à travers l'élaboration de MVP successifs ne sont pas concluants, on ne peut pas considérer que le *business model* ait été validé. Il faut alors repenser le modèle et les ressources nécessaires à sa mise en œuvre, ce qui peut amener la startup à effectuer un véritable pivot pour son deuxième produit.

3.2.2. Tester les hypothèses constitutives du modèle d'affaires avec des *minimum viable products* successifs

L'un des apports principaux de l'approche *Lean Startup* (Ries, 2011) pour les praticiens est celui de la boucle *Build-Measure-Learn*. L'idée majeure portée par cette boucle de rétroaction est de fournir le produit, même « minimal », le plus rapidement possible à des potentiels utilisateurs de façon à recueillir de leur expérience les retours nécessaires à la construction progressive du produit qui offrira la meilleure satisfaction au marché visé. Il s'agit d'un MVP.

Ries (2011) précise par ailleurs la différence entre un MVP et une preuve de concept (abrégée en PoC pour *Proof of Concept*). Quand le premier concept sert à diminuer le risque au niveau du business, le second est focalisé sur la validation de considérations techniques. En faisant cette distinction, l'auteur du *Lean Startup* sépare les validations relatives au marché et celles relatives à la technologie. Cette opposition est contestée par Jobin (2022) qui souligne la limite d'une telle séparation puisque dans un contexte fortement technologique, les risques liés au marché ne peuvent être dissociés des considérations techniques. La généalogie de la notion de PoC proposée par Jobin et al. (2020) met en exergue le glissement d'un recours au vocable de la preuve de concept réservé à des considérations techniques, conformément aux premiers usages faits par la NASA, à une utilisation des PoC comme un moyen de tester le marché en fournissant un prototype à des utilisateurs pionniers. Il est possible de considérer que la preuve de concept passe par l'élaboration d'un MVP, puisque la preuve de concept peut servir à tester des hypothèses portant sur des éléments

du modèle d'affaires, comme les clients, la concurrence ou le marché et donc bien au-delà des seules questions techniques. En outre, les preuves de concept ont la capacité de réaliser deux types de preuve : soit les expérimentations sont conduites pour valider des connaissances à la suite d'une exploration, soit les expérimentations sont utiles à l'élaboration d'explorations périphériques, mettant ainsi au jour des variables inconnues. Démontrant ce double rôle de la preuve de concept, Jobin et al. (2021) parlent de preuve de connu dans le premier cas, et de preuve d'inconnu dans le second. Le rôle des PoC s'est ainsi considérablement enrichi, c'est pourquoi nous ne différencierons pas les PoC et les MVP.

Qu'il s'agisse de la mise en place de MVP ou de PoC, la littérature met l'accent sur l'intérêt des tests et des itérations dans la validation des différentes hypothèses. Quand bien même des outils pour la validation des hypothèses constitutives du modèle d'affaires ont été pensés, la complexité des produits développés par les startups deeptech reste difficilement compatible avec la réalisation de cycles de PoC ou MVP successifs pour le test de ces hypothèses, comme précisé auparavant dans la section 2.1.

Par ailleurs, si les MVP sont considérés comme étant des outils pour préparer le scale-up, leur utilité va au-delà. Duc et Abrahamsson (2016) mettent en évidence le triple rôle potentiel des MVP comme des artéfacts de communication, des artéfacts de conception voire des artéfacts réutilisables. Lieux de l'expérimentation en phases initiales, les MVP devenus réutilisables laissent à penser que les expérimentations se poursuivent après l'entrée en scale-up. Cette vision du rôle des MVP donne déjà une trace des efforts de conception à fournir en scale-up.

3.2.3. Les pivots, un exemple de la difficulté à atteindre le scale-up

C'est face à l'impératif du maintien simultané d'une flexibilité basée sur l'innovation et d'une ligne directrice nécessaire à la construction d'un modèle d'affaires pérenne pour passer à l'échelle, que le concept de pivot fait son apparition. Crilly (2018) met en évidence le rôle du pivot dans cette balance entre flexibilité et persistance en proposant plusieurs facteurs qui peuvent influencer l'entrepreneur à recourir à un pivot. L'auteur souligne aussi le lien entre pivot et fixation, en particulier lorsqu'il s'agit de « *design fixation* », en opposition avec un « *creative design* » caractéristique de l'activité entrepreneuriale. Grimes (2018) propose la terminologie de « *creative revision* » pour qualifier le pivot et la tension au sein de laquelle il émerge.

Vus comme un moyen de rebondir pour concevoir un modèle d'affaires plus en phase avec les résultats des tests d'hypothèses réalisés dans les premières étapes de développement, les pivots sont usités par les entrepreneurs dans le but d'atteindre la phase de scale-up, selon l'approche *Lean Startup* (Ries, 2011). À chaque nouveau pivot effectué, l'entreprise tend vers un modèle d'affaires qui se veut être de plus en plus viable (Kornel, 2021, p.115). En s'intéressant de plus près aux différents types de pivots ainsi qu'à leurs déclencheurs, Bajwa et al. (2017) en montrent toute la complexité, que ce soit vis-à-vis de la prise de décision et de leur mise en œuvre. Cela n'empêche pourtant pas que les startups du numérique soient sujettes, presque inévitablement, à la question du pivot, comme les auteurs le précisent dès l'introduction : « *The validated learning obtained through failing fast and failing often leads software startups to making the strategic change of a business concept, product, or different elements of a pivot business model.* ».

En outre, Hampel et al. (2020) indiquent que la radicalité des changements induits par un pivot peut aller jusqu'à influencer la gestion des parties prenantes externes. Ces dernières pouvant jouer un rôle dans la croissance future de l'entreprise, les auteurs soulignent la nécessité de disposer d'un processus pour les identifier et pour limiter les risques ultérieurs liés aux ressources de ces parties prenantes. L'intérêt d'une étude plus approfondie des pivots est donc tout à fait justifié pour limiter ces risques qui iraient à l'encontre de la dynamique de passage à l'échelle. La modélisation proposée par McDonald et Gao (2019) apporte également un éclairage sur la gestion nécessaire de telles réorientations stratégiques qui ont des conséquences sur les premiers principes directeurs et plus particulièrement sur les premiers clients et le public-cible. Les changements radicaux induits par un pivot jouent donc sur l'un des indicateurs principaux de la phase de scale-up, à savoir la base de clients. Le recours à un ou plusieurs pivots peut donc influencer sur cette phase.

Ainsi, la mise en œuvre d'une stratégie basée sur un ou plusieurs pivots ne fournit pas de garantie quant à la capacité à passer à l'échelle, voire engendre des difficultés supplémentaires auxquelles il faut ensuite faire face. Des travaux relatifs aux cycles de validation ont justement mis en évidence les risques générés par des pivots trop importants ou fréquents (Anderson et al., 2017). D'une part, les coûts de réingénierie induisant une augmentation des coûts de marketing, les pivots de grande ampleur peuvent conduire à des situations critiques pour les entreprises. D'autre part, l'entreprise peut surréagir à des signaux suspects du marché si les itérations sont trop fréquentes. Bien que les difficultés aient été plus spécifiquement considérées par rapport à des cas de startups du numérique, les auteurs précisent qu'elles sont exacerbées dans le cas d'entreprises avec de fortes capacités d'ingénierie, ce qui est le cas des startups deeptech. Les aspects technologiques rajoutent en effet des contraintes dans cette tension entre flexibilité et persévérance, et donc complexifient le processus de pivot.

3.3. Enrichir la perception du scale-up des startups deeptech avec des méthodes complémentaires

La littérature en entrepreneuriat fournit une vision du scale-up sous le prisme des méthodes données par le *Lean Startup* et le champ de la *business model scalability*. Étant donné que les auteurs de ces champs précisent, sur le plan théorique comme à partir de leur expérience sur le terrain, que leurs résultats sont relatifs aux cas de startups du numérique, l'intérêt d'un enrichissement de cette perception apparaît clairement. Il convient toutefois de modérer notre propos sur le recours limité à la littérature en entrepreneuriat pour les cas d'entreprises technologiques. En effet, en s'intéressant aux fondements de l'approche du *Lean Startup*, Bortolini et al. (2021) remarquent qu'elle s'inspire très largement des principes et des méthodes portés par la *Lean Philosophy* qui s'est déployée dans un premier temps dans un contexte industriel. Les auteurs mettent aussi en évidence la proximité avec la *Learning School of Strategy* qui s'exprime au niveau de l'apprentissage, des expérimentations et du management de projets complexes et incertains. Si l'approche *Lean Startup* s'est spécialisée vers les startups du numérique, il n'en reste pas moins que ses fondements ouvrent la voie à un usage élargi.

Après le succès mondial de l'ouvrage de Ries (2011), aucune autre méthode que le *Lean Startup* et la boucle *Build-Measure-Learn* n'a été proposée pour gérer les expérimentations en

scale-up. Nous cherchons donc à apporter à cette revue de la littérature des méthodes complémentaires pour définir une expérimentation réussie en scale-up ainsi que des notions permettant de relier les aspects marchés des aspects technologiques, ce rapport entre la technologie et les marchés étant un élément-clef de l'étude des startups deeptech.

En effet, la seule considération d'un *product-market fit* est insuffisante compte-tenu des inconnus auxquels les startups deeptech font face. Le premier produit conçu par une startup deeptech sert de preuve pour valider la technologie dans une situation réelle : au lieu d'être représentatif d'un ensemble de produits, il porte une dimension fortement exploratoire. De même, le marché a priori validé par ce premier produit correspond à un client ou un usager : compte-tenu du niveau technologique très élevé caractéristique d'une innovation portée par une startup deeptech, il est légitime de se questionner sur la représentativité de cette première expérience client. L'adéquation entre le produit et le marché est par ailleurs atteinte grâce aux collaborations rapprochées mises en œuvre pour concevoir une solution technologique pour un problème donné. Dès lors, rien n'indique si le problème ainsi résolu est commun à un ensemble d'acteurs, vus comme des clients potentiels.

Si la reproduction de ce premier *product-market fit* ne semble pas aisée à première vue, la réalisation d'une première solution est déjà l'occasion d'apprentissages multiples. C'est plus particulièrement cette accumulation de connaissances et de savoir-faire que nous allons chercher à mettre en lumière pour caractériser le scale-up. La prise en compte de la difficulté à identifier le démarrage de cette phase conduit à reconsidérer la définition du scale-up dont l'élément déclencheur réside dans l'adéquation du produit et du marché. C'est préférentiellement à partir d'un changement dans le régime d'apprentissages ou d'exploration que nous chercherons à caractériser le scale-up.

4. Introduire un nouveau cadre d'analyse à partir de la notion de préservation

4.1. Intérêt du concept de routines issu du champ de l'apprentissage organisationnel

Un bref détour par le champ de l'apprentissage organisationnel montre que l'histoire de l'organisation influence les routines mises en œuvre. Selon Levitt et March (1988, p.320), « *organizations are seen as learning by encoding inferences from history into routines that guide behaviour* ». Ils précisent que par « *routines* » ils entendent les formes, les règles, les procédures, les conventions, les stratégies, les technologies, la structure des croyances, les structures, les codes, les cultures, les connaissances, etc. Ce même concept est développé par Nelson et Winter (2002, p.39) qui le définissent à partir de : « *evolutionary, institutional and sociological perspectives converge in the view that individual and organizational behavior tends to be governed by engrained, taken-for-granted patterns—what we call routines* », et pour qui les entreprises technologiques sont également soumises à un processus évolutif. Pour résumer les propriétés des routines, Becker (2004) considère qu'elles permettent la stabilité, stockent les connaissances et réduisent l'incertitude pour les décisions futures.

Nous retiendrons de ce concept de routines que la structure de l'organisation dans son ensemble est modelée par le cumul des expériences passées. Au-delà d'une architecture figée par ces règles, la routine prend en compte la dimension évolutive du processus dans lequel l'entreprise est engagée. Vu comme une sorte de préservation, le concept de routines motive notre intérêt pour poursuivre le développement du propos dans cette voie. En revanche, la forte dépendance des routines à la trajectoire déjà réalisée (donc passée) de l'entreprise limite leur emploi dans le cadre de startups ayant une histoire encore peu étoffée. Le cadre d'analyse construit doit aussi prendre en compte cette limitation intrinsèque à l'étude de jeunes entreprises, pour lesquelles la structuration de l'organisation apparaît au moment du passage à l'échelle.

L'enjeu de structuration est d'autant plus pertinent qu'en amont de cette étape de forte croissance, les startups sont généralement de petites entreprises. On retrouve alors les tiraillements évoqués par Fombrun et Wally (1989) dans le cas de la croissance rapide de petites entreprises et par Maidique et Hayes (1984) pour des entreprises high-tech. La tension entre la bureaucratiation liée à la formalisation des processus accumulés et à leur hiérarchisation, et la nécessaire prise de risques caractéristique de la capacité d'innovation fait partie des défis à relever. Dans la suite du propos, nous tâcherons d'exprimer cette tension en termes de conception dans le but de construire un cadre d'analyse plus spécifique aux startups deeptech.

4.2. Assurer une spécificité comme avantage concurrentiel : la tension entre préservation et création

La phase de scale-up se caractérisant par des besoins élevés en financement, les startups sont amenées à rechercher des fonds. Un des importants défis à relever est alors celui de convaincre des investisseurs, eux-mêmes à la recherche d'entreprises à la proposition de valeur prometteuse : c'est à travers leur identité entrepreneuriale propre que les startups peuvent se démarquer. Elles ont alors tout intérêt à démontrer dans leur présentation qu'elles ont à la fois une solution fortement différenciante tout en donnant un positionnement concurrentiel pour asseoir leur légitimité. Van Werven et al. (2015) explicitent les arguments à fournir pour insister sur la légitimité, la distinction ou les deux auprès de parties prenantes externes, comme des investisseurs, à partir du concept de « *legitimate distinctiveness* » introduit par Navis et Glynn (2011). Ces derniers proposent en effet à travers ce concept de modéliser l'identité entrepreneuriale et de rendre visible une tension caractéristique de l'activité entrepreneuriale. Pour convaincre, la startup cherche à la fois à se conformer aux attentes institutionnelles (*legitimate*) et à garantir une spécificité (*distinctiveness*), qui trouve son origine dans la nouveauté ou l'innovation de la proposition de valeur. En d'autres termes, la startup en phase de scale-up gère simultanément la préservation de ses capacités de conception et le développement de sa capacité d'innovation, l'ensemble des deux constituant son identité propre et devant garantir sa légitime distinction.

Dans le cas des startups deeptech, la notion de légitime distinction pourrait également être utile pour qualifier le positionnement vis-à-vis de la réglementation. Comme les startups deeptech apportent des solutions en rupture, les acteurs concurrents sont peu voire très peu nombreux. Plusieurs technologies proches pouvant conduire à une solution identique, la différenciation peut se faire au niveau du processus technique mis en œuvre ou des choix relatifs au modèle d'affaires.

Dans un certain nombre de cas, la légitimité de l'entreprise s'acquiert si elle respecte les contraintes réglementaires de mise sur le marché du produit. Ces dernières n'existant a priori pas compte-tenu de la nouveauté de la proposition de valeur, la startup a tout intérêt à faire en sorte que son modèle de développement devienne la référence vis-à-vis des régulateurs et des enjeux réglementaires. De cette façon, les attentes institutionnelles sont satisfaites et la startup garde une longueur d'avance sur les autres parties prenantes de sa catégorie tout en poursuivant son développement.

La théorie basée sur les ressources introduite par Barney (1991) met en exergue des critères pour juger de l'avantage compétitif durable (« *sustained competitive advantage* ») : l'entreprise doit s'assurer d'acquérir des ressources : avec de la valeur, c'est-à-dire qui permettent d'améliorer l'efficacité ; rares, et donc acquises par un petit nombre d'entreprises ; imparfaitement imitables, dans le sens où elles confèrent une avance concurrentielle ; et non substituables par une autre ressource. Ces ressources entraînant un avantage compétitif peuvent être considérées comme des capacités distinctives. En outre, la spécificité est plus particulièrement mise en évidence à travers l'importance accordée à l'histoire de l'entreprise. Des travaux récents (Breuillot et al., 2022) font usage de cette théorie pour identifier les ressources nécessaires tout au long du processus d'internationalisation d'entreprises à internationalisation précoce (dont des startups). Ce déploiement à grande échelle fait apparaître une phase de transition au cours de laquelle les entrepreneurs dessinent la structure organisationnelle de leur entreprise : celle-ci possède alors « *a solid base of capabilities that enable it to grow, cultivate, and reconfigure diverse resources and capabilities* » (p.301). Pour les phases ultérieures, ces capacités sont des ressources-clefs, qui doivent donc être préservées. Néanmoins, la théorie dite « *resources-based view* » ne prend pas forcément en compte la dynamique à laquelle l'entreprise est soumise et l'évolution même des ressources et compétences développées (Priem & Butler, 2001).

La notion de « *dynamic capabilities* » introduite par Teece et al. (1997) met en lumière la nécessité d'un compromis entre le développement de ce qui fait l'objet d'une spécificité et la poursuite d'une trajectoire de développement en partie héritée des choix passés. Ils définissent les capacités dynamiques comme étant : « *the firm's ability to integrate, build, and reconfigure internal and external competences to address rapidly changing environments* » (p.516). C'est la reconfiguration des ressources et des connaissances existantes qui est à l'origine de l'innovation, et pas seulement la création de nouvelles ressources ou connaissances. La tension entre préservation et création, qui porte sur les ressources et les connaissances, est alors gérée par l'entreprise grâce à ses capacités dynamiques. Eisenhardt et Martin (2000) précisent que ce compromis entre la préservation d'anciennes ressources et la création de nouvelles a plus particulièrement lieu au niveau de la gestion des ressources à disposition des dirigeants pour déterminer leur trajectoire de création de valeur, c'est-à-dire sur le plan des processus managériaux. Selon Randhawa et al. (2021), les *dynamic capabilities* sont aussi à relier avec le *business model innovation*, puisqu'elles sont en mesure d'apporter des innovations dans le modèle d'affaires, au niveau de sa conception et de son architecture : elles sont alors plutôt positionnées sur le plan organisationnel. Il s'agit dès lors de comprendre ce qui doit être modifié ou non dans le modèle d'affaires pour assurer le passage à l'échelle, ce qui nécessite d'intégrer à la fois une analyse organisationnelle vis-à-vis du modèle d'affaires et une analyse managériale pour sa mise en œuvre.

Cette tension caractéristique entre préservation et création demande à être dépassée : le recours aux théories de la conception innovante pourrait faire apparaître la distinction entre connu et inconnu, c'est-à-dire entre ce qui ne fait plus l'objet d'explorations et ce qui en fait encore. La détermination des inconnus à aborder peut ainsi devenir une piste de ce qui constitue la spécificité identitaire de l'entreprise considérée.

4.3. Distinguer la validation des éléments du modèle d'affaires de la préservation de l'architecture de conception

La reconfiguration des capacités et des ressources introduite dans la section précédente laisse à penser que les efforts portent sur l'architecture de l'organisation. Ainsi, il s'agirait plutôt de s'intéresser aux règles qui régissent l'action de l'entreprise qu'aux éléments validés du modèle d'affaires. Si les MVP ont servi à valider des hypothèses à un moment donné, ils ne présagent en rien du maintien de ces éléments validés dans les développements futurs. En revanche, les règles pour la structure de l'organisation peuvent, elles, être préservées dans le temps. Cette distinction entre les notions de validation et de préservation n'a pas été traitée par la littérature sur les modèles d'affaires, et *a fortiori* lorsque l'on s'intéresse à la phase de scale-up.

En élargissant le champ de la littérature, on constate que les travaux en architecture des systèmes d'information peuvent éclairer notre propos. Baldwin et Clark (2000) indiquent en effet l'existence de plusieurs solutions sur le plan de l'architecture technique pour un même problème. En s'inspirant de cette discipline, nous sommes amenés à considérer la conception des règles d'architecture, en complément des outils de l'entrepreneuriat. Notre objectif est de déterminer les règles de formation du modèle d'affaires, qui seraient susceptibles de se préserver dans les phases de développement ultérieures. On y voit déjà un effort de conception important à mener, et dont le lieu pourrait être celui de la phase de scale-up, compte-tenu de l'importance des travaux de structuration organisationnelle auxquels cette phase fait face.

S'il serait trop ambitieux de considérer les routines d'une startup encore peu expérimentée, les premiers développements réalisés s'étalent généralement sur plusieurs mois voire années dans le cas des startups deeptech. Ils peuvent donc déjà constituer des éléments à préserver dans la suite des développements. En particulier, la perspective de s'intéresser à l'architecture de conception est prometteuse : il s'agit de dépasser la simple accumulation de savoir-faire ou de connaissances issus des expériences passées, si peu nombreuses soient-elles, pour saisir au mieux ce qui donne à l'entreprise sa capacité à être générative à partir de la façon dont elle conçoit. Cette architecture de conception peut dès lors être vue comme une partie d'un patrimoine que l'entreprise se constitue.

5. L'entrepreneuriat vu comme une science de la conception

5.1. Dépasser la destruction créatrice

Pour expliquer la croissance économique, l'économiste autrichien Joseph Schumpeter voit dans l'innovation le moteur de cette croissance et des cycles économiques qu'elle engendre, dès ses premiers travaux (Schumpeter, 1911). Le concept de « destruction créatrice » n'apparaît qu'à la fin de son œuvre pour décrire le processus de renouvellement des innovations à l'origine du capitalisme et de l'alternance entre les phases prospères où les innovations apparaissent par grappes et les périodes décadentes (Schumpeter, 1942). Cette théorie a été largement reprise pour décrire les processus d'innovation et pour évaluer le degré d'innovation comme le rappellent H. Harlé et al. (2021). Siegel et Krishnan (2020) vont même jusqu'à mettre en évidence la nécessité de la destruction créatrice pour l'adoption des technologies portées par les startups deeptech, les tendances du marché mises en regard des changements technologiques rapides justifiant le besoin d'innovations de rupture en remplacement des solutions antérieures.

Il convient néanmoins de dresser quelques limites à la théorie de Schumpeter, comme le propose Aggeri (2023). La destruction créatrice s'appuie sur l'hypothèse de la satisfaction des besoins jusqu'à la saturation, entraînant alors une limitation de la croissance économique. Mais l'amélioration constante des produits et l'appétence démesurée à la consommation que nous connaissons aujourd'hui mettent à mal cette hypothèse : le flux d'innovations est resté constant et la croissance économique s'est poursuivie. En outre, la mise en opposition par Schumpeter des politiques publiques d'aide à l'innovation avec un modèle d'investissement capitaliste ne rend pas compte des potentielles synergies entre ces modes de financement : l'investissement public peut jouer le rôle de susciter l'investissement privé. C'est également ce que défend l'économiste américaine Mariana Mazzucato au sujet du rôle de la DARPA dans le soutien aux innovations majeures, mettant ainsi en avant la prise de risque de l'État (Mazzucato, 2013). Enfin, Aggeri (2023) souligne que si Schumpeter voit dans l'innovation un moteur de la croissance économique, et ce indépendamment du coût des pertes (à savoir celles liées à la destruction), la perte est toujours dépassée par les opportunités créées : autrement dit, Schumpeter ne pense pas les aspects néfastes des innovations, qui sont désormais clairs aujourd'hui (sur le plan environnemental par exemple). Ces différentes limites nous amènent à dépasser la théorie de la destruction créatrice.

Notre préoccupation rejoint celle de Le Masson et Weil (2020) qui cherchent « à relire et à relativiser les phénomènes de destruction créatrice et à proposer les voies d'une création non destructrice » (p.12) en s'intéressant à la construction et à la gestion des processus créatifs. À partir de l'antagonisme entre expertise et innovation de rupture, les auteurs introduisent dans cet éditorial de la revue *Entreprises et Histoire* le rôle de l'expertise dans la structuration des savoirs et des inconnus pour ouvrir la voie à une activité de conception basée sur une exploration structurée permettant la créativité. Ils mettent ainsi à mal la nécessaire destruction créatrice pour innover, et ce, même dans le cas des startups, comme ils l'écrivent : « Les startups elles-mêmes ont pu passer pour ces formes de création *ex nihilo* alors que leur succès est souvent fondé sur leur capacité à s'ancrer sur un patrimoine établi. » (p.12). C'est parce qu'il est question d'un patrimoine existant, que notre intérêt se portera plus précisément sur la conception par les startups de ce qui peut être

considéré comme un deuxième produit. Cela nous conduit à interroger le lien entre entrepreneuriat et activités de conception.

5.2. *Entrepreneurship as design*, une forme d'entrepreneuriat dans l'inconnu

En reprenant la distinction de vocabulaire entre incertain et inconnu, proposée par Le Masson et al. (2019), nous chercherons à exprimer les enjeux de conception liés au scale-up des startups technologiques à partir de la notion d'inconnu. En effet, la terminologie d'incertitude renvoie à l'existence d'événements ou d'états qui ne sont pas suffisamment bien définis pour en assurer une connaissance objective donnée par une mesure, sans que cela ne remette en cause leur existence³⁰. Lorsque l'on évoque un inconnu, il s'agit d'une situation dans laquelle les événements ou les états ne sont pas identifiés au point de penser qu'ils n'existent pas forcément et sont parfois à créer en réponse à un cadre donné³¹. On voit dès lors une certaine complémentarité des définitions d'incertain et d'inconnu entre la preuve de l'existence et la détermination de propriétés d'un même objet.

Cette distinction entre incertain et inconnu est portée par la littérature en conception innovante, qui fournit des théories et des méthodes adaptées au cas d'entreprises technologiques, comme peuvent le souligner par exemple les modélisations proposées des activités de conception des bureaux d'études à la fin du XIX^e siècle (Le Masson & Weil, 2010). C'est tout particulièrement le cas des méthodes de conception innovante issues de la théorie C-K (Hatchuel & Weil, 2003), dont l'emploi est tout à fait adapté au développement de technologies de rupture. Tandis que le vocabulaire employé dans le monde de l'entrepreneuriat renvoie vers l'incertitude et le risque, les travaux en conception s'intéressent à l'exploration dans l'inconnu : le lien entre l'entrepreneuriat et les théories de la conception fait ainsi apparaître le concept d'entrepreneuriat dans l'inconnu.

La pertinence de l'introduction de la conception, au sens de *design engineering*, dans le champ de l'entrepreneuriat est attestée par les récents travaux menés dans le champ intitulé *entrepreneurship as design*. L'entrepreneuriat y est ainsi considéré comme étant une forme de conception. Par exemple, dans le but de proposer une compréhension plus fine des processus d'émergence d'opportunités entrepreneuriales et de contribuer à ce nouveau champ de recherche, une étude conduite par Magistretti et al. (2023) analyse le rôle des agences de design dans le développement des opportunités entrepreneuriales. Le processus qu'ils modélisent se fonde sur

³⁰ Le CNRTL donne en première définition de l'incertitude : « caractère d'imprécision d'une mesure, d'une conclusion » ; la deuxième définition renvoie au principe d'incertitude, formulé par le physicien Heisenberg en 1927, qui postule, en mécanique quantique, que la position et la vitesse d'une particule ne peuvent pas être déterminées simultanément avec précision. L'existence de la particule dont on cherche à connaître le comportement n'est en aucun cas remise en question par ce principe. En revanche, il permet de mieux saisir la réalité de la dualité onde-corpuscule, l'objet quantique présentant des propriétés d'ondes et de corpuscules. La notion d'incertitude recouvre bien la difficulté à saisir les propriétés de l'objet considéré.

Source : <https://www.cnrtl.fr/definition/incertitude>

³¹ Selon le CNRTL, la forme substantive employée au masculin d'inconnu renvoie à un objet qui n'est pas identifié, que l'on n'est pas capable de nommer. Dès lors, c'est son existence même qui est interrogée. Par ailleurs, en mathématiques, la forme substantive employée au féminin désigne un élément qui peut être substitué par un autre objet mathématique dont les propriétés sont cohérentes avec le contexte dans lequel cet objet s'insère : une inconnue est une donnée qui n'a pas encore été évaluée mais pour laquelle les propriétés sont déterminées.

Source : <https://www.cnrtl.fr/definition/inconnu>

quatre activités principales : « *defining, framing, experimenting, and learning* » (p.2). C'est l'interaction entre la théorie entrepreneuriale et la pratique de la conception qui permet la transformation d'une vision entrepreneuriale en opportunités actionnables.

Les récents travaux menés notamment par Berglund et al. (2018) et Romme et Reymen (2018) ont contribué à ouvrir de nouvelles voies de recherche en entrepreneuriat s'inspirant les approches de type conception, par exemple pour clarifier des notions critiques comme celle « d'opportunité » ou pour affermir les fondations d'approches de type « *effectuation* » (Sarvasathy, 2001). Dans l'éditorial du premier numéro du *Journal of Business Venturing Design*, Berglund (2021) développe l'ambition générale portée par la revue : « *transform the 'prescientific' Lean Startup principles into a body of design knowledge that is both scientifically grounded in established theories [...] and on the basis of this refinded and field-tested* » (p.3).

Seckler et al. (2021) vont jusqu'à voir la conception comme le moyen de lier théorie et pratique entrepreneuriales, grâce à l'introduction d'une méthode scientifique et rigoureuse propre aux théories de la conception. Les auteurs insistent sur l'utilité du recours à une méthode scientifique dans le but de créer des connaissances et de concevoir des solutions en réponse aux grands défis, qui sont caractéristiques de situations d'inconnu. *A fortiori*, en liant les enjeux entrepreneuriaux à la conception, les études du champ de recherche émergent sur *l'entrepreneurship as design* appellent à regarder le passage à l'échelle, bien documenté dans la littérature en entrepreneuriat, comme un problème de conception. Cela est d'autant plus marqué dans le cas des entreprises à caractère technologique, comme les startups deeptech, qui sont soumises à de forts inconnus.

6. Les enjeux de conception pour les startups technologiques

6.1. Lever simultanément les inconnus marché et technologique

Considérons à présent les inconnus auxquels les startups deeptech font face : « *Deep technology startups (deep tech startups) in particular, aim to disrupt existing or create entirely new markets with capital and resource intensive deep technology innovations. Thereby, they face the challenge of not only developing their organization as well as a novel technology, but also a new market in parallel.* » (Schuh, Studerus, et al., 2022, p.1-2). C'est typiquement le cas du marché qui est mis en évidence : parce qu'il s'agit de le créer, on peut déjà le considérer comme inconnu. Le caractère nouveau de la technologie développée est aussi un indice quant à la forte dimension d'inconnu technologique : on retrouve bien le cas d'une solution pour laquelle on sait définir les propriétés techniques que l'on cherche à concevoir sans pour autant avoir la preuve a priori de l'existence d'une telle solution.

C'est la simultanéité de l'émergence des inconnus portant sur le marché et sur la technologie qui amène à voir dans la phase de scale-up d'une startup deeptech une situation de double inconnu, selon l'acceptation de Kokshagina (2014). Il y a bien des inconnus à la fois au niveau du marché (qui doit être conçu simultanément avec la technologie en rupture) et sur le plan technologique (les

technologies développées étant par essence particulièrement complexes, l'ensemble de leur fonctionnement n'est pas prédit). Dans la mesure où l'activité de conception des startups deeptech est relative à des aspects technologiques et de marchés, elles répondent à la terminologie d'innovations de rupture : Christensen et al. (2015) soulignent justement le cas où les marchés sont encore à créer. Face à ce double inconnu ainsi décrit, les startups deeptech sont confrontées à des situations où il n'existe pas encore de modèle d'affaires qui pourrait être transformé.

Cette discussion questionne l'enjeu de lever successivement toutes les incertitudes à partir des tests réalisés avec plusieurs MVP. Dans la mesure où la startup est face à une situation de double inconnu, il s'agirait de chercher à concevoir de nouvelles propositions dans une situation d'inconnu, ce qui passe notamment par une exploration rigoureuse des inconnus (Le Masson et al., 2019).

6.2. Une relecture de la notion d'*absorptive capacity*

Conformément à la théorie C-K qui propose une modélisation du raisonnement de conception (Hatchuel & Weil, 2003), l'exploration des inconnus, vus comme des concepts (C), passe par une structuration des apprentissages dans la base des connaissances (K). En particulier, l'entreprise, par son bureau d'études ou sa R&D, cherche à appréhender des connaissances extérieures : il s'agit de sa capacité à « *identify, assimilate, and exploit knowledge from the environment* », dite « *absorptive capacity* » et introduite par Cohen et Levinthal (1989, p.569). C'est cette capacité que la R&D a aussi pour rôle de développer et de maintenir, au-delà des innovations sur les processus ou les produits qu'elle permet. Plus les connaissances à acquérir sont nouvelles pour la R&D, plus l'innovation se diffusera lentement. Les auteurs vont plus loin en précisant les connaissances à acquérir : si les connaissances externes nécessaires sont proches des savoirs internes, alors l'*absorptive capacity* est un dérivé de la routine organisationnelle mise en œuvre ; en revanche, dans le cas où les connaissances externes sont plus lointaines, le développement d'une *absorptive capacity* fait appel à des efforts spécifiques (Cohen & Levinthal, 1990). On retrouve ici l'un des paradigmes des startups deeptech qui font massivement face à des nouvelles connaissances variées et *a fortiori* lointaines en phase de scale-up, et qui présentent des temps de développement significativement longs. Sanasi (2022) exprime d'ailleurs la possibilité de considérer la phase de scale-up comme une phase de constitution d'une *absorptive capacity* : on y voit dès lors un effort de conception particulier à mener.

À partir d'une étude portant sur un cluster et plus particulièrement les PME de ce cluster, Bocquet et Mothe (2015) s'intéressent aux relations entre la structure de gouvernance du cluster et la capacité des PME à absorber les connaissances. Les auteurs considèrent alors la capacité d'absorption des connaissances comme une capacité dynamique, définissant donc des capacités dynamiques d'absorption. Un des rôles du cluster et de sa gouvernance ainsi mis en évidence porte sur l'évolution des routines des PME. Cette étude confirme l'évolution des capacités d'absorption et donne des indications quant au rôle de l'écosystème proche au sein duquel les entreprises se développent.

Avec cette même attention portée à la dimension évolutive des capacités d'absorption, Lane et al. (2006) mettent en garde contre une utilisation dévoyée de cette notion et en proposent une

définition plus précise, en soulignant notamment la dimension exploratoire dans l'identification des connaissances externes ainsi que la création de nouvelles connaissances. On y retrouve des marqueurs forts d'une approche par la conception. Le Masson et al. (2012) font d'ailleurs une relecture de la notion d'*absorptive capacity* à partir de la conception. En particulier, ils y ont recours pour des situations d'innovations radicales, ce que connaissent les startups deeptech par définition. Ils montrent alors que dans ces situations la capacité à s'émanciper des règles de conception traditionnelles est clef pour l'activité créatrice.

6.3. Introduire le patrimoine de création pour distinguer validation et préservation

Alors que la capacité absorptive est définie vis-à-vis de la R&D et concerne en particulier les connaissances à acquérir, Le Masson et al. (2012) ouvrent la voie à une *conceptual absorptive capacity* qui a pour rôle de s'émanciper des règles de conception. Une brève transposition dans le vocabulaire de la théorie C-K permet de voir l'*absorptive capacity* comme une ressource structurant la base de connaissances (K) sans pour autant agir directement sur l'espace des concepts (C). La proposition d'une *conceptual absorptive capacity* est un premier pas vers une reconfiguration de l'espace des concepts.

Des travaux plus récents ont ainsi mis au jour la notion de patrimoine de création, pour récapituler ces paradoxes. Cette terminologie définit un principe à la fois préservant (patrimoine), à travers le respect des règles d'une tradition, et génératif (de création), par la régénération des règles de cette même tradition (Hatchuel et al., 2019). Transposée à la problématique entrepreneuriale, la tradition correspond à l'organisation elle-même : les règles sont celles relatives à la structure de l'organisation, à la gestion de ses ressources, aux routines mises en place, etc. La notion de patrimoine de création offre un cadre d'analyse nouveau dans le champ de l'entrepreneuriat qui est en mesure de considérer des éléments d'architecture du modèle d'affaires ainsi que le modèle d'affaires lui-même, les règles d'architecture de l'organisation influençant sa mise en œuvre et les choix stratégiques eux-mêmes.

Ainsi, le patrimoine de création prend en compte l'ensemble des règles que l'organisation se donne, au-delà de la seule R&D : en cela, cette notion dépasse celle d'*absorptive capacity* ainsi que celle des *dynamic capabilities*. Le patrimoine de création ne se focalise pas seulement sur les connaissances à acquérir mais fournit aussi des règles pour la conception : ce sont bien les espaces des concepts et des connaissances, au sens de la théorie C-K, qui sont renforcés. Dans la mesure où le patrimoine de création porte sur les règles de fonctionnement de l'ensemble de l'organisation, régissant notamment la gestion des ressources et des connaissances, la notion n'a pas non plus à être assimilée à celle des capacités dynamiques, qui sont relatives à la reconfiguration des ressources et des connaissances. Étant donné que les capacités dynamiques se situent au niveau des ressources, on peut considérer que les règles de conception constituant le patrimoine de création encadrent la gestion des capacités dynamiques.

À l'origine issue d'une analyse du monde de la gastronomie et de la créativité qui le caractérise, la notion de patrimoine de création a rapidement été élargie à d'autres situations, et en particulier industrielles : dans l'industrie des semi-conducteurs (Cogez et al., 2020), ou encore dans l'industrie ferroviaire ou l'industrie aéronautique (H. Harlé et al., 2021). Par ailleurs, d'autres

travaux portant sur l'expertise de l'inconnu ont pu montrer que cette expertise pouvait être considérée comme un patrimoine de création compte-tenu des savoirs développés et des efforts de structuration nécessaires (Le Masson & Weil, 2020). Pour les auteurs, il s'agit de « penser le nouveau enraciné dans l'ancien » (p.12), mettant en exergue la capacité créatrice de l'expertise pour ancrer l'innovation dans une dynamique de création non destructrice. Ce rapport au passé fait du patrimoine de création un cadre pertinent pour la prise en compte des préservations, et en particulier à celles qui ont lieu en situation d'innovation intensive. Il ne s'agit alors plus de considérer un patrimoine qui serait seulement une accumulation des éléments validés successivement par les tests du modèle d'affaires, mais bien de définir un objet génératif qui garantisse la capacité d'innovation de l'entreprise sur le long terme. C'est la générativité du concept de patrimoine de création qui justifie de faire la distinction entre les validations successives, pas forcément génératives, et les préservations, à savoir les éléments mis au jour que l'on choisit de préserver pour leur caractère génératif.

L'introduction de la notion de patrimoine de création issue des théories de la conception apporte un nouveau regard sur la phase de scale-up : elle ouvre en effet la voie à la compréhension de la phase de scale-up comme une étape de détermination des règles de conception à préserver pour garantir la générativité future de la startup. Cela revient à formuler la problématique générale suivante : **dans quelle mesure pouvons-nous considérer que le scale-up est une phase de constitution d'un patrimoine de création ?** En prenant en compte l'activité de conception du patrimoine de création durant la phase de scale-up, plusieurs questions de recherche en découlent.

6.4. Formulation des questions de recherche

S'il fait consensus que le scale-up est un passage difficile à l'issue incertaine, le champ de la conception souligne la criticité du phénomène en prenant le parti de passer de l'incertain à l'inconnu : ce sont en effet des inconnus multiples dont les startups doivent gérer l'émergence lors de cette étape. Le caractère deeptech accentue d'autant plus cet effet compte-tenu des inconnus technologiques propres et relatifs au marché qu'il engendre. D'une part, la revue de la littérature a mis au jour la difficulté des langages issus du champ de l'entrepreneuriat et des modèles d'affaires à comprendre les enjeux de gestion de la phase de scale-up des startups deeptech ; d'autre part, le recours aux théories de la conception a permis l'introduction de la notion de patrimoine de création comme un objet à concevoir durant le scale-up. En exprimant le patrimoine de création d'une startup deeptech en scale-up, on cherche alors à caractériser cette étape du scale-up et ses mécanismes de gestion propres. **Comment le concept de patrimoine de création révèle-t-il les descripteurs du scale-up ?**

Compte-tenu des transformations profondes en phase de scale-up, dont les indicateurs portant sur le nombre de clients ou le nombre de collaborateurs en fournissent une fidèle illustration, c'est une véritable dynamique de structuration qui est mise en place en interne par l'entreprise. Si l'intérêt de la notion de patrimoine de création est avéré, elle doit permettre d'apporter des éclairages quant aux méthodes et aux processus à l'œuvre durant cette phase. **Comment une startup deeptech se constitue-t-elle un patrimoine de création en phase de scale-up ?**

Enfin, les explorations menées durant la phase de scale-up entraînent des modifications de la représentation qu'ont les startups deeptech de leur écosystème. La prise en compte du rapport à l'écosystème comme un élément du patrimoine de création nous incite à nous intéresser aux évolutions de la représentation de l'écosystème. L'objet de notre intérêt est plus encore la question des méthodes mises en œuvre pour la maîtrise de ces évolutions dans le but de garantir les développements futurs. **Comment l'entreprise en phase de scale-up gère-t-elle son rapport à l'écosystème ?**

Synthèse du chapitre 2

Nous retiendrons de ce deuxième chapitre que le passage à l'échelle fait partie des étapes-clés des entreprises en forte croissance. La littérature en entrepreneuriat cherche à montrer comment garantir la capacité de l'entreprise à réaliser le passage à l'échelle, grâce à une validation préliminaire de son modèle d'affaires. Issue du monde du numérique, la terminologie de scale-up renvoie en effet à l'idée d'une reproduction de ce qui a pu déjà être précédemment réalisé. La phase de scale-up suit donc celle de la validation de la rencontre entre le produit et le marché, réalisée par des tests successifs des hypothèses du modèle d'affaires.

Si les méthodes issues du *Lean Startup* ne sont pas directement transposables à des cas d'entreprises à forte dimension technologique, il s'agit d'adapter leurs apprentissages pour les rendre pertinents dans le cas de l'étude des startups deeptech. En particulier, le recours aux MVP doit être considéré plus largement que la seule validation d'hypothèses du modèle d'affaires, et bien plus comme un moyen d'apprendre à reconnaître les règles de conception génératives qui établiront la spécificité des startups. En effet, en cherchant à mettre en évidence les mécanismes de préservation qui ont lieu lors du passage à l'échelle et simultanément à garantir la capacité d'innovation future des startups, nous proposons la notion de patrimoine de création.

À l'issue de ces deux premiers chapitres, nous sommes en mesure de formuler la problématique générale suivante : **dans quelle mesure pouvons-nous considérer que le scale-up d'une startup deeptech est une phase de constitution d'un patrimoine de création ?** En introduisant la notion de patrimoine de création, l'approche par la conception fournit une autre perspective sur cette phase critique du développement. Trois questions de recherche en découlent :

Question de recherche n°1 :

Comment le concept de patrimoine de création révèle-t-il les descripteurs du scale-up ?

Question de recherche n°2 :

Comment une startup deeptech se constitue-t-elle un patrimoine de création en phase de scale-up ?

Question de recherche n°3 :

Comment l'entreprise en phase de scale-up gère-t-elle son rapport à l'écosystème ?

Chapitre 3 – Positionnement épistémologique et éléments méthodologiques

Chapitre 3 – Positionnement épistémologique et éléments méthodologiques

1. Cheminement et construction du sujet de recherche	117
1.1. Parcours personnel vers le doctorat en sciences de gestion	117
1.2. Un intérêt marqué de Bpifrance pour l’accompagnement au développement des startups deeptech	118
1.3. Élaboration des premières hypothèses et démarche abductive.....	118
1.4. Itinéraire de la recherche	121
2. Une interaction assumée pour un apport théorique et managérial	123
2.1. Posture épistémologique : une proximité avec le terrain pour acquérir des connaissances nouvelles	123
2.2. Principes méthodologiques de la recherche-intervention.....	124
2.3. Originalité de l’approche méthodologique.....	125
3. Construire un terrain représentatif à partir d’un panel varié de startups deeptech à différents moments de la phase de scale-up	126
3.1. Le choix d’une approche qualitative à partir d’une étude de cas multiples pour dépasser l’impasse des descripteurs	126
3.2. Sélection des cas d’étude dans le contexte de la Covid-19.....	127
3.3. Lien entre les cas d’étude et Bpifrance	128
3.4. Analyse des cas d’étude	129

Ce chapitre présente le parcours, le positionnement épistémologique et la méthodologie adoptés pour le travail de recherche dans son ensemble. Après une brève description de l'itinéraire de recherche emprunté et des startups pour lesquelles nous avons eu un intérêt particulier (partie 1), nous explicitons notre posture épistémologique à partir du cadre général que constitue la recherche-intervention (partie 2). Plusieurs arguments sont avancés pour justifier ce choix. Sur le plan méthodologique, notre terrain de recherche est composé de startups deeptech à différents stades du scale-up, à partir desquelles nous en tirons une modélisation de cette phase critique de leur développement (partie 3). Dès lors nous contribuons à enrichir les connaissances relatives aux startups deeptech, aux descripteurs de leur développement et aux mécanismes en œuvre durant le scale-up, et nous sommes aussi en mesure de fournir des éléments pour les dispositifs d'accompagnement et de financement déployés par la banque publique d'investissement, et plus particulièrement la Direction Deeptech. C'est en effet à ce niveau que peut se situer l'intervention.

1. Cheminement et construction du sujet de recherche

1.1. Parcours personnel vers le doctorat en sciences de gestion

Alors que la perspective de rejoindre l'univers des startups semblait bien lointaine, celle d'en faire le sujet de mon doctorat était restée complètement impensée. En outre, à ces éléments déjà surprenants, je dois avouer qu'au moment de ce choix je m'offusquais de la part toujours trop importante d'ingénieurs qui délaissaient l'industrie pour préférer le secteur de la banque, de l'assurance et de la finance ou du conseil à la sortie de l'école : il ne manquait plus que je sois employée dans une banque à mon tour... Ce temps de doctorat aura donc été un temps de déplacement, de découverte et de prise de recul. C'est finalement ce que j'ai le plus recherché et qui continue de motiver mes engagements.

Nombreux sont les docteurs, de tous les horizons, qui m'ont convaincue au fil des discussions des multiples apports de l'expérience de la thèse. Si ma décision ressemblait à un saut dans le vide, décidé tardivement, j'avais pris soin de me renseigner : bien souvent, au gré du périple du doctorat, j'ai repensé aux propos échangés avec ces docteurs expérimentés aux parcours professionnels variés qui avaient pris le temps de m'aiguiller. À mon tour, je pense avoir désormais bien compris pourquoi le doctorat est une formation à la recherche par la recherche, quelle que soit la discipline considérée. Les réflexes que l'on y acquiert dans la méthode de travail et l'autonomie de la pensée propre à ce long exercice en sont de riches apprentissages.

Si les sciences de gestion ont retenu mon attention, cet attrait trouve son origine dès mon cursus d'ingénieur durant lequel je me suis intéressée à l'approche systémique, ce qui m'aura conduite à choisir la spécialisation *Automatique et Systèmes* en dernière année à Supélec. Ainsi, j'ai cherché à comprendre le fonctionnement des organisations dans leur ensemble, de la conception d'un produit innovant à la gestion d'un écosystème de parties prenantes variées. En découvrant les travaux du Centre de gestion scientifique (CGS), j'ai compris que l'épistémologie proposée et la méthodologie déployée répondraient à mes attentes ; depuis elles ont été largement dépassées.

1.2. Un intérêt marqué de Bpifrance pour l'accompagnement au développement des startups deeptech

C'est mon appétence pour les problématiques technologiques qui m'a amenée, contre toute attente, à débiter une thèse portant sur les startups deeptech pour le compte de Bpifrance. En menant une recherche au contact direct avec les startups et plus particulièrement les technologies développées, j'ai eu l'occasion de me plonger dans plusieurs disciplines scientifiques et les problématiques techniques associées. C'est en effet dans le but d'une plus fine compréhension des mécanismes propres au développement des startups deeptech que des travaux de recherche ont été lancés à la Direction Deeptech.

Compte-tenu des spécificités marquées des startups deeptech et de la promesse de l'impact sur laquelle elles s'appuient dans leur démarche de commercialisation de leurs innovations, pour mettre en œuvre le plan Deeptech, Bpifrance s'est emparée de la question de l'accompagnement à la croissance de ces jeunes entreprises innovantes. C'est aussi pour la banque publique un levier de valorisation de la recherche scientifique publique. Face à des temps de développement particulièrement longs, la question du continuum de financements, de l'*early stage* au *late stage* est également soulevée. En particulier, de nouveaux modèles d'investissement et d'accompagnement sont nécessaires pour développer des innovations (Parpaleix et al., 2018) et *a fortiori* lorsqu'il s'agit de technologies de rupture portées par des startups deeptech. La question à part entière de l'accompagnement à la croissance des startups deeptech est donc clef pour la banque publique.

Une première étude a d'abord été menée par Laure-Anne Parpaleix dans le cadre de son post-doctorat pour déterminer les axes principaux du soutien à l'émergence d'un écosystème propice aux startups deeptech. La revue de la littérature conduite au moment de la mise en place du plan Deeptech a mis en évidence les vides à combler autour de ce concept encore nouveau et a permis de dresser un programme de recherche. Un premier axe a soulevé des questions de recherche relatives aux régimes de conception propres aux startups deeptech dans un contexte de double inconnu, marché et technologique, et plus particulièrement au passage au deuxième produit. Un deuxième axe portait sur la structuration des écosystèmes d'innovation autour des startups deeptech. Un dernier introduisait la question des schémas de solidarité pour élaborer des mécanismes de cohésion propres au développement d'écosystèmes innovants. Les travaux de cette thèse se sont initialement appuyés sur ces premières recherches.

1.3. Élaboration des premières hypothèses et démarche abductive

Les premiers mois ont permis d'affiner les interrogations de Bpifrance et en particulier de se focaliser sur un des volets du plan Deeptech, à savoir l'accompagnement à la croissance et la pérennité sur le long terme des startups soutenues. Une meilleure compréhension des trajectoires de développement a en effet pour but de mettre en place des produits financiers et des dispositifs d'accompagnement adaptés aux enjeux particuliers rencontrés. Durant cette première phase, il a également été question de poursuivre les investigations statistiques conduites par Laure-Anne Parpaleix, ce qui a mis en évidence l'inadéquation des données à disposition vis-à-vis des

mécanismes relatifs à la croissance des startups deeptech. Ces analyses ont été présentées dès le chapitre 1.

Considérant le caractère propre du développement des startups deeptech, un premier échantillon de startups deeptech a été constitué pour tenter de rendre visibles les différents régimes de conception réalisés selon les étapes de développement. Trois startups ont fait l'objet d'une étude réalisée à partir de données secondaires, aux sources diverses (données publiques et données issues des bases internes et des activités de suivi des dossiers de demande par Bpifrance). Ce travail de détermination des efforts de conception à mener tout au long du développement a mis en exergue la superposition de trois régimes de conception : au lieu de voir se succéder des régimes de conception propres à chaque étape, l'effort consiste justement à maintenir simultanément plusieurs régimes. À travers les demandes de brevet, preuves d'une activité inventive, et la mise sur le marché de nouveaux produits, c'est tout un effort d'innovation qui se poursuit, au sens de Myers et Marquis (1969) qui précisent : « *Innovation [...] is not just the conception of a new idea, nor the invention of a new device, nor the development of a new market. The process is all these things* » (p.1), et qui a lieu en même temps que la startup se structure et met en place des routines, c'est-à-dire un régime de conception réglée. Un travail de chronologie des événements et des activités a été réalisé pour mettre en évidence cette superposition, le cas de la startup DNA Script ayant été présenté dans la section 3.2 du chapitre 1. Par ailleurs, une modélisation de l'activité de conception a été faite pour chacun des cas à partir de la théorie C-K pour rendre tangible l'expansion à la fois au niveau des concepts et des bases de connaissance liée à la recherche de la levée des inconnus (l'acquisition de nouvelles connaissances engendrant des concepts nouveaux, donc de potentielles idées de produits sur d'autres marchés ; et inversement, la conception de solutions ouvrant la voie à l'acquisition de nouvelles connaissances). Le Tableau 10 suivant présente les trois cas initialement étudiés et les sources des données recueillies.

Dans un deuxième temps, pour saisir les efforts de conception propres à la phase de scale-up, des entretiens semi-directifs ont été menés auprès de startups deeptech. Ils sont répertoriés dans le Tableau 11 ci-après. Les questions posées étaient relatives aux apprentissages réalisés par l'entreprise et en particulier pendant la phase de scale-up. Ces entretiens ont corroboré l'existence d'une multiplicité de dimensions sur lesquelles les changements liés au passage à l'échelle influent et pour lesquelles les inconnus sont nombreux. Nous avons ainsi retrouvé les dimensions du modèle d'affaires déjà mises en évidence par la littérature (c'est-à-dire celles apparaissant dans le Tableau 9 de la section 3.1.2 du chapitre 2), avec un accent particulier sur la réglementation et les partenariats de recherche, qui sont deux éléments caractéristiques de la qualité de deeptech. En revanche, à l'inverse des propos de la littérature considérant ces dimensions comme déjà validées pour le scale-up, les entretiens ont souligné leur apparition ou leur remise en question au cours même de la phase de scale-up. Ce propos sera plus longuement repris dans l'étude du cas d'Agricool proposée au chapitre 4. Cette deuxième étape dans la formulation des hypothèses aura conduit à réaliser une étude plus précise des efforts de conception à fournir à partir d'un positionnement au plus proche du terrain de recherche. Les entretiens menés avec deux des startups deeptech listées qui n'étaient pas encore entrées dans une phase de scale-up, ont permis de différencier ce qui relevait de la phase de scale-up et ce qui relevait des spécificités des startups deeptech.

Tableau 10. Startups étudiées et données secondaires associées ayant conduit à l'hypothèse d'une superposition des régimes de conception en phase de scale-up

Startup deeptech	Brève description de la technologie	Type de données secondaires
CryptoNext Security Paris, créée en 2019	Dispositifs de cryptographie capables de résister à la puissance de calculs des ordinateurs quantiques	Dossier concours i-Lab et autres demandes de subvention (données internes à Bpifrance), organisme américain de standardisation (NIST), médias (presse, réseaux sociaux, site internet de la startup)
DNA Script Le Kremlin-Bicêtre, créée en 2014	Technologie de synthèse enzymatique d'ADN réalisable au sein des laboratoires de recherche à partir d'un dispositif type « imprimante »	Demandes de subvention (données internes à Bpifrance), brevets, médias (presse, réseaux sociaux, site internet de la startup), visite de l'entreprise, enquête et suivi par Mustar (2020)
HySiLabs Aix-en-Provence, créée en 2015	Vecteur liquide à base de silice pour le transport et le stockage du dihydrogène dans les conditions normales de pression et de température	Demandes de subvention (données internes à Bpifrance), brevets, médias (presse, réseaux sociaux, site internet de la startup)

Tableau 11. Liste des entretiens semi-directifs menés avec des startups deeptech pour détailler les efforts de conception à mener

Startup	Domaines d'application et champs disciplinaires	Interlocuteur, date et durée de l'entretien	En phase de scale-up ?
HySiLabs	Mobilité, chimie	CEO, 25/02/2021, 1h	Oui
Deepsense	Solutions d'intelligence artificielle personnalisées, informatique	CEO, 26/02/2021, 1h	Oui
Olvid	Messagerie sécurisée, cryptographie	VP Marketing, 02/03/2021, 1h	Oui
CoEnergy	Efficacité énergétique des bâtiments, thermodynamique	CEO, 12/04/2021, 2h	Non
Hemeris	Activation de semences, physique et agronomie	Co-fondateurs, 02/07/2021, 2h	Non

De ces premières investigations, nous restons surpris face aux efforts de conception massifs et majeurs pour la capacité de développement futur de l'entreprise qu'elle se doit de fournir pendant la phase de scale-up. Cette observation va en effet à l'encontre des résultats émis par la littérature lorsqu'il s'agit de startups du numérique. Si la reproduction de ce qui a été validé auparavant est recherchée même dans le cas de startups technologiques, elle ne peut se substituer à un fort besoin d'exploration des inconnus qui apparaissent au cours du temps.

Afin de clarifier ce phénomène d'accumulation des efforts de conception et de gérer cette étape-clef du développement, notre démarche a relevé d'un raisonnement abductif (Dumez, 2016). Pour la mener à bien, nous avons cherché à observer plus précisément et à modéliser les mécanismes à l'œuvre en phase de scale-up pour des startups deeptech. Nous nous sommes ainsi intéressés à trois cas de startups deeptech issues de secteurs différents à des moments particuliers dans la phase de scale-up. Le Tableau 12 en dresse la liste ainsi que les diverses modalités d'étude. Concernant le cas « Agricool (Orius) » comme dénommé dans le tableau, les éléments sur cette ligne du tableau correspondent à la seule startup Agricool ; le détail relatif à la startup Orius, créée par des anciens collaborateurs d'Agricool, sera fourni dans le chapitre suivant.

Tableau 12. Liste des startups deeptech ayant fait l'objet d'une étude de cas

Startup	Brève description de la technologie	Modalités de l'étude	Moment particulier dans le développement
Agricool (Orius)	Systèmes agronomiques de culture en environnement contrôlé	Encadrement d'un projet de master 2 (avec un stage de 6 mois) entre octobre 2020 et juillet 2021	Augmentation de la production
Poietis	Dispositifs pour la bioimpression de tissus par laser	Étude réalisée sur 8 mois en 2022 dont 10 jours en immersion	Acquisition des clients et début de l'industrialisation
SUBLIME Énergie	Solution de liquéfaction du biogaz	Étude longitudinale menée sur deux ans et demi entre 2021 et 2023	Après le 1 ^{er} prototype validant la solution technique

1.4. Itinéraire de la recherche

La Figure 15 suivante fournit une illustration des principales étapes dans le travail de recherche entrepris, que ce soit sur le plan des grandes thématiques abordées dans la littérature, du matériel empirique à disposition, des jalons académiques et avec Bpifrance. On peut en particulier y observer l'évolution dans les champs disciplinaires investigués pour formuler les hypothèses et les questions de recherche.

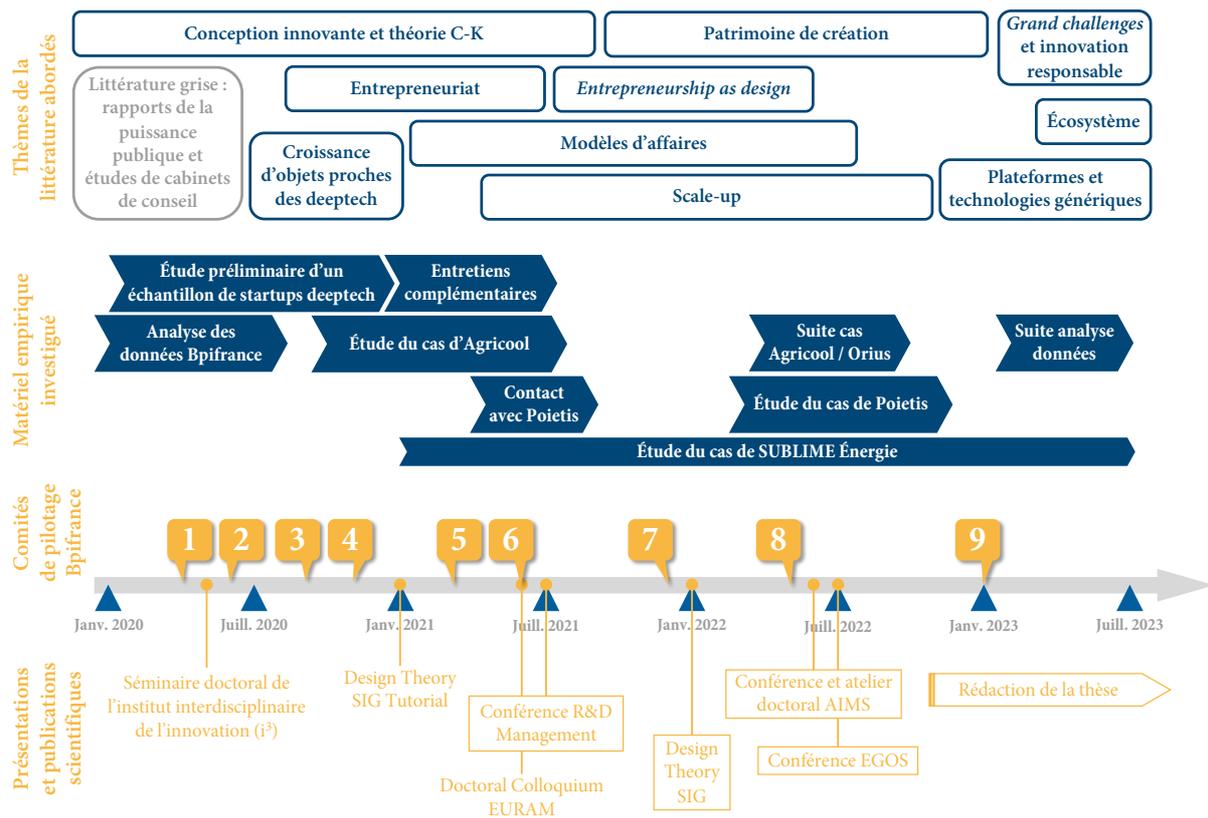


Figure 15. Chronologie des grandes étapes de la recherche

La dernière ligne représente certaines interactions avec la communauté académique, celles encadrées signifient qu’elles ont donné lieu à une communication écrite. Il faut ajouter à ces présentations et publications plusieurs autres occasions de discussion des travaux avec des chercheurs, majoritairement issus du CGS :

- les comités de suivi individuels de thèse, ayant lieu chaque année courant juin pour valider la réinscription en doctorat ;
- les présentations lors des séminaires doctoraux (en mai 2020, en mai 2021, en mai 2022 et en janvier 2023) ;
- dans le cadre des réunions hebdomadaires des chaires de recherche Théorie et méthodes de la conception innovante et Théorie de l’entreprise, modèles de gouvernance et création collective.

Les comités de pilotage organisés avec Bpifrance, et plus particulièrement Pascale Ribon, directrice Deeptech, n’ont pas été les seules interactions avec des praticiens. Les deux chaires de recherche auxquelles ces travaux ont été rattachés organisent en effet chaque année une séance d’échanges et de réflexion avec leurs partenaires respectifs, ce qui m’a donné l’occasion de présenter en 2021, 2022 et 2023.

Enfin, la ligne intitulée « Matériel empirique investigué » reprend chronologiquement les diverses acquisitions de données détaillées dans les Tableau 10, Tableau 11 et Tableau 12 de la section précédente. C’est à présent le choix d’une interaction forte avec les startups Agricool, Poietis et SUBLIME Énergie, comme mode principal d’acquisition des données sur toute la durée de la thèse, qui se doit d’être justifié.

2. Une interaction assumée pour un apport théorique et managérial

2.1. Posture épistémologique : une proximité avec le terrain pour acquérir des connaissances nouvelles

Il convient tout d'abord de préciser pourquoi une position épistémologique qui se serait appuyée sur un raisonnement hypothético-déductif à partir d'études quantitatives n'a pas semblé appropriée. En effet, les bases de données mises à disposition par Bpifrance sur les startups deeptech au début des travaux n'étaient pas suffisamment fournies. Depuis, la mise en place de l'observatoire des startups deeptech menée par la Direction Deeptech a amélioré ce point vis-à-vis du nombre de startups dans la base ainsi que de la validité des données collectées. Ce projet s'étant déroulé simultanément aux travaux de recherche entrepris, il n'a pas été possible de s'y référer exclusivement. Par ailleurs, la majorité des descripteurs utilisés dans les bases de données de Bpifrance ne sont pas spécifiques à la qualité de deeptech : si les indicateurs relatifs aux levées de fonds ou aux partenariats de recherche et aux organismes de transfert de technologie apparaissent maintenant dans l'observatoire des startups deeptech de Bpifrance, on a pu en apprécier leurs limites dès le chapitre 1, en particulier lorsqu'il s'agit de caractériser le scale-up et de prédire la réussite de cette phase (chapitre 1, section 1.2.3). Compte-tenu des premières investigations, la posture épistémologique choisie a été celle d'une interaction forte avec un terrain de recherche constitué de trois startups deeptech à des moments différents de leur passage à l'échelle.

Alors qu'en sciences sociales les chercheurs choisissent majoritairement « d'adopter un point de vue d'extériorité par rapport à son terrain d'étude comme gage de scientificité » (Aggeri, 2016, p.1), les sciences de gestion ont vu naître une nouvelle forme d'interaction avec le terrain de recherche, que Moisdon (1984) va jusqu'à qualifier de « continue », en précisant qu'elle s'étale généralement sur une année. Cette forme de recherche a vu le jour dans les années 80 plus particulièrement au sein de deux centres de recherche d'écoles d'ingénieur, à savoir le Centre de recherche en gestion de l'École Polytechnique et le CGS de l'École des Mines de Paris (devenue Mines Paris – PSL). L'émergence de cette nouvelle approche n'est pas sans lien avec la formation d'ingénieur des chercheurs qui en ont la paternité : il s'agissait en effet dès les années 60 d'avoir recours pour l'étude des entreprises à des méthodes et des outils dont les ingénieurs faisaient régulièrement usage, à savoir la recherche opérationnelle et le calcul économique.

Ce sont alors surtout les éléments surprenants, non saisis par les théories en vigueur, qui ont attiré leur attention. La recherche-intervention, parfois appelée recherche-collaborative, est bien plus proche du terrain rendant possible ces étonnements : quand Aggeri (2016) évoque une « immersion dans l'organisation en vue de conduire une intervention, c'est-à-dire d'accompagner ou de susciter une transformation des organisations », Hatchuel (1994) détaille en soulignant que la démarche va jusqu'à « produire aussi les savoirs et les concepts qui permettent de penser les trajectoires dans lesquelles un collectif pourrait s'engager » (p.70). Le chercheur est alors dans une posture où il interagit avec un terrain de recherche dont il est proche.

Cette interaction revêt plusieurs objectifs, au-delà de la nécessaire observation. L'acquisition des données est réalisée non seulement pour décrire ou comprendre les situations rencontrées, mais surtout dans le but de dépasser les rationalisations communes face à l'action, de

proposer des modèles et de les discuter (toujours dans le cadre de cette interaction) pour être en mesure d'interpréter les représentations de l'action et *in fine* d'explorer de nouveaux modèles d'action avec les acteurs du terrain. C'est en cela plus particulièrement que l'interaction du chercheur avec le terrain de recherche est de l'ordre d'une intervention.

2.2. Principes méthodologiques de la recherche-intervention

Concernant la position du chercheur-intervenant, Hatchuel (1994) met en évidence à partir d'une rétrospective des pensées de Taylor et de Weber, et de leurs regards respectivement technique et sociologique, que sa démarche doit être mue par la compréhension du « dédale des relations entre acteurs [qui] peut aussi être producteur de nouvelles formes sociales ou de nouveaux savoirs » puisque « les phénomènes organisationnels commencent au moment où [...] dans leurs conduites et leurs confrontations, savoirs et relations sont inséparables » (p.63).

Les travaux réalisés par David (2000) et repris dans le livre *Les nouvelles fondations des sciences de gestion* (2012) remettent en perspective les différentes approches scientifiques d'étude du terrain lorsqu'il y a une action de la part du chercheur. Celui-ci, dont le rôle n'est plus seulement celui d'un observateur extérieur, exerce donc une influence sur les événements du milieu qu'il étudie. Plusieurs communautés de recherche en font l'expérience et ont développé des méthodologies proches, reprises par David (2000) : *action research*, *action science*, science de l'aide à la décision et recherche-intervention en sciences de gestion (les trois premières étant préalables à la dernière). À partir de ces démarches, l'auteur en tire un « cadre général pour les sciences de gestion » intégrant les différentes méthodes décrites autour de principes communs pour conclure le propos par la définition suivante : « La recherche-intervention consiste à aider, sur le terrain, à concevoir et à mettre en place des modèles, outils et procédures de gestion adéquats, à partir d'un projet de transformation plus ou moins complètement défini, avec comme objectif de produire à la fois des connaissances utiles pour l'action et des théories de différents niveaux de généralité en sciences de gestion. » (p.20). Dans une méthodologie de recherche-intervention, le terrain est toujours considéré comme un lieu d'observation et de génération de connaissances, mais il devient aussi une source directe d'émergence de théories. On peut résumer ces différents propos à partir de trois étapes-clefs dans la démarche de recherche-intervention : une étape d'analyse sur la base de l'observation du terrain, une étape de modélisation du réel et une étape de transformation grâce aux apprentissages et aux méthodes issus du modèle réalisé.

Compte-tenu de l'absence de transformations réelles mises en œuvre dans les organisations étudiées, l'intervention réalisée avec les startups reste limitée. Néanmoins, ce serait négliger une des dimensions du dispositif de recherche mis en place que de considérer que la démarche n'a pas relevé d'une recherche-intervention : le premier bénéficiaire des résultats issus de ces travaux reste bien Bpifrance. Si le temps imparti pour réaliser la thèse n'a pas permis d'aboutir à la création de produits d'accompagnement propres à la croissance des startups deeptech, les travaux ont tout de même nourri les réflexions menées au sein de la Direction Deeptech. Les 9 comités de pilotage occasionnés ont été autant de lieu de confrontation du terrain que constitue la Direction Deeptech avec les recherches auprès des startups elles-mêmes. La chronologie de ces comités de pilotage a été précisée dans la Figure 15. Ainsi, le positionnement global des travaux correspond à une recherche menée

sur un terrain, c'est-à-dire les startups deeptech, pour concevoir un modèle, relatif à la phase de scale-up, nécessaire à l'intervention d'un tiers, à savoir la Direction Deeptech de Bpifrance, sur le terrain initial.

2.3. Originalité de l'approche méthodologique

Une approche exploratoire a d'abord été tentée. Plusieurs entretiens semi-directifs avec des startups ont ainsi été mis en œuvre dans le but de faire apparaître les efforts de conception propres à la phase de scale-up des startups deeptech. Si cette brève étape dans le travail de recherche a mis en évidence la grande variété des efforts à conduire, elle a surtout souligné la difficulté à saisir les inconnus relatifs à la conception des technologies, ce qui nécessite une étude très approfondie des systèmes techniques considérés. S'il avait été envisagé de limiter l'étude à un secteur d'activités particulier pour se spécialiser sur un certain type de problématiques techniques, on aurait pu de toutes façons craindre de rajouter des biais sectoriels d'autant plus inutiles que la définition des startups deeptech retenue par Bpifrance ne génère pas de contraintes sur les domaines d'application.

C'est la nécessité de comprendre les difficultés relatives à l'émergence d'inconnus technologiques et marchés qui nous a conduits à entreprendre une démarche de recherche-intervention. Dans un premier temps, l'approche a consisté à identifier des cas d'étude propices à la compréhension du rapport entre la technologie et les marchés visés. Cela a ensuite demandé une analyse très fine des raisonnements de conception conduisant à l'émergence du deuxième produit, en s'intéressant à la construction du patrimoine de création de la startup au cours de cette phase particulière qu'est le passage à l'échelle.

En faisant le choix de réaliser une recherche-intervention au sein de startups deeptech, on s'inscrit dans la lignée des travaux menés par Ben Mahmoud Jouini et al. (2010) sur la recherche-intervention comme recherche-accompagnement dans le cas de startups innovantes. Plus de 10 ans après leurs travaux, le constat que la recherche-intervention n'a pas encore été déployée dans le monde de l'entrepreneuriat³² est toujours valable, alors même que son usage s'est répandu dans les grands groupes. L'expérience décrite par les auteurs a d'ailleurs plusieurs points de convergence avec la nôtre : les relations sont durables, bilatérales et singulières, tout en se tissant simultanément au développement de l'organisation considérée.

Toutefois notre intervention au sein des startups est restée limitée ; la modélisation de la phase de scale-up ayant dès le départ pour ambition de nourrir la réflexion engagée par Bpifrance. En enrichissant les connaissances de la banque publique sur le fonctionnement de l'étape de forte croissance qu'est le scale-up, ce sont les outils et les pratiques relatifs à l'accompagnement et au financement des startups deeptech qui s'en trouvent améliorés. De l'effort de modélisation réalisé, nous en déduisons des recommandations pour Bpifrance en conclusion de cette thèse.

³² La base de données Scopus indique au 20/07/2023 que seulement 29 et 48 articles répondent aux critères de recherche-intervention et de startup ou d'entrepreneuriat respectivement (les requêtes fournies étant "collaborative research" AND "start-up*" et "collaborative research" AND "entrepreneurship" pour les champs titre, résumé, mots-clés).

Cette position au sein de la Direction Deeptech de Bpifrance a été rendue possible par le dispositif Cifre³³ de l'Association nationale de la recherche et de la technologie (ANRT) qui subventionne les entreprises employant un doctorant dans le cadre d'un partenariat avec un laboratoire de recherche public. Le doctorant est donc directement intégré au terrain de recherche. Le choix d'une démarche de recherche-intervention est alors plus évident ; dans ce cas, « la thèse Cifre poursuit deux finalités : agir avec l'entreprise dans l'optimisation de sa performance et participer à la production de connaissances dans le cadre d'une recherche scientifique » selon les travaux menés par Rasolofo-Distler et Zawadzki (2013, p.5). Les auteurs détaillent ensuite les conditions de validité scientifique des résultats de la recherche : l'existence de comités de contrôle entre les parties prenantes (entreprise et laboratoire), une diversité dans les modalités d'acquisition des données et la triangulation de celles-ci, une distanciation du doctorant vis-à-vis du terrain de recherche pour limiter les biais. Puis ils concluent en démontrant « que les thèses Cifre contribuent à la production de connaissances scientifiques, tout en présentant un apport managérial élevé » (p.12). C'est dans ce même cadre que se sont déroulés ces travaux de thèse, en respectant les conditions de scientificité précisées précédemment. Le rapport de recherche de Plantec et al. (2023) sur les collaborations science-industrie à travers le prisme des thèses Cifre récapitule les modes de collaboration mis en place dans le cadre des thèses Cifre. Ils définissent en particulier trois stratégies de recherche, dont une stratégie dite « exploratoire » basée sur des « approches transdisciplinaires, [des] champs d'innovation nouveaux, [des] contextes d'innovation de rupture » (Plantec et al., 2023, p.7), qui rejoint les dispositions dans lesquelles cette thèse, sur un objet de recherche nouveau et original que sont les startups deeptech et plus particulièrement leur phase de scale-up, s'est déroulée.

Il faut par ailleurs ajouter que venant d'une structure de financement et d'investissement, il était important d'assurer une saine neutralité dans les relations avec les entreprises étudiées. Cela a été facilité par l'intégration de la Direction Deeptech, rattachée à la direction innovation, dans la partie financement de la banque publique. La séparation entre les entités de financement et d'investissement fournissait une garantie contre les risques de conflit d'intérêt entre les activités. De plus, en assurant l'absence d'influence des travaux de recherche sur les processus de décision pour l'attribution des produits financiers ou des fonds, les échanges avec les startups étudiées ont été plus libres.

3. Construire un terrain représentatif à partir d'un panel varié de startups deeptech à différents moments de la phase de scale-up

3.1. Le choix d'une approche qualitative à partir d'une étude de cas multiples pour dépasser l'impasse des descripteurs

Considérant la spécificité des startups deeptech et les difficultés inhérentes à leur développement, qui font consensus au niveau des acteurs de l'écosystème, les premières analyses

³³ L'acronyme signifie « Convention industrielle de formation par la recherche ».

quantitatives menées à partir des données à disposition n'ont pas fourni une caractérisation originale des startups deeptech vis-à-vis d'autres startups innovantes. Une démarche plus exploratoire a donc été mise en place et s'est appuyée directement sur les startups deeptech elles-mêmes pour en saisir au mieux les mécanismes propres de développement. Il aurait été aussi envisageable de mener une étude qualitative en s'intéressant aux processus d'investissement internes à Bpifrance ou aux solutions de financement déployées par Bpifrance, mais cela ne nous aurait pas permis d'étudier précisément la conception technique des produits par les startups. Face aux forts inconnus technologiques caractéristiques de ce type d'entreprises, nous avons préféré en tenir compte au mieux dans le cadre de la démarche finalement adoptée et dans le but de saisir plus particulièrement la constitution du patrimoine de création.

L'intérêt d'une approche qualitative à partir d'une étude de cas multiples réside aussi dans la variété des données à disposition. Compte-tenu du raisonnement abductif sur lequel nous nous basons, cette grande variété de données a permis une exploration large des phénomènes. Siggelkow (2007) présente d'ailleurs plusieurs arguments pour défendre les études de cas et exprime ainsi : « *The immersion in rich case data enables, however, the second main use of cases : an inspiration for new ideas.* » (p.21), laissant supposer une certaine générativité de ces cas d'étude uniques intrinsèquement riches.

Dans le but de proposer une généralisation plus acceptable de la modélisation réalisée, nous n'avons pas restreint nos cas d'étude à un unique secteur d'application et nous avons étudié trois startups deeptech à des moments différents de leur phase de scale-up. Nous nous positionnons ainsi dans la lignée des travaux d'Eisenhardt et Graebner (2007) en construisant une théorie à partir d'une étude de cas multiples. Outre la diversité des cas inhérente aux secteurs d'application et aux moments du scale-up, les modalités d'acquisition des données ont été différentes selon les cas (elles seront précisées dans les chapitres propres à chaque cas) : le contraste ainsi proposé permet d'élaborer des modèles valides dans diverses circonstances et de gagner en précision vis-à-vis de la nature des données à récupérer, répondant ainsi à un enjeu de minimisation en vue d'un large accès à un potentiel dispositif d'accompagnement. C'est aussi grâce au contraste entre les cas que plusieurs questions de recherche ont pu être soulevées. Avant de rendre les résultats généralisables, il s'agit déjà de sélectionner des cas représentatifs.

3.2. Sélection des cas d'étude dans le contexte de la Covid-19

La démarche de recherche de cas d'étude a d'abord été opportuniste, basée sur les connaissances partagées, les discussions autour de telle ou telle technologie et les rencontres fortuites. Néanmoins, il faut préciser que la période de recherche des cas a été particulièrement mise à mal par l'apparition de la Covid-19 ayant conduit au premier confinement en mars 2020, deux mois seulement après le début des travaux de thèse. Les périodes de confinement et de couvre-feu s'étant succédées jusqu'en juin 2021, auxquelles s'ajoutait l'obligation de télétravail, ce sont toutes les occasions informelles de rencontre des acteurs qui n'ont pas pu avoir lieu durant de longs mois, limitant de fait les opportunités de collaboration.

Face à ce contexte, pour mettre en place des recherches-interventions, il a été plus aisé de se rapprocher de startups avec qui des contacts préliminaires avaient été établis au sein du CGS.

Agricool a été la première startup avec qui une interaction sur la durée a été permise, les dirigeants s'étant rapprochés du centre de recherche dans le but de mettre en place un projet avec l'option *Ingénierie de la Conception* du cursus ingénieur de Mines Paris – PSL au cours de l'année universitaire 2020-2021. Ils cherchaient en effet à caractériser leur modèle de développement et à explorer les possibilités concernant les systèmes de cultures futurs à concevoir dans une phase de forts changements avec des enjeux d'industrialisation et de constitution d'une gamme de produits. La mise en place du projet d'option incluant un stage de six mois réalisé par une élève-ingénieur en dernière année m'a permis d'intégrer l'équipe d'encadrement (nous étions trois doctorants à des étapes différentes de nos travaux) et d'assurer un suivi hebdomadaire du projet.

La rencontre avec SUBLIME Énergie a eu lieu au début de l'année 2021 dans le cadre d'un événement virtuel organisé par la Direction Deeptech de Bpifrance autour des entreprises à mission. Le président de SUBLIME Énergie intervenait aux côtés d'un professeur du CGS, membre du comité de mission de la startup. Les centres d'intérêt entre ces trois entités convergeant, nous avons assez naturellement engagé une collaboration sous la forme d'une étude longitudinale pour comprendre la construction du rapport à l'écosystème lorsque l'entreprise développe un plan de maturation technologique dans le but de passer à l'échelle.

Enfin, le dernier cas a été approché compte-tenu de sa pertinence par rapport aux questionnements soulevés. Le caractère fortement deeptech de la technologie de Poietis, la richesse du portefeuille de brevets développé ainsi que la maturité de l'entreprise en cours de scale-up fournissaient déjà des garanties quant à l'intérêt de ce cas. De premiers contacts avaient été noués d'une part avec quelques chercheurs du CGS et d'autre part avec la Direction Deeptech, les dirigeants de Poietis ayant été sollicités à plusieurs reprises, ce qui avait aussi permis de mener un premier entretien avant d'entamer véritablement notre collaboration.

Il faut par ailleurs préciser que pour s'affranchir d'un biais sur le secteur d'activité ou sur la région d'origine, nous avons travaillé avec trois startups aux profils différents. Cela ne nous a pas empêchés de veiller à intégrer un cas dans le secteur de la santé et au moins un cas basé en Île-de-France, ces deux critères étant particulièrement ressortis dans les analyses quantitatives mises en œuvre dans le chapitre 1 (en particulier, l'ACP 1 de la section 1.2.2).

3.3. Lien entre les cas d'étude et Bpifrance

Dans le processus de sélection des cas d'étude, nous avons veillé à suivre des startups clientes de Bpifrance, afin d'assurer la plus grande accessibilité possible aux données secondaires et à leur variété. En sus des données récoltées dans le cadre des recherches-interventions mises en place au sein des trois startups, nous avons ainsi pu avoir accès aux historiques des demandes de financement, aux documents fournis par les startups pour les différents dossiers de demande ou de concours ainsi qu'aux suivis écrits faits par les chargés d'affaires de Bpifrance en contact avec les entreprises. Ces suivis écrits ont par exemple été utiles pour déterminer la perception renvoyée à l'extérieur par les modèles de développement des entreprises. L'intérêt de recourir à des cas en lien avec Bpifrance réside également dans la meilleure connaissance des outils d'accompagnement proposés, ce qui est utile pour mener à bien les recommandations finales.

En outre, le fait que les trois cas d'étude fassent partie des clients de la banque publique n'introduit pas un biais significatif dans l'échantillon sélectionné. En effet, la majorité des récentes startups deeptech françaises bénéficient des dispositifs de financement mis en place par Bpifrance, comme le prouvent les données relatives à la BFTE, qui est un des produits phares de financement des startups deeptech déployé par Bpifrance. Accordée durant la première année d'existence de la startup, la BFTE est un bon indicateur du rôle de la banque publique dans le soutien à l'écosystème deeptech. À fin juin 2023, 143³⁴ startups ont pu bénéficier de ce produit. En considérant les 320 startups deeptech créées en 2022³⁵ et l'augmentation de cette part au vu de l'objectif de création de 500 startups deeptech par an à horizon 2030³⁶, on en déduit qu'au moins 80 % des startups deeptech françaises bénéficient d'une aide de Bpifrance sous la forme d'une BFTE. D'autres dispositifs de financement et d'investissement portés par la banque publique existant, notre échantillon est bien représentatif des startups deeptech créées en France.

3.4. Analyse des cas d'étude

Compte-tenu de la diversité des modalités d'intervention précisées précédemment, les différentes startups ont fait l'objet d'analyses propres, qu'ils s'agissent des méthodes ou des outils employés. Les trois cas ont apporté un regard complémentaire sur la problématique générale de la constitution du patrimoine de création en phase de scale-up et auront respectivement contribué à fournir des réponses aux questions de recherche explicitées dans le chapitre précédent. Chacun des trois chapitres suivants détaille un des cas d'étude. Les méthodologies propres à chaque cas y seront abordées et une remise en perspective avec la littérature de la question de recherche associée sera systématiquement proposée, en complément des éléments apportés dans les précédents chapitres. Ce choix de structuration a été réalisé dans le but de simplifier la lecture et de garantir la clarté de la démonstration.

³⁴ Source interne à Bpifrance

³⁵ Selon le bilan des 4 ans du plan Deeptech communiqué en mars 2023 : <https://presse.bpifrance.fr/bilan-du-plan-deeptech-a-4-ans-doublement-du-nombre-de-startups-deeptech-creees-entre-2018-et-2022/>

³⁶ Conformément aux dispositions prises dans le rapport annexé à la Loi de Programmation de la Recherche du 24 décembre 2020, L. n°2020-1674 : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000042738027>

Synthèse du chapitre 3

La définition progressive du sujet de la recherche a ainsi été menée conjointement entre Bpifrance et le CGS puis a été précisée par la formulation de premières hypothèses portant sur la phase de scale-up à partir d'analyses quantitatives et qualitatives. Dans le but de comprendre avec précision les mécanismes inhérents au développement de technologies de rupture et à la constitution de leur patrimoine de création, trois études de cas ont été conduites auprès de startups deeptech selon une approche méthodologique basée sur la recherche-intervention. Les conditions pratiques des recherches-interventions menées sur ces trois cas seront détaillées dans les chapitres suivants.

Le chapitre 4 servira à prouver l'intérêt du langage de la conception pour décrire la phase de scale-up : l'étude des développements successifs conduits par la startup de l'agriculture urbaine Agricool permettra de mettre en lumière son patrimoine de création qui apparaît au cours de la phase de scale-up. Le chapitre 5 aura pour objectif de montrer comment se construit un patrimoine de création à partir d'une modélisation de la dynamique de la plateforme réalisée par la startup Poietis spécialisée dans la bioimpression. Enfin, dans le chapitre 6, la dernière recherche-intervention menée avec SUBLIME Énergie, une startup fournissant une technologie de valorisation du biogaz, fournira des éléments pour analyser la construction du rapport avec l'écosystème lorsqu'il s'agit de planifier le passage à l'échelle.

Chapitre 4 – Décrire la phase de scale-up à partir du patrimoine de création

Chapitre 4 – Décrire la phase de scale-up à partir du patrimoine de création

1. Confronter les théories entrepreneuriales sur le scale-up avec une approche par la conception	134
1.1. La nature des préservations	134
1.2. Un outil de la conception axiomatique pour saisir le rapport entre technologie et marché	135
1.3. Gérer l'innovation dans la tradition : l'apport de la notion de patrimoine de création	136
2. Une recherche-intervention pour mettre au jour le patrimoine de création d'une startup de l'agriculture urbaine	137
2.1. Contexte de la recherche-intervention	137
2.2. Des données acquises sur la durée et dans le cadre d'une immersion sur le terrain	138
2.3. Éléments de méthode pour l'analyse du cas.....	141
2.3.1. <i>Exprimer l'activité de l'entreprise à partir des dimensions classiques du modèle d'affaires</i>	141
2.3.2. <i>Le recours au langage de la conception axiomatique pour faire apparaître de nouveaux descripteurs de l'activité</i>	141
2.3.3. <i>Confrontation des deux approches</i>	142
3. Présentation du cas d'étude : d'une solution d'indoor farming à destination des zones urbaines à la production de plantes à haute valeur ajoutée	142
3.1. De la création d'Agricool en 2015 à son redressement judiciaire en 2022 en pleine phase de scale-up	142
3.2. Le caractère deeptech des solutions de production en environnement contrôlé portées par Agricool et Orius.....	144
3.3. Une succession de modes de développement.....	146
4. Exprimer le patrimoine de création pour décrire les efforts de gestion propres au passage à l'échelle	147
4.1. Différencier les validations du modèle d'affaires et les préservations de l'architecture de conception	148
4.2. Interroger la validation des éléments du modèle d'affaires comme preuve de démarrage de la phase de scale-up	149

4.3.	Rendre visible le patrimoine de création à partir des outils de la conception pour mettre en évidence la préservation d’une structure d’indépendance.....	154
5.	L’intérêt du patrimoine de création pour la phase de scale-up.....	158
5.1.	Le premier produit comme un moyen de valider un espace de conception génératif.	158
5.2.	Les traces du patrimoine de création d’Agricool au sein de la startup Orius	159
5.3.	Les descripteurs du scale-up à la lumière du patrimoine de création	160

Ce chapitre est très largement issu d'un article en cours de révision au moment du rendu du manuscrit de la thèse pour la revue M@n@gement, revue officielle de l'Association Internationale de Management Stratégique (AIMS).

La précédente revue de la littérature a permis de saisir la difficile compréhension de la phase de scale-up, et ce d'autant plus face aux spécificités des startups deeptech. En confrontant la littérature en entrepreneuriat et celle sur le modèle d'affaires avec la littérature en conception, la distinction entre la validation des éléments du modèle d'affaires et la préservation des règles de conception génératives conduit à introduire la notion de patrimoine de création. Nous cherchons à présent à répondre à la question suivante : **comment le concept de patrimoine de création révèle-t-il les descripteurs du scale-up ?**

Dans une première partie, nous montrons l'intérêt du langage de la conception dans la mise en évidence de la distinction entre la validation du modèle d'affaires et la préservation d'une architecture de conception générative. La notion de patrimoine de création suggère en effet une stabilisation progressive de l'ingénierie de conception. Nous présentons ensuite les objectifs et le contexte dans lequel la recherche-intervention a été réalisée au sein d'Agricool dans le but de rendre compte des préservations durant la phase de scale-up (partie 2). Puis nous détaillons le cas d'étude (partie 3). Une étude comparée des MVP successifs d'Agricool, à partir d'une analyse avec le langage des modèles d'affaires et d'une analyse avec le langage de la conception axiomatique, sera l'occasion d'observer le patrimoine de création (partie 4). Enfin, dans la dernière partie, nous montrons en quoi le patrimoine de création contribue à la compréhension de la phase de scale-up.

1. Confronter les théories entrepreneuriales sur le scale-up avec une approche par la conception

1.1. La nature des préservations

Le chapitre 2 a déjà permis de distinguer la validation et la préservation par l'intermédiaire du concept de patrimoine de création (partie 4). Néanmoins, la notion de préservation n'est pas un impensé dans les théories entrepreneuriales. Par exemple, Gbadegeshin et Heinonen (2016) indiquent que ce sont les hypothèses initiales qui sont testées, éventuellement validées et préservées (« *preserve* », p.1271) ou invalidées et changées (« *pivot* », p.1271). Pour ces auteurs reprenant la littérature propre au *Lean Startup*, les validations ainsi que les préservations portent sur ces hypothèses initiales. En revanche, comme ils le précisent, celles-ci étant par nature relatives à la valeur de la solution vis-à-vis des clients et à la croissance du bénéfice apporté par la solution à ces clients, elles ne portent pas directement sur les éléments de conception technique, mais plus sur le marché. De plus, les MVP ou les pivots ne présagent en rien de la réalité du maintien des éléments validés (relatifs aux dimensions du modèle d'affaires) dans les développements futurs. Ainsi, si la validation des hypothèses initiales du modèle d'affaires entraîne naturellement une préservation de celles-ci, il est possible d'interroger non pas l'existence de préservations dans les théories

entrepreneuriales mais la nature même des objets à préserver. Lorsqu'il ne s'agit plus de valider ou de préserver les hypothèses du modèle d'affaires, la distinction entre validation et préservation apparaît comme un point critique non encore traité par la littérature en entrepreneuriat.

C'est pourquoi le détour par les théories de la conception qui apportent la notion de patrimoine de création pour faire cette distinction se révèle pertinent. En opérant un déplacement sur l'objet à considérer, le concept de patrimoine de création ouvre la voie à la prise en compte de l'architecture de conception comme un élément préservé et garant de la capacité d'innovation future (c'est-à-dire génératif). Dès lors l'enjeu est de mettre en évidence les règles qui régissent cette architecture, autrement dit de comprendre comment se constituent les règles du patrimoine de création, et de déterminer si elles sont préservées ou étendues (dans le sens où l'on puisse concevoir de nouvelles règles à partir des anciennes).

1.2. Un outil de la conception axiomatique pour saisir le rapport entre technologie et marché

L'intérêt de la confrontation entre l'approche proposée par la conception et les méthodologies classiques de l'entrepreneuriat a pu être précédemment démontré dans le cas de la construction d'un modèle de développement des clients à partir de la méthodologie du *Lean Startup* et des outils de la conception axiomatique (Girgenti et al., 2016). Tandis que l'approche issue du *Lean Startup* permet une focalisation du produit sur les besoins du client testés au fur et à mesure du développement des MVP, la conception axiomatique part du cahier des charges fonctionnel pour définir le produit ; ce qui rend ces approches complémentaires lorsqu'il s'agit de concevoir les MVP et d'analyser les retours clients. Girgenti et al. (2016) ont recours à la conception axiomatique pour franchir des étapes du *Lean Startup* et ainsi pouvoir fournir une preuve de la validation du *product-market fit* (et donc du modèle d'affaires).

La conception axiomatique introduite par Suh (1990) fournit en effet une méthode pour l'évaluation de la conception de systèmes à partir des besoins utilisateurs traduits en besoins fonctionnels et en paramètres de conception. La méthodologie développée s'appuie sur deux axiomes régissant une bonne conception (Suh, 1998) : l'axiome d'indépendance, pour s'assurer au cours de la conception que les besoins fonctionnels restent indépendants, et l'axiome de l'information, pour faire en sorte de minimiser les informations dans la conception. On est alors en mesure de qualifier la conception de systèmes complexes selon qu'ils respectent ou non les axiomes définis : cette méthodologie fournit un outil intéressant pour décrire la démarche de conception innovante mise en œuvre au sein d'une jeune pousse qui cherche à atteindre la phase de scale-up. La mise en œuvre de cette méthode passe par l'élaboration d'une matrice, dite de Suh, décrivant la relation entre les besoins fonctionnels et les paramètres de conception.

Par exemple, chacun des MVP réalisés peut être traduit par une matrice de Suh : en représentant les clients et les combinaisons de techniques pour répondre à leurs besoins, cette matrice fournit une explication quant à la construction du rapport entre les techniques (ou technologies) et la représentation des marchés. Dès lors, il est possible d'utiliser les matrices de Suh pour représenter les choix stratégiques du modèle d'affaires et leur lien avec les solutions en termes de conception. Contrairement aux travaux de Girgenti et al. (2016), qui font usage des matrices de

Suh au niveau de la conception même des produits, on peut envisager une utilisation *a posteriori* des matrices de Suh pour analyser les choix de conception réalisés dans chaque MVP. Dans ce cas, les MVP sont traduits sous forme de matrices de Suh dans le but de les comparer ensuite. En analysant l'évolution des matrices entre les MVP, nous tâchons de mettre en lumière la construction progressive de la capacité à réussir le passage à l'échelle.

1.3. Gérer l'innovation dans la tradition : l'apport de la notion de patrimoine de création

Qu'il s'agisse des entreprises *high-tech* (Maidique & Hayes, 1984) ou du passage d'une petite structure à une entreprise de taille plus importante (Fombrun & Wally, 1989), les travaux de recherche mettent en évidence une tension intrinsèque à ces situations : la nécessaire poursuite de l'activité d'innovation menée conjointement à une activité de structuration de l'entreprise. L'opposition porte bien sur l'introduction de nouveautés mise en rapport avec la stabilisation progressive des règles dont se dote l'entreprise pour son activité de conception. C'est le compromis entre la nouveauté et la préservation qui définit ensuite le degré d'innovation.

En présentant ce compromis, H. Harlé et al. (2021) introduisent le concept de patrimoine de création et vont jusqu'à évoquer un positionnement nouveau, « *innovation within tradition* » (p.143), permis par ce concept qui ne remet pas en cause toutes les règles de conception sans non plus toutes les conserver. Pour définir l'innovation dans la tradition, les auteurs se basent sur le modèle de patrimoine de création développé par Hatchuel et al. (2019) à partir de la combinaison entre la théorie C-K et la théorie des topos de Grothendieck³⁷. L'intérêt des topos réside en effet dans leur capacité à décrire un éventail de situations entre la conservation des règles de conception et leur renouvellement total ; ils permettent d'introduire un régime de jugement de la nouveauté. En combinant l'approche des topos avec une théorie portant sur le raisonnement de conception, il est alors possible de penser la conception de solutions nouvelles qui respectent certaines règles de la tradition. C'est l'intérêt du concept de patrimoine de création qui est issu de cette confrontation.

Dans le cas d'une startup en développement, le patrimoine de création transparaît justement au niveau du paradoxe entre l'activité d'innovation et la structuration de l'entreprise qui demande des préservations. La recherche de l'expression du patrimoine de création est alors un

³⁷ Le mathématicien, Alexandre Grothendieck (1928-2014), définira lui-même, dans son œuvre *Récoltes et Semailles*, écrite entre 1983 et 1986, les topos comme : « ce "lit", ou cette "rivière profonde" où viennent s'épouser la géométrie et l'algèbre, la topologie et l'arithmétique, la logique mathématique et la théorie des catégories, le monde du continu et celui des structures "discontinues" ou "discrètes". [...] Il est ce que j'ai conçu de plus vaste, pour saisir avec finesse, par un même langage riche en résonances géométriques, une "essence" commune à des situations des plus éloignées les unes des autres provenant de telle région ou de telle autre du vaste univers des choses mathématiques ». C'est sa quête de ce qui est le *milieu* qui conduit Alexandre Grothendieck à unifier la théorie mathématique ; dans le cadre d'une conférence-débat donnée au CERN le 27 janvier 1972, Alexandre Grothendieck précise : « Une chose toute particulière aux mathématiques, c'est que chaque proposition, si l'on met à part les subtilités logiques, est ou bien vraie ou bien fausse ; il n'y a pas de milieu entre les deux, la dichotomie est totale. En fait, cela ne correspond absolument pas à la nature des choses. Dans la nature, dans la vie, il n'y a pas de propositions qui soient absolument vraies ou absolument fausses. Il y a même lieu souvent, pour bien appréhender la réalité, de prendre en ligne de compte des aspects en apparence contradictoires, en tous cas, des aspects complémentaires, et tous les deux sont importants. »

moyen de saisir le processus de stabilisation progressive des règles de conception de l'entreprise qui permettent de maintenir des capacités d'innovation.

2. Une recherche-intervention pour mettre au jour le patrimoine de création d'une startup de l'agriculture urbaine

Nous avons cherché à rendre visible la tension entre la validation des éléments du modèle d'affaires, construit au fur et à mesure des MVP successifs, et les préservations au niveau des règles de conception que l'entreprise se donne pour se développer. Conformément aux propos développés dans le chapitre précédent, nous avons mis en place une recherche-intervention (Aggeri, 2016), au sein d'une startup de l'agriculture urbaine, Agricool. Une partie de l'équipe technique, dont le directeur technique de l'ingénierie Pierre Jay, ayant quitté Agricool pour fonder une autre startup, Orius, spécialisée dans la conception de systèmes de production en environnement contrôlé, notre recherche prend aussi en compte des éléments issus de cette nouvelle entité.

2.1. Contexte de la recherche-intervention

C'est le directeur technique de l'ingénierie en charge de la conception, de l'ingénierie et du développement des technologies, Pierre Jay, qui s'est approché du CGS en 2020 dans le but d'élaborer les futurs modèles de développement de la startup permettant une augmentation de la production. La modalité retenue pour la collaboration a été celle d'un projet de fin d'études mis en place avec une étudiante de l'option *Ingénierie de la Conception*, en dernière année du cycle ingénieur civil de Mines Paris. L'encadrement de ce projet a été l'occasion d'avoir un accès direct à un cas d'étude qui correspondait à l'objet de recherche étudié, à savoir une startup deeptech en phase de scale-up.

La recherche-intervention a été conduite dans le cadre d'un projet de master 2, au cours de l'année universitaire 2020-2021, d'octobre à juin, en co-encadrement entre la startup (à travers la mise en place d'un stage) et trois jeunes chercheurs de l'équipe pédagogique de la formation. Les réunions, d'une heure et demie en moyenne, entre l'étudiante en projet de fin d'études et les encadrants se sont déroulées hebdomadairement sur cette période. Une première partie du projet, d'octobre à février, a été réalisée à raison d'un jour de travail par semaine par l'étudiante qui n'était pas encore intégrée à l'entreprise (étape bibliographique, précision du sujet et récupération des informations utiles en interne et en externe pour mieux connaître le contexte et l'historique de développement de la startup). La seconde partie a pris la forme d'un stage de fin d'études entre mars et juin, l'étudiante étant alors intégrée à temps plein dans la startup.

La problématique générale du projet de fin d'études portait sur l'enjeu de développement de la startup parallèlement à celui d'une préservation du modèle de développement, qui était à déterminer. L'exploration menée dans le cadre de cette recherche-intervention a porté sur la conception d'un système de production inspiré des serres qui respecte les spécificités du modèle d'Agricool. La première partie du travail a donc consisté à déterminer ce modèle ; ce qui a été réalisé à partir d'une étude des performances de la startup vis-à-vis de ses concurrents et de la mise en

évidence du patrimoine de création de la startup (c'est-à-dire des règles de conception mises en place pour atteindre ces performances). Dans un second temps, l'étude a porté sur la conception d'un nouveau système de production à partir d'un système de serres.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons plus spécifiquement à la caractérisation du modèle de développement de l'entreprise à travers l'étude de la conception des systèmes agricoles successifs mis en place et nous cherchons à représenter la tension entre l'effort de conception technique et la réponse à des enjeux relatifs au marché à partir des MVP mis en place par la startup pour passer à l'échelle. Ce sont plus particulièrement les enjeux rencontrés pour réaliser le passage à l'échelle qui ont attiré notre attention sur l'intérêt de ce cas vis-à-vis des questionnements de la thèse. La richesse des données collectées, présentées dans la section suivante, ont confirmé la pertinence de cette recherche-intervention pour appréhender la question des descripteurs de cette phase-clé du développement.

Les liens de cette startup avec Bpifrance ont corroboré la pertinence de ce cas d'étude. La startup étant à la fois cliente des offres de financement et membre du portefeuille d'investissement, cela a facilité l'accès aux données et a diversifié leur nature. Agricool a en effet réalisé plusieurs demandes de financement auprès de la banque publique tout au long de son histoire pour des montants variables : il s'est notamment agi d'avances récupérables pour soutenir les dépenses de R&D, de prêts d'amorçage investissement en accompagnement d'une levée de fonds, de prêts innovation pour le financement du développement des fermes ou encore d'une solution de renforcement de la structure financière suite aux difficultés engendrées par le contexte de la Covid-19. Au-delà des dispositifs de financement dont a bénéficié Agricool, Bpifrance, à travers son fonds Large Venture, a également investi dans la startup en décembre 2018, détenant alors 8,90 % des parts. Concernant Orius, la startup a intégré l'observatoire des startups deeptech de Bpifrance, et a aussi bénéficié d'aides au développement sous la forme d'une subvention avec une BFTE et d'un prêt innovation pour la R&D.

Il est aussi important de noter que cette recherche-intervention a été la première mise en place dans le cadre de ces travaux de thèse. Agricool est le cas d'étude pour lequel nous avons récolté le plus de données et au sein duquel l'intervention a été la plus importante. Cette récolte massive de données s'explique aussi par la recherche de celles les plus utiles dans la définition des descripteurs du passage à l'échelle et *a fortiori* du patrimoine de création. Cette modalité de recherche-intervention n'avait, dès le début, pas vocation à être reproduite dans les cas d'étude ultérieurs.

2.2. Des données acquises sur la durée et dans le cadre d'une immersion sur le terrain

Pour étudier la construction des MVP successifs, nous avons cherché à décrire précisément les modèles de développement (passés, présents et envisagés dans le futur) selon deux points de vue complémentaires : l'un issu de la revue de littérature en *business model* et l'autre par le recours à un outil de la conception axiomatique, les matrices de Suh (Suh, 1998). Les modèles de développement considérés correspondent à ceux se déployant au cours du passage à l'échelle, puisque c'est bien cette phase qui constitue l'objet de recherche. En étudiant cette construction progressive dans la phase même de scale-up, nous cherchons à mettre en évidence ses mécanismes propres.

Le temps d'immersion dans l'entreprise dans le cadre du projet de master a été l'occasion d'une récolte conséquente et rigoureuse des données par l'étudiante. Ces dernières ont été obtenues d'une part à partir d'entretiens menés avec un à plusieurs membres de chaque équipe. L'objectif des entretiens était de reconstituer l'historique des développements réalisés et de comprendre les implications techniques des choix effectués au niveau du *business model*. Ainsi, 8 collaborateurs de l'entreprise ont pu être spécifiquement interrogés par l'étudiante au cours d'entretiens d'environ une heure : le directeur général et co-fondateur, les deux directeurs techniques de l'ingénierie et de l'agronomie, le responsable des partenariats industriels, le responsable des opérations, le responsable de projet production, les deux responsables de vente et de secteur. Les interactions avec le directeur technique de l'ingénierie, encadrant du projet de master pour Agricool, ne sont pas dénombrables et les travaux de recherche ont fait l'objet d'un suivi rapproché de sa part. En outre, dans le cadre du parcours d'intégration dans l'entreprise de l'étudiante, des réunions avec l'ensemble des pôles ont été organisées pour mieux connaître la structure organisationnelle de l'entreprise (rôles, missions et enjeux de chaque pôle) : notamment, le marketing pour acquérir une vision des produits ; l'exploitation (production et maintenance) ; la R&D (sur plusieurs domaines). Les personnes précédemment citées sont restées accessibles tout au long de l'immersion.

L'immersion a également été l'occasion pour l'étudiante de passer plusieurs journées au sein des lieux de production (les systèmes de production ont ainsi pu être visités) et des lieux de distribution, permettant d'acquérir les connaissances utiles pour la description de la conception des modèles productifs et la gestion de la commercialisation. L'ensemble de la documentation interne (archives comprises) était également disponible pour retracer les développements successifs réalisés.

Par ailleurs, pour répondre à la partie de la problématique du projet de master portant plus spécifiquement sur les enjeux de développement futurs de la startup, des ateliers de conception (inspirés des ateliers KCP définis par Elmquist et Segrestin (2009)) ont été réalisés avec les équipes d'ingénierie et d'agronomie (une dizaine de personnes impliquées sur trois séances de deux heures). La mise en place de ces ateliers, dont les activités se divisent en trois parties (connaissances, concepts, projets), a également été l'occasion à travers les discussions entre les participants de compléter et d'affiner les connaissances sur les développements et les savoir-faire passés, présents et à acquérir. Une partie de ces connaissances ont été utiles dans l'élaboration des analyses en particulier au sujet du projet de serre technologique.

Enfin, les données récoltées pendant le projet de master ont depuis été enrichies par des sources publiques d'informations (communications diverses à travers différents médias : écrit, vidéo, audio), par des informations internes à Bpifrance, ainsi que par la lecture des brevets de la startup, fournissant des éléments techniques complémentaires. Deux entretiens complémentaires, d'une demi-heure chacun, ont également été menés en avril 2022 avec d'une part le directeur technique de l'ingénierie et d'autre part le représentant du fonds Large Venture de Bpifrance au conseil d'administration d'Agriool, dans le but de revenir sur les choix d'évolution du modèle d'affaires relativement aux capacités de conception technique.

Les encadrants de l'équipe pédagogique du master ont échangé et rencontré les porteurs du projet du côté de la startup au cours des trois comités de pilotage organisés. Un comité de pilotage de lancement a été organisé en octobre 2020 entre les encadrants et l'étudiant d'une part et les deux

directeurs techniques de l'ingénierie et de l'agronomie d'autre part. Un comité de pilotage intermédiaire a eu lieu en février 2021 pour dresser un premier bilan des connaissances accumulées et échanger sur les pistes à explorer pour la deuxième période de travail. Du côté de la startup, seul le directeur technique de l'ingénierie y participait ; de même, pour le comité de pilotage final qui a été organisé en juin 2021. Ce dernier temps d'échange et de confrontation a permis de valider les résultats présentés, et plus particulièrement les matrices de Suh présentées ultérieurement. Ces diverses interactions sont récapitulées dans le Tableau 13.

Tableau 13. Calendrier et modalité des interactions directes de la doctorante dans le cadre de la recherche-intervention menée avec Agricool et Orius

<i>Date</i>	<i>Entité</i>	<i>Modalité</i>	<i>Participants</i>
<i>21 octobre 2020</i>	Agricool	Comité de pilotage de lancement et visite du site à La Courneuve	Pierre Jay , directeur technique de l'ingénierie, Agricool, futur co-fondateur d'Orius Paul-Hector Oliver , directeur technique de l'agronomie, Agricool, futur co-fondateur d'Orius Chipten Valibhay et Raphaëlle Barbier , encadrants doctorants, CGS Ellyn Redheuil , étudiante du projet, Mines Paris
<i>18 février 2021</i>	Agricool	Comité de pilotage intermédiaire	Pierre Jay , directeur technique de l'ingénierie, Agricool, futur co-fondateur d'Orius Chipten Valibhay et Raphaëlle Barbier , encadrants doctorants, CGS Ellyn Redheuil , étudiante du projet, Mines Paris
<i>19 mai 2021</i>	Agricool	Atelier de conception	Une dizaine de collaborateurs d'Agricool, principalement issus de l'équipe technique d'ingénierie dont le directeur de l'équipe Pierre Jay Ellyn Redheuil , étudiante du projet, conceptrice et animatrice de l'atelier, Mines Paris
<i>18 juin 2021</i>	Agricool	Comité de pilotage final	Pierre Jay , directeur technique de l'ingénierie, Agricool, futur co-fondateur d'Orius Chipten Valibhay et Raphaëlle Barbier , encadrants doctorants, CGS Ellyn Redheuil , étudiante du projet, Mines Paris
<i>12 avril 2022</i>	Bpifrance	Entretien	Un investisseur du fonds Large Venture de Bpifrance
<i>13 avril 2022</i>	Orius	Entretien	Pierre Jay , co-fondateur d'Orius, directeur général, responsable de l'ingénierie et directeur financier
<i>27 septembre 2022</i>	Orius	Entretien et visite du site à Toulouse	Pierre Jay , co-fondateur d'Orius, directeur général, responsable de l'ingénierie et directeur financier

2.3. Éléments de méthode pour l'analyse du cas

2.3.1. Exprimer l'activité de l'entreprise à partir des dimensions classiques du modèle d'affaires

Les dimensions classiques du langage de description du modèle d'affaires sont décrites dans le Tableau 9 au chapitre 2. La première description du développement de la startup consiste à exprimer, avec ce langage issu de la littérature sur les modèles d'affaires, les validations et les invalidations obtenues grâce aux différents MVP ou pivots réalisés (dénommés indifféremment « modes de développement » dans la suite du propos). Nous avons donc cherché à retranscrire pour chacune des dimensions les résultats issus des tests des hypothèses, pour mettre en particulier en évidence la réutilisation ou non des éléments validés dans les modes de développement suivants.

L'observation des MVP à travers le prisme des dimensions du modèle d'affaires a pour vocation de valider le modèle de développement d'Agricool. Cette analyse s'appuie à la fois sur la revue de la littérature réalisée au chapitre 2 et sur les données récoltées par l'étudiante en immersion ; elle a été conduite dans un second temps, pour compléter les travaux menés par l'étudiante. En exprimant les activités d'Agricool dans le langage des modèles d'affaires, nous cherchons à qualifier la pertinence des dimensions classiques du modèle d'affaires comme descripteurs de la phase de scale-up.

2.3.2. Le recours au langage de la conception axiomatique pour faire apparaître de nouveaux descripteurs de l'activité

Pour décrire les choix de conception réalisés au cours des développements de la startup, nous avons utilisé des matrices de Suh, qui ont été réalisées par l'étudiante dans le cadre des échanges avec les encadrants de l'équipe pédagogique. Ces matrices mettent en évidence les interactions entre les fonctionnalités recherchées par le produit développé (*functional requirements*, FR) et les paramètres de conception, comme les ressources ou les moyens, mis à disposition pour réaliser ces fonctions (*design parameters*, DP). Réaliser une matrice de Suh consiste alors à décrire le système par une liste de fonctionnalités (FR) obtenues grâce à des choix de conception (DP). Leur usage est particulièrement adapté à l'étude de systèmes complexes. L'élaboration de ces matrices a été permise grâce à la compréhension fine de la conception des différents développements de l'entreprise à travers l'acquisition de nombreuses données. Ce sont donc les FR et les DP qui ont été recherchés et définis tout au long du processus d'acquisition des données : construites simultanément grâce à une accumulation progressive des connaissances, permise par la grande proximité avec le terrain, les matrices de Suh se sont précisées tout au long de l'étude.

Au-delà des dépendances ou indépendances rendues visibles par les matrices de Suh, nous avons cherché à relier les éléments techniques (DP) au cahier des charges des clients (FR), en particulier pour être en mesure de faire le lien avec les éléments du modèle d'affaires. C'est pourquoi nous n'avons pas opté pour une représentation des choix de conception à partir d'une *design structure matrix* (ou *dependency structure matrix*), qui modélise les interactions à partir d'une matrice de la forme DP-DP (Eppinger & Browning, 2012). De récents travaux suggèrent également de fournir des nouvelles mesures de l'innovation et de la capacité à innover (Sinclair-Desgagné,

2022). Dans ce cas, le cadre d'analyse proposé se concentre sur la production de connaissances, on cherche alors plutôt à mesurer une expansion des connaissances qu'une préservation d'une architecture de conception, ce qui n'empêche pas l'une ou l'autre des approches de fournir des arguments concernant la capacité de l'entreprise à générer des produits innovants. C'est la volonté d'une compréhension du modèle de développement qui a poussé à préférer le langage de la conception axiomatique que sont les matrices de Suh.

2.3.3. Confrontation des deux approches

C'est la confrontation entre les approches portées par le langage du modèle d'affaires, plus particulièrement les méthodologies du *Lean Startup*, et celui de la conception axiomatique qui permet de mettre en lumière de nouveaux descripteurs de la phase de scale-up. Par leur complémentarité, déjà démontrée par Girgenti et al. (2016), ces approches illustrent très largement la complexité de la réussite de cette phase. La prise en compte du rapport entre technologie et marché à travers le langage de la conception rend visibles les préservations au niveau des règles de conception, qui ne sont pas saisies par le langage du modèle d'affaires centré sur la validation des hypothèses de développement. Contrairement aux travaux menés par Girgenti et al. (2016), nous avons recours aux matrices de Suh pour une analyse des MVP après leur conception, alors que les auteurs en font usage pour construire les MVP. Notre usage des matrices de Suh nous amène à souligner la différence entre la validation d'hypothèses du modèle d'affaires et la préservation d'une structure d'indépendance générative qui se construit progressivement durant le développement de la startup. Ainsi, la double analyse réalisée parallèlement fait apparaître la construction du patrimoine de création de la startup à travers le processus de constitution progressive de la structure d'indépendance préservée.

3. Présentation du cas d'étude : d'une solution d'*indoor farming* à destination des zones urbaines à la production de plantes à haute valeur ajoutée

3.1. De la création d'Agricool en 2015 à son redressement judiciaire en 2022 en pleine phase de scale-up

Fondée en 2015 par deux fils d'agriculteurs, Guillaume Fourdinier et Gonzague Gru, Agricool a tout de suite affiché l'ambition de commercialiser des fruits et légumes produits au plus près des consommateurs urbains, dans le but de garantir une grande qualité des produits (la production étant réalisée sans pesticides et sans conservateurs). Après avoir développé et mis en place un premier système de production de fraises en environnement contrôlé à Paris, Agricool a cherché à déployer sa solution technologique plus largement. Cela est passé par un développement de la gamme de fruits et légumes vendus ainsi que par une expansion géographique relative aux emplacements des systèmes de production et des lieux de distribution. La volonté d'augmentation de la production en vue d'atteindre la rentabilité a conduit la direction technique d'Agricool à se rapprocher du CGS en 2020 pour explorer de nouveaux systèmes de production en préservant le

modèle construit jusqu'alors. La difficulté à atteindre la rentabilité aura cependant empêché le déploiement de nouveaux systèmes de production, la startup ayant été mise en redressement judiciaire en janvier 2022.

Néanmoins, la création d'une autre startup, Orius, par trois anciens responsables d'Agricool (dont les directeurs techniques de l'ingénierie et de l'agronomie) a été un moyen de capitaliser sur les apprentissages réalisés au cours des sept années d'existence d'Agricool et de mettre en œuvre un modèle d'affaires à la fois très différent de ceux mis en place par Agricool mais toujours basé sur une technologie de culture en environnement contrôlé. Orius s'affiche désormais comme un fournisseur de « solutions clés-en-main pour une production durable et locale de matière première végétale »³⁸ ou encore de « solutions pour les projets de production d'ingrédients à haute valeur ajoutée les plus ambitieux, afin de piloter avec précision n'importe quelle voie métabolique »³⁹ en ayant développé un bioréacteur de type armoire.

La Figure 16 présente les événements principaux de l'histoire d'Agricool et fournit des illustrations des systèmes de production réalisés ou prévus (cas de l'illustration de l'année 2021 correspondant à une vue schématique).

Si la chronologie fait apparaître des éléments quantitatifs précis rendant visible le passage à l'échelle en cours de réalisation (comme l'augmentation continue de la production ou celle du nombre de collaborateurs, qui ont été jusqu'à 80 en 2019), l'étape de scale-up atteinte par Agricool peut être plus largement justifiée et explicitée, conformément aux indices du démarrage de cette phase déterminés au chapitre 2 dans le Tableau 7. Le niveau des investissements est relativement élevé puisqu'entre 2015 et 2021, Agricool a réalisé plusieurs levées de fonds pour un montant total de 36,8 millions d'euros. À cela s'ajoute un chiffre d'affaires, encore faible, s'élevant à 162 000 € en 2020⁴⁰ grâce à la vente des fruits et des légumes cultivés. Par ailleurs, dès les prototypes conçus, les récoltes ont pu être commercialisées en vente directe. La succession de MVP, qui apparaît déjà dans la chronologie de la Figure 16 à travers les illustrations des fermes, a été réalisée dans le but d'augmenter la capacité de ventes et le nombre de distributeurs. Le nombre de lieux de distribution a en effet augmenté. En outre, Agricool intègre dès l'année de sa création l'incubateur reconnu sur la place parisienne, The Family. Les autorisations d'installation des conteneurs en ville ainsi que l'intérêt des fonds d'investissement pour Agricool jouent le rôle de gages de qualité de la proposition de valeur. D'autre part, au-delà des seuls indices du démarrage d'une phase de scale-up pour une startup deeptech, on peut aussi noter le changement notable au sein de l'équipe dirigeante ayant eu lieu en octobre 2021. Le choix d'un nouveau directeur général au profil expérimenté et issu de l'entreprise multinationale Bonduelle souligne également la volonté de conduire une étape d'industrialisation.

³⁸ <https://www.orius.co/fr>

³⁹ <https://www.orius.co/fr/biomebox>

⁴⁰ Source des données : <https://www.lesechos.fr/start-up/impact/la-ferme-urbaine-agricool-placee-en-redressement-judiciaire-1395891>

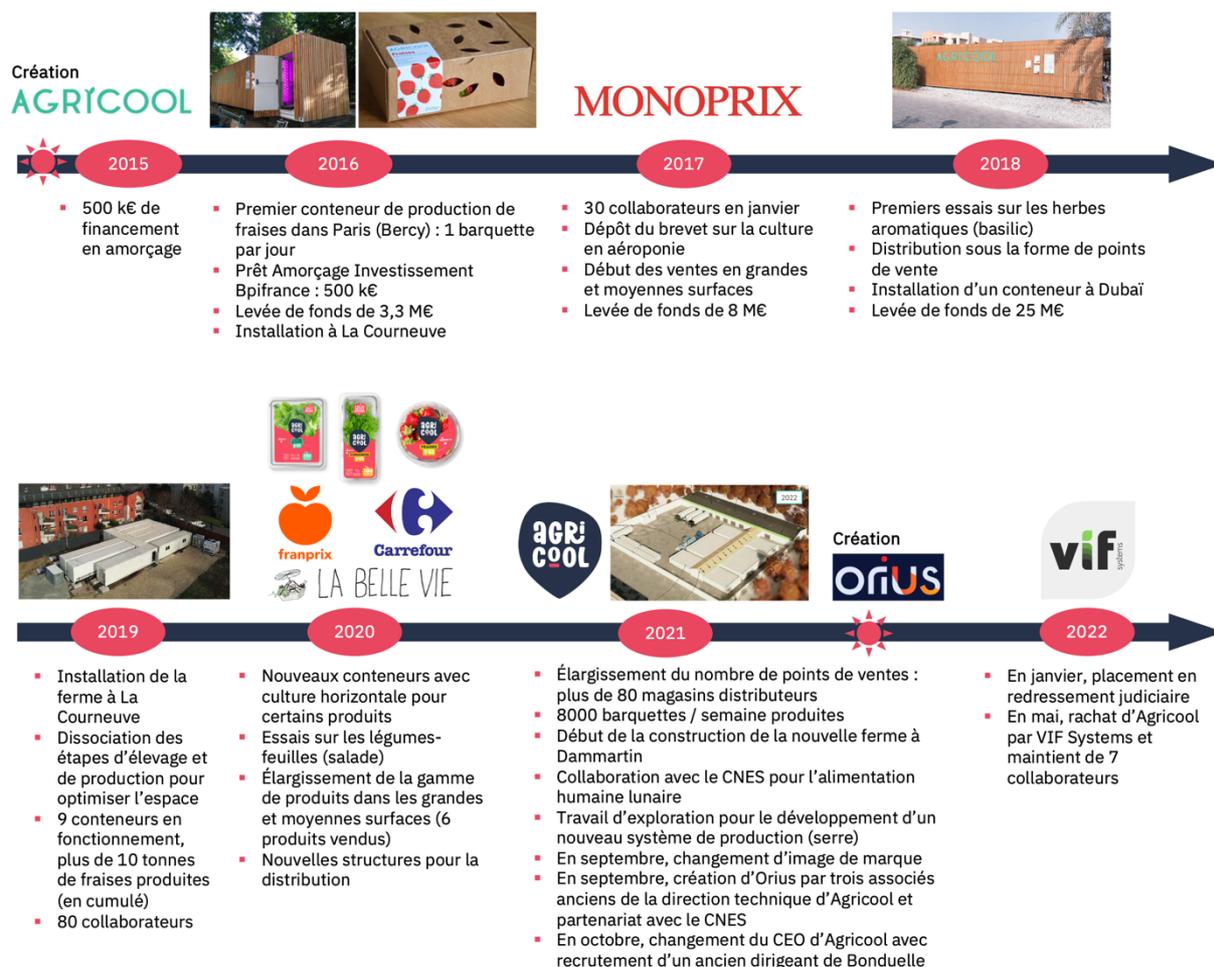


Figure 16. Chronologie de la startup Agricool de sa création en 2015 à son rachat faisant suite à son redressement judiciaire en 2022

3.2. Le caractère deeptech des solutions de production en environnement contrôlé portées par Agricool et Orius

À partir de la liste des caractéristiques présentées dans le Tableau 1 au chapitre 1, nous proposons une description d'Agricool et d'Orius qui confirme le caractère deeptech des deux startups. Compte-tenu des importants efforts de R&D à fournir sur le plan financier, Agricool a présenté une croissance limitée et une rentabilité tardive avec des besoins importants en capital : 7 années d'existence et plus de 35 millions d'euros levés n'auront pas été suffisants pour assurer la pérennité d'Agricool ; quant à Orius, la startup n'a pas atteint sa phase de croissance. En revanche, dans les deux cas, le marché visé est très rapidement international : Agricool installait dès 2018 un conteneur à Dubaï et le partenariat industriel déjà mis en place par Orius inclut la livraison de systèmes de culture aux États-Unis.

La diversité des produits cultivés ainsi que les contraintes techniques portant sur le système de culture en environnement contrôlé sont des exemples d'inconnus technologiques auxquels Agricool comme Orius sont confrontées, ce qui en fait des projets avec des niveaux de risques élevés. Les inconnus portent également sur les marchés potentiels à atteindre : l'intérêt du CNES pour les

cultures en environnement contrôlé est un bon exemple de marché potentiel pour lequel les efforts de développement sont significatifs et le temps de pénétration est intrinsèquement long.

Le partenariat mis en place par Agricool puis par Orius avec le CNES est une preuve des liens avec le monde de la recherche, tout comme l'intérêt de l'INRAE pour les connaissances très poussées acquises par Agricool sur le développement des plants en environnement contrôlé. Deux brevets ont également été déposés par Agricool :

- *Installation pour culture de plantes en atmosphère contrôlée*, demande déposée en août 2016 et brevet publié en mars 2018
- *Installation aéroponique, système et container de fret*, demande déposée en mai 2017 et brevet publié en novembre 2018

C'est plus particulièrement par sa dimension d'impact que le caractère deeptech d'Agricool se remarque. Par exemple, les fraises sont cultivées en aéroponie, c'est-à-dire selon une forme de culture hors-sol tandis qu'un système de brumisation apporte les nutriments et l'eau nécessaires à leur développement. Dans le but d'optimiser l'espace du conteneur et à travers lui l'emprise au sol de la culture, le choix a été fait de mettre en place un système de culture verticale : avec ce système dans un conteneur, le tonnage au mètre carré de surface au sol obtenu est plus de 100 fois meilleur que la production moyenne en France⁴¹. À cela il faut ajouter que le système de culture avec brumisation en circuit fermé permet de réduire de 90 % la consommation en eau. Par ailleurs, l'approvisionnement énergétique est réalisé par des sources d'énergies renouvelables et aucun produit phytosanitaire n'est utilisé. En outre, Agricool réhabilite des conteneurs usagés et grâce au contrôle de l'environnement laisse entrevoir la culture des fruits et légumes au plus près des consommateurs, même dans des zones où ils ne seraient pas disponibles sans importation. Dans le cas d'Orius, si l'on retrouve les mêmes atouts de la culture (consommations d'eau et énergétique, sans produit phytosanitaire et production locale), c'est leur capacité à optimiser les taux de composés actifs dans les plantes qui rendent la technologie particulièrement intéressante.

Alors qu'Orius a été immédiatement reconnue comme étant une startup deeptech par Bpifrance, il n'en a pas été de la sorte pour Agricool qui ne vérifiait pas suffisamment deux des principaux critères mis en place par la banque publique⁴². D'une part, le lien à la recherche n'est pas présent au sein de l'équipe dirigeante. D'autre part, le produit final, à savoir les fruits et les légumes, ne présente ni une valeur ajoutée particulièrement grande, ni de difficultés propres à la pénétration du marché. Cette précision permet de montrer l'influence du choix du modèle d'affaires sur la

⁴¹ D'après l'étude annuelle menée par l'agence de statistiques du ministère de l'Agriculture parue en juillet 2023, la production nationale de fraises en 2023 est estimée à 74 500 tonnes pour 3 980 hectares de surfaces cultivées (production plein air et sous serre) En comparaison avec les 7 tonnes de fraises produites annuellement dans un conteneur de 33 m² d'emprise au sol, on trouve que le rendement d'Agricool en t/m² est 113 fois plus grand que celui de la production nationale en 2023.

Sources des données : https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/IraLeg2391/2023_091inforapFraise.pdf et <https://magazine.laruchequiditoui.fr/agricool-fraises-poussent-containers/>

⁴² La méthodologie de référencement des startups deeptech ayant évolué depuis le lancement du plan Deeptech, nous retiendrons, d'après des données internes et le rapport préfigurant le plan Deeptech (Bpifrance, 2018), que Bpifrance cherche à valider les critères suivants pour considérer une startup comme deeptech : la solution présente de forts verrous technologiques à lever, il existe d'importantes barrières à l'entrée du marché pour un produit à haute valeur ajoutée qui rend la solution fortement capitalistique, la technologie est issue du monde de la recherche ou est développée par des chercheurs ou en collaboration étroite avec des laboratoires de recherche, la startup met en place une stratégie de propriété industrielle et elle présente un avantage différenciateur par rapport à la concurrence.

perception du caractère deeptech de la solution technologique. Les technologies développées par Agricool puis par Orius étant proches, et compte-tenu des éléments de caractérisation issus de la revue de la littérature, nous considérerons dans la suite que nous pouvons raisonnablement qualifier les deux startups de deeptech.

3.3. Une succession de modes de développement

Dans le but d'atteindre la rentabilité de l'entreprise, les efforts d'Agricool se sont concentrés sur l'augmentation du chiffre d'affaires et par conséquent sur les ventes. Deux stratégies se sont déployées simultanément : l'augmentation de la production et la diversification des variétés produites. Les différents modes de développement qui se sont succédé ont donc joué sur ces deux paramètres.

D'une part, la taille des systèmes de production a augmenté : à partir d'un conteneur unique et indépendant disposé en centre-ville (mode de développement 1), Agricool a développé une première ferme pilote à La Courneuve composée de 8 conteneurs associés les uns aux autres pour mutualiser la production (mode de développement 2), puis a commencé le développement d'une ferme dite modulaire composée d'une trentaine de conteneurs permettant une mutualisation plus importante (mode de développement 3). L'exploration d'un système de production inspiré des serres souligne la volonté d'une augmentation significative de la production, quand bien même cela remette en question le caractère entièrement contrôlé de l'environnement de production, tel que les systèmes de conteneurs le permettent (mode de développement 4). D'autre part, la gamme de produits s'est agrandie : après avoir réalisé un important travail de R&D pour obtenir des fraises (modes de développement 1), la R&D s'est concentrée sur les herbes aromatiques (basilic, ciboulette, persil, coriandre) puis sur les légumes-feuilles (salade), apparus dès le mode de développement 2 et plus particulièrement développés en vue du mode de développement 3.

À travers ces modes de développement, on observe bien le passage à l'échelle d'Agricool : après avoir réalisé les modes de développement 1 et 2 (vus comme les premiers MVP), la proposition de valeur passe à l'échelle dans les modes de développement 3 puis 4 à terme. En complément de la frise chronologique de la Figure 16, un bref historique des modes de développement de l'entreprise est proposé dans le Tableau 14 ci-après. Il pourrait être ajouté à ces 4 modes de développement celui d'Orius. Néanmoins, la startup étant encore jeune et en cours de développement de ses prototypes (lorsque les entretiens ont eu lieu), il ne paraît pas approprié d'évoquer pour le moment un passage à l'échelle, dont les paramètres en augmentation ne seraient pas comparables à ceux relatifs à Agricool compte-tenu du modèle d'affaires mis au point. Cela justifie que nous ne nous intéressions qu'aux modes de développement d'Agricool à ce stade.

Tableau 14. Description des modes de développement successifs mis en place au sein d'Agricool

<i>Mode de développement 1</i>	<i>Mode de développement 2</i>	<i>Mode de développement 3</i>	<i>Mode de développement 4</i>
Flagship à Paris (75), Courbevoie (92), Asnières-sur-Seine (92) et Dubaï	Ferme pilote à La Courneuve (93)	Ferme modulaire à Dammartin-en-Goële (77)	Exploration d'une « serre technologique Agricool »
<i>De 2015 à 2018</i>	<i>À partir de 2019</i>	<i>Prévu en 2022</i>	<i>À moyen terme</i>
			
1 conteneur indépendant pour une variété produite (fraises) 5 prototypes réalisés au total	Pilote de 8 conteneurs pour plusieurs variétés (herbes aromatiques, salades, fraises)	Module complet pour une partie des variétés (herbes aromatiques, salades)	Nouvelle forme de système de production avec diversification des variétés produites
1 système de production indépendant	7 conteneurs de production mutualisés avec 1 conteneur technique	Mutualisation de 32 conteneurs de production avec des conteneurs techniques	Nouvelle forme de mutualisation dans un environnement partiellement contrôlé
Vente directe au conteneur (pour les prototypes) puis vente avec distributeur (flagship)	Vente avec distributeur	Vente avec distributeur	Vente avec distributeur, en plus grandes quantités et diversification des produits
Proximité immédiate des lieux de production et de consommation (enjeu qualité)	Proximité assurée des lieux de production et de consommation (enjeu qualité)	Proximité relative des lieux de production et de consommation	Attention portée sur la distance entre les lieux de production et les lieux de consommation pour garantir la qualité

4. Exprimer le patrimoine de création pour décrire les efforts de gestion propres au passage à l'échelle

4.1. Différencier les validations du modèle d'affaires et les préservations de l'architecture de conception

La mise en évidence des éléments validés du modèle d'affaires a permis tout d'abord d'observer qu'une validation n'impliquait pas forcément une préservation de cet élément dans la durée. À l'inverse, certains éléments du modèle d'affaires peuvent être préservés sans pour autant avoir été validés par la succession de modes de développement. Ce constat souligne déjà une tension entre ce qui est validé et ce qui est préservé. Dans un premier temps, cette tension entre les validations et les préservations s'applique aux mêmes objets (à savoir les éléments du modèle d'affaires). Nous verrons dans un second temps que les préservations peuvent plus particulièrement porter sur des éléments relatifs aux choix d'architecture de conception.

Le Tableau 15 fournit une première illustration de cette tension entre validation et préservation sur les éléments du modèle d'affaires. Sans chercher à être exhaustive, cette liste d'exemples permet de saisir concrètement la tension entre validation et préservation, toutes les combinaisons étant réalisées. Les exemples fournis peuvent par ailleurs être rattachés à l'une des dimensions présentées dans le Tableau 9 des dimensions classiques du modèle d'affaires. Ces dimensions sont précisées entre crochets.

Cette première observation permet ainsi de souligner la capacité de l'entreprise à préserver des activités ou des ressources qui n'auraient pas été validées au cours des expérimentations successives. Cela vient déjà en contradiction des hypothèses élaborées dans le cadre de l'étude des modèles d'affaires. Alors que la startup Agricool se trouve bien en phase de scale-up, le modèle d'affaires continue à évoluer et ne prend, à première vue, pas toujours en compte le résultat des expérimentations. Il s'agit dès lors de chercher à expliquer ce phénomène, et plus particulièrement les fondements des préservations réalisées sans validation. Nous combinerons dans la suite du propos une étude des validations des éléments du modèle d'affaires avec une étude des préservations relatives aux choix de conception.

Tableau 15. Exemples illustratifs des validations et des préservations portant sur les éléments du modèle d'affaires

	<i>Validation</i>	<i>Absence de validation</i>
Préservation	<i>Modèle de ventes [Clients]</i> : B2B validé à partir de la ferme pilote puis préservé sur la durée	<i>Identité [Organisation de l'entreprise]</i> : production de la fraise maintenue dans la ferme pilote (sans validation de la rentabilité) simultanément au développement de la ferme modulaire sans fraise
	<i>Distance production / consommation [Organisation de l'entreprise]</i> : évolution de la définition de la localité au cours des modes de développement, c'est-à-dire qu'il y a une modification des critères de validation pour préserver l'enjeu	<i>Recherche [Réseaux / Parties prenantes]</i> : préservation des contrats de recherche pour la mise au point de protocoles de culture en environnement contrôlé dans un conteneur et arrêt simultané du conteneur dans le dernier mode de développement pour augmenter les quantités produites
Absence de préservation	<i>Produits [Clients & Conception technique]</i> : développement et validation des protocoles de culture de la fraise en environnement contrôlé, puis décision de ne pas la produire dans la ferme modulaire	<i>Marché [Clients]</i> : production à Dubaï testée, invalidée puis arrêtée
	<i>Qualité [Conception technique]</i> : environnement contrôlé pour garantir la qualité des productions validé mais non maintenu dans le dernier mode de développement	<i>Modèle de ventes [Clients]</i> : vente directe au conteneur disposé en plein centre-ville
	<i>Identité [Organisation de l'entreprise]</i> : conteneur considéré par les tiers comme un élément différenciant (validation) sans qu'il ne soit préservé dans l'exploration menée pour le dernier mode de développement	

4.2. Interroger la validation des éléments du modèle d'affaires comme preuve du démarrage de la phase de scale-up

La revue de la littérature ayant abouti à la mise en exergue des dimensions classiques du modèle d'affaires dans le Tableau 9 au chapitre 2, nous nous basons sur ces dimensions pour rendre

compte des validations et des invalidations portant sur les éléments du modèle d'affaires. Les différents éléments constitutifs du modèle d'affaires sont décrits pour chaque mode de développement (dont le détail est présenté dans le Tableau 14), tandis que les validations ou les invalidations ont lieu entre chaque mode. Seul le premier mode de développement fait apparaître une étape intermédiaire pour rendre compte des efforts considérables de définition du modèle d'affaires menés au démarrage de l'entreprise ; il est donc scindé en « Premiers prototypes » et « Flagship ». Les hypothèses sur le modèle d'affaires ayant été testées au sein des autres modes de développement sont simplifiées pour ne faire apparaître que les choix finaux. Les validations, représentées par des flèches vertes, correspondent au maintien de l'élément dans le mode suivant ; tandis que les invalidations, représentées en orange, indiquent que l'élément n'est pas reconduit dans le mode suivant. Les Tableau 16, Tableau 17, Tableau 18, Tableau 19, Tableau 20 et Tableau 21 les validations et invalidations successives réalisées pour chacun des modes de développement détaillées à partir des 6 dimensions du Tableau 9.

Tableau 16. Validations et invalidations portant sur les éléments relatifs à la dimension « Clients » du modèle d'affaires défini pour chaque mode de développement,

CLIENTS	Premiers prototypes	Flagship	Ferme pilote	Ferme modulaire	Serre technologique (en cours de validation)
<i>Modèle de ventes</i>	B2C : pré-commande en ligne pour les pourvoyeurs de love money	Vente directe au conteneur (B2C) qui ne passe pas à l'échelle	B2B pour les parisiens et habitants de la petite couronne		
<i>Appétence du marché</i>		Intérêt des habitants de grandes villes (Paris, Dubaï)			Intérêt des clients avec un pouvoir d'achat plus faible
<i>Taille du marché et coûts</i>		Coûts trop élevés pour une production extraeuropéenne	Taille du marché (Paris, petite couronne) insuffisante pour passer à l'échelle	Élargissement de la zone de chalandise à l'Île-de-France	
<i>Produits mis sur le marché</i>	Production de fraises		Élargissement de la gamme de produits	Sélection d'une partie de la gamme de produits	Sélection et diversification des produits

Nous proposons d'illustrer la lecture de ce premier tableau par l'exemple du modèle de ventes. Alors que les fraises produites par les premiers prototypes du conteneur étaient directement vendues sur le lieu de production, le choix d'un modèle en B2C a été remis en question dès lors que les conteneurs ne se sont plus trouvés en plein centre-ville. Outre la cible trop étroite des consommateurs atteints avec un modèle B2C, la vente sur place nécessitait aussi des collaborateurs, souvent en transit entre deux conteneurs puisqu'il s'agissait de répartir les conteneurs pour augmenter la taille du marché ciblé. Le format B2B choisi dès le deuxième mode de développement a consisté à passer par un distributeur, de type grandes et moyennes surfaces (GMS) disposant de son propre réseau de distribution. Ainsi, plus de consommateurs ont pu être touchés au sein d'une même ville, voire de sa proche banlieue. Le choix du distributeur, initialement Monoprix, a été renouvelé puis étendu à d'autres structures, Carrefour et Franprix, au cours du passage à l'échelle. Cette même lecture peut être réalisée sur les autres lignes du tableau, ainsi que sur les autres tableaux.

Tableau 17. Validations et invalidations portant sur les éléments relatifs à la dimension « Organisation de l'entreprise » du modèle d'affaires défini pour chaque mode de développement

ORGANISATION DE L'ENTREPRISE	Premiers prototypes	Flagship	Ferme pilote	Ferme modulaire	Serre technologique (en cours de validation)
<i>Distance production / consommation</i>	Dimension locale forte (<20 km) →	Capacité à disposer des conteneurs en centre-ville (au plus proche des consommateurs) →	Production en centre-ville insuffisante donc élargissement de la notion de localité à un rayon de 100 km		Préservation de la dimension locale dans le cas d'une production en serre
<i>Accessibilité</i>		Quantités trop faibles pour assurer l'accessibilité des produits →	Accessibilité toujours insuffisante (quantité) →		Recherche d'une production plus importante pour permettre l'accessibilité
<i>Identité</i>	Conteneur comme élément de différenciation →				Arrêt du conteneur pour un système plus classique (serre) →
<i>Marque</i>	Abandon du premier nom de l'entreprise "Localocal" →	Choix du nom Agricoool →		Image de marque modifiée pour mettre en avant la localité →	
<i>Fraise comme produit identitaire</i>	Production de fraises ambitieuse →	Identité de production de fraises en conteneur assumée →	Fraise comme produit ambassadeur →	Pas de production de fraises →	
<i>Coûts de production</i>		Coûts trop élevés de la gestion des conteneurs en centre-ville →	Mutualisation pour des coûts de production plus faibles →		
<i>Management</i>		Usage supplémentaire du conteneur pour la recherche →	Structuration de l'entreprise en 4 pôles, par rapport au conteneur →	Changement de CEO pour industrialiser et fort renouvellement de l'équipe dirigeante →	

Tableau 18. Validations et invalidations portant sur les éléments relatifs à la dimension « Chaîne de valeur » du modèle d'affaires défini pour chaque mode de développement

CHAÎNE DE VALEUR	Premiers prototypes	Flagship	Ferme pilote	Ferme modulaire	Serre technologique (en cours de validation)
<i>Distributeurs</i>		Vente en GMS (au lieu de la vente directe au consommateur) →		Nouveaux distributeurs en sus des précédents →	
<i>Fournisseurs</i>	<i>Intégration trop limitée dans la chaîne de valeur à ce stade du développement</i>	Dispositions pour la vente en GMS : concession →	Passage par la centrale d'achat pour la vente en GMS →	Précédents fournisseurs reconduits →	Inconnus sur les fournisseurs du système de production →
<i>Emballages</i>		Plastique à base de maïs (PLA, non recyclé en France) →	Plastique recyclable en France (rPET) →		

Tableau 19. Validations et invalidations portant sur les éléments relatifs à la dimension « Réseaux / Parties prenantes » du modèle d'affaires défini pour chaque mode de développement

RÉSEAUX / PARTIES PRENANTES	Premiers prototypes	Flagship	Ferme pilote	Ferme modulaire	Serre technologique (en cours de validation)
<i>Acteurs publics</i>		Intérêt des acteurs publics (mairies, collectivités) →	Accord avec la mairie (La Courneuve) sur l'emploi local et le terrain en contrepartie →	⊘ Absence d'accord avec la mairie (Dammartin)	
<i>Recherche</i>	<i>Trop peu de partenariats à ce stade du développement</i>	Intérêt du monde de la recherche (INRA, CNES) vis-à-vis du conteneur →			
<i>Parties prenantes diverses</i>		Relations avec les producteurs de plants →	Développement d'un réseau de GMS →	Écosystème pour l'industrialisation →	Nouveaux investisseurs en cas de nouvelles levées de fonds
		Minimisation du nombre de parties prenantes en aval ⊘			

Tableau 20. Validations et invalidations portant sur les éléments relatifs à la dimension « Conception technique » du modèle d'affaires défini pour chaque mode de développement

CONCEPTION TECHNIQUE	Premiers prototypes	Flagship	Ferme pilote	Ferme modulaire	Serre technologique (en cours de validation)
<i>Fraise</i>	Parties du protocole de culture de la fraise validées →	Nouvelles validations du protocole de culture de la fraise (dont une nouvelle variété) →	Protocole de culture de la fraise et autres protocoles validés →	⊘ Abandon de la fraise à cause du peu de rentabilité et de la difficulté à assurer les livraisons	→
<i>Technique de culture</i>	Hydroponie pour les fraises non concluante ⊘	Validation de l'aéroponie pour les fraises ⊘	Invalidation de l'aéroponie et validation de l'hydroponie pour les herbes aromatiques et les salades →	→	
<i>Diversité des produits</i>		Mise en place de nouveaux protocoles de culture pour diversifier les produits →		⊘ Limite du conteneur pour la diversité des produits	⊘
<i>Installations</i>		Conditions de travail pour le tri manuel des feuilles (basilic) dans le conteneur ⊘	Aménagements divers dans le conteneur →	→	Capacité à adapter les installations à une production plus importante et automatisation de plusieurs actions (dont la mise en barquettes)
<i>Qualité</i>	Environnement contrôlé pour une qualité optimale des produits →				⊘ Qualité a priori plus aléatoire des produits (environnement moins contrôlé)
<i>Performances du conteneur</i>	Bases du système de production (conteneur) validées →	Résistance du système de production à des températures extérieures élevées avec une consommation énergétique limitée →	Consommation énergétique divisée par 10 et rendements multipliés par 15 depuis les premiers prototypes →	→	⊘ Nouvelles performances (à déterminer) d'un système de type serre
<i>Propriété industrielle</i>		Dépôt et publications de brevets →			

Tableau 21. Validations et invalidations portant sur les éléments relatifs à la dimension « Règlementation » du modèle d'affaires défini pour chaque mode de développement

RÈGLEMENTATION	Premiers prototypes	Flagship	Ferme pilote	Ferme modulaire	Serre technologique (en cours de validation)
Vente des produits	Non-conformité avec le label "bio" (car condition de la pousse des plants en pleine terre) 	Autorisations pour la vente de produits agricoles (règles de dénomination, règles de commercialisation, règles sanitaires) 	Contractualisation avec les GMS (règlementation spécifique) 		
Localisation géographique		Autorisations pour l'emplacement du conteneur en zone urbaine (et à l'étranger) 			 Règlementation spécifique aux serres (avec dépendance des autorisations selon les surfaces)

L'ensemble des six derniers tableaux met en lumière l'existence de validations et d'invalidations sur toutes les dimensions du modèle d'affaires. Le point d'étonnement réside dans l'existence de plusieurs successions de validations et d'invalidations sur un même élément du modèle d'affaires. Si cette observation n'est pas particulièrement étonnante lorsqu'il s'agit des prototypes, du flagship et de la ferme pilote, vus comme des premiers MVP servant à confirmer et à infirmer des hypothèses-clefs du modèle d'affaires, la remise en question d'éléments du modèle d'affaires sur les modes de développement suivants, pourtant caractéristiques du passage à l'échelle, amène à penser qu'Agricool continue de concevoir des MVP voire s'apprête à réaliser un pivot. Cela est d'autant plus étonnant que ces mêmes éléments avaient auparavant fait l'objet de validations. Le cas de la production de fraises est emblématique : les protocoles de culture et les éléments d'architecture de culture en lien avec le système technique ont été précisément définis et validés, tout comme l'intérêt des clients pour le produit, sans pour autant que cela suffise à maintenir la fraise dans la gamme de produits de la ferme modulaire. Alors que les modes de développement les plus avancés sont associés à une communication et à une volonté d'industrialisation indiquant clairement le démarrage de la phase de scale-up, la détermination des validations et des invalidations successives et nombreuses ne va pas dans le sens du démarrage d'une phase de scale-up, selon la définition issue de la littérature en entrepreneuriat. On s'attendrait en effet à ce qu'Agricool cherche à préserver au maximum les éléments validés ou à valider tout ce qu'elle cherche à préserver.

Toutes les dimensions du modèle d'affaires semblant être remises en question, cette première approche rend difficilement compte des préservations, qui portent, au mieux, sur des éléments particuliers du modèle d'affaires. Cela va plus loin car on n'est alors pas en mesure de conclure quant à une validation du modèle d'affaires alors que l'on fait le constat d'un passage à l'échelle de la proposition de valeur. Cette lecture pourrait aller jusqu'à remettre en question l'état de début de scale-up pourtant précédemment démontré dans la section 3.1. Si le *product-market fit* obtenu par la validation des éléments du modèle d'affaires suffisait à entrer en phase de scale-up comme avancé par la littérature (Eisenmann et al., 2013), on peut ainsi questionner la preuve de la capacité à passer à l'échelle qu'il apporte, ce qui rejoint la suggestion de Sanasi (2023) à propos de la poursuite des expérimentations pendant la phase de scale-up. Il s'agit alors de déterminer d'autres preuves du passage à l'échelle.

4.3. **Rendre visible le patrimoine de création à partir des outils de la conception pour mettre en évidence la préservation d'une structure d'indépendance**

Dans le but de compléter l'approche par les modèles d'affaires et de mieux saisir les enjeux de conception, nous analysons les trois premiers modes de développement en les traduisant par des matrices de Suh. Chaque mode de développement est ainsi exprimé dans le langage des besoins fonctionnels (FR) et des paramètres de conception (DP), comme expliqué dans la section 2.3.2. Pour réaliser ces matrices, il a fallu décrire avec précision les fonctions réalisées par chacun des modes de développement (représentées en colonnes) ainsi que les paramètres de conception (en lignes). Ces différentes informations ont été acquises au cours de la récolte des données, selon la méthodologie explicitée dans la partie 2 de ce chapitre.

Il faut aussi préciser que le travail a également consisté en l'ordonnement des lignes et des colonnes de la matrice afin de rendre compte de sa structure. C'est la recherche d'une structure commune aux différentes matrices qui a joué sur les choix d'ordonnement (largement facilités par la proximité des FR et des DP caractérisant les différents modes de développement). L'ordonnement des lignes et des colonnes est permis par la théorie mathématique (algèbre linéaire) sur laquelle s'appuie la conception axiomatique. Une FR peut être vue comme la combinaison linéaire de plusieurs DP. En écrivant le vecteur des FR en fonction du vecteur des DP, on obtient une matrice (que l'on considèrera carrée pour simplifier, c'est-à-dire que l'on considère, théoriquement, le même nombre de FR que de DP). En changeant l'ordre des colonnes et/ou des lignes de cette matrice, on ne modifie pas les combinaisons linéaires si l'on effectue ces mêmes opérations sur les vecteurs de FR et de DP associés. Si chaque FR s'écrit en fonction d'un unique DP, la matrice obtenue est diagonale (en ordonnant correctement les vecteurs). On retrouve ici l'axiome d'indépendance : la conception est non-couplée. Dans le cas où l'on obtient une matrice triangulaire, la conception est découplée : la modification des DP dans le bon ordre permet toujours de réaliser les FR de manière indépendante, de nouveau on respecte l'axiome d'indépendance. Ce sont ces structures-là de matrices que nous cherchons à obtenir. Dans la pratique, les matrices obtenues ne sont généralement pas carrées (c'est-à-dire qu'il n'y a pas toujours autant de FR que de DP), et on cherche plutôt à retrouver des structures similaires, comme des matrices diagonales par blocs ou des matrices triangulaires, mettant en évidence des indépendances non plus entre chacune des fonctionnalités mais entre des groupes de fonctions réalisés par plusieurs paramètres de conception spécifiques. Les Figure 17, Figure 18, Figure 19 et Figure 20 rendent compte de ce travail sur les 3 premiers modes de développement d'Agricool (le mode de développement 1 étant représenté par deux matrices : une matrice pour les premiers prototypes et une autre pour le flagship).

L'élaboration des matrices de Suh permet tout d'abord de faire apparaître une structure de matrice diagonale par blocs, les blocs étant indiqués sur les Figure 17, Figure 18, Figure 19 et Figure 20 par des encadrés colorés dénommés respectivement « Commercialisation », « Culture », « Ingénierie du système » et « Productivité ». Ce dernier bloc apparaît dès le flagship au niveau du premier mode de développement, et compte-tenu de la prédominance du rôle du paramètre de conception « Zone de mise en barquettes » pour réaliser la fonction « Mutualiser les opérations » vis-à-vis du conteneur et du cultivateur (qui remplissent par essence cette fonction), nous pouvons

bien le considérer comme une nouvelle activité indépendante des premières définies au moment des premiers prototypages.

Il peut être déduit de l'ensemble de ces matrices le respect de l'axiome d'indépendance, étant signe d'une bonne conception au sens où les choix effectués permettent d'assurer la robustesse de la solution technique. Il est important de noter que ce premier résultat n'était pas aisément prévisible, les structures de matrices diagonales pouvant être difficiles à concevoir. Il faut également noter que cette structure de matrice diagonale par blocs se préserve tout au long des développements : l'indépendance entre les activités est donc volontairement recherchée, mettant ainsi en évidence la performance des choix de conception réalisés. Dans le cadre de la conception des futurs modes de développement, et plus particulièrement de la serre technologique, l'approche par les matrices de Suh intègre une nouvelle contrainte à la conception pour maintenir le niveau de performance déjà atteint : celle de la conservation des indépendances entre les activités pour préserver le modèle global de développement propre à Agricoool.

À partir de ces matrices de Suh, nous en déduisons la structure globale des indépendances préservées durant la phase de scale-up. Plusieurs stratégies d'indépendance ont vocation à être maintenues tout au long du travail de conception des modes de développement futurs :

- 1) l'indépendance entre les activités de culture (agronomie) et les activités de développement de l'outil productif, c'est-à-dire du conteneur (ingénierie du système) ;
- 2) l'indépendance de la stratégie de développement commercial ;
- 3) l'indépendance des activités liées à l'amélioration de la productivité, qui ajoutent de nouvelles fonctionnalités en minimisant les effets sur les développements passés.

Dans la mesure où ces structures d'indépendance préservées sont garantes de l'atteinte des performances distinctives de la startup vis-à-vis de ses concurrents et se retrouvent dans la construction successive des modes de développement, on peut les considérer comme étant génératives. La préservation de structures d'indépendance génératives fait apparaître la trace d'un patrimoine de création au sens d'Hatchuel et al. (2019). Exprimé de la sorte, on voit alors dans ce patrimoine de création la construction progressive du maintien des indépendances dans le rapport entre les fonctionnalités du produit et les attentes du marché.

Par ailleurs, la formulation de ces structures d'indépendance permet de justifier les choix a priori étonnants que sont les préservations sans validation. En rendant l'ingénierie du système indépendante des activités de culture, les décisions relatives aux espèces cultivées n'influencent pas sur la conception technique du système. La validation ne porte dès lors plus sur les éléments précis du modèle d'affaires (espèce cultivée pour la vente en B2B) mais sur la capacité à maintenir cette indépendance, qui est à préserver. La définition du patrimoine de création à partir de ces structures d'indépendance permet donc d'effectuer un déplacement de ce qui fait l'objet de validation ou de préservation. Le recours aux matrices de Suh permet donc de saisir le rapport entre le développement technologique et la définition du marché au niveau des structures d'indépendance préservées au caractère génératif.

Premiers prototypes <i>Mode de développement 1</i>	Vendre en direct	Faire la récolte des fraises	Effectuer la maintenance	Créer un environnement contrôlé	Contrôler le système à distance	Automatiser la collecte de données	Réduire la consommation électrique
	COMMERCIALISATION						
Barquettes	X						
Support-étage de vente	X						
Cultivateur	X	X	X				
Colonne hydroponique (avant)		X	X				
Colonne de culture pour l'aéroponie (après)		X	X				X
Conteneur		X	X		X	X	X
LED					X	X	X
HVAC (chauffage, ventilation, climatisation)					X	X	
Capteurs					X	X	X

Figure 17. Représentation du mode de développement 1 (premiers prototypes) sous la forme d'une matrice de Suh

Flagship <i>Mode de développement 1</i>	Approvisionner les points de vente	Approvisionner les GMS	Faire la récolte des fraises	Effectuer la maintenance	Créer un environnement contrôlé	Contrôler le système à distance	Automatiser la collecte de données	Réduire la consommation électrique	Réduire la consommation d'eau	Mutualiser les opérations
	COMMERCIALISATION									
Barquettes	X	X								
Support-étage de vente	X	X								
Cultivateur	X	X	X	X						X
Colonne de culture (aéroponie)			X					X	X	
Conteneur			X	X		X	X	X	X	X
LED sur mesure						X	X	X		
HVAC (chauffage, ventilation, climatisation)						X	X	X		
Capteurs						X	X	X	X	
Zone de mise en barquettes										X

Figure 18. Représentation du mode de développement 1 (flagship) sous la forme d'une matrice de Suh

Chapitre 4 – Décrire la phase de scale-up à partir du patrimoine de création

Ferme pilote (La Courneuve) <i>Mode de développement 2</i>	Approvisionner les GMS	Faire la récolte	Effectuer la maintenance	Créer un environnement contrôlé	Contrôler le système à distance	Automatiser la collecte de données	Réduire la consommation électrique	Réduire la consommation d'eau	Mutualiser les opérations	Mutualiser les éléments techniques	Augmenter les espaces de culture	Produire de nouvelles variétés
Barquettes												
Support-étage de vente	X											
Cultivateur		X	X						X			
Colonne de culture (hydroponie et aéroponie)		X					X	X				
Conteneur		X	X				X	X				
LED sur mesure							X					
HVAC (chauffage, ventilation, climatisation)							X					
Capteurs					X	X	X	X				
Zone de mise en barquettes									X		X	
Unité technique										X	X	
Unité de production verticale										X	X	X
Unité de production horizontale										X	X	X
Étagère, bac, plateau de culture												X
Machine d'ensemencement												X
Machine de découpe		X										X

Figure 19. Représentation du mode de développement 2 (ferme pilote) sous la forme d'une matrice de Suh

Ferme modulaire (Dammartin) <i>Mode de développement 3</i>	Approvisionner les GMS	Faire la récolte	Effectuer la maintenance	Créer un environnement contrôlé	Contrôler le système à distance	Automatiser la collecte de données	Réduire la consommation électrique	Réduire la consommation d'eau	Mutualiser les opérations	Mutualiser les éléments techniques	Augmenter les espaces de culture	Assurer des quantités suffisantes
Barquettes												
Support-étage de vente	X											
Cultivateur		X	X						X			
Colonne de culture (hydroponie)		X						X				
Conteneur		X	X				X	X				
LED sur mesure							X					
HVAC (chauffage, ventilation, climatisation)							X					
Capteurs					X	X	X	X				
Zone de mise en barquettes									X		X	X
Unité technique										X	X	X
Unité de production verticale										X	X	X
Unité de production horizontale										X	X	X
Étagère, bac, plateau de culture												X
Machine d'ensemencement												X
Machine de découpe		X										X
Variétés produites												X

Figure 20. Représentation du mode de développement 3 (ferme modulaire) sous la forme d'une matrice de Suh

5. L'intérêt du patrimoine de création pour la phase de scale-up

5.1. Le premier produit comme un moyen de valider un espace de conception génératif

A priori, les premiers prototypes et le flagship peuvent sembler inadaptés à une étude de la phase de scale-up. S'ils ont été utiles à la détermination de la structure d'indépendance préservée, le mode de développement 1 donne déjà une ébauche des capacités de conception initiales dont Agricool s'est armée pour réussir son passage à l'échelle. Nous avons de nouveau recours aux matrices de Suh pour décrire ces capacités de conception à partir d'une caractérisation des produits de la startup (dans ce cas de la fraise puis des herbes aromatiques et des salades). Nous montrons alors que le choix du premier produit (la fraise) est loin d'être anodin pour les développements ultérieurs.

À travers la matrice de Suh de la Figure 21, on observe plus particulièrement au niveau du protocole de culture que la fraise nécessite un grand nombre de paramètres de conception pour réaliser plus de fonctions que les herbes aromatiques et la salade. La culture des fraises permet donc d'acquérir un savoir-faire que l'on peut réutiliser pour la culture des herbes aromatiques et des salades ; autrement dit, l'espace de conception relatif à la fraise inclut (quasiment) ceux propres aux herbes aromatiques et à la salade. On considère alors que la fraise est une représentante d'un modèle sur le protocole de culture. Dans une certaine mesure, cette caractéristique est partiellement retrouvée au niveau de l'architecture de culture.

	FRAISES SALADES HERBES AROMATIQUES	Produire des feuilles	Produire un fruit	Réaliser la production sur une longue durée	Faire une récolte précise	Mettre en barquettes
		x	x			
		x x				
			x			
		x x x	x	x		
		x x x	x	x		
		x x x	x	x		
		x x x	x	x	x	x x x
		x x	x	x	x	
		x				
		x x x			x x	x x x
					x	
		x x				
		x x				

FR propres à la fraise

DP associés au protocole de culture

DP associés à l'architecture de culture

Figure 21. Caractérisation des produits à partir d'une matrice de Suh et mise en évidence de la généricité de la culture des fraises

Ainsi, le premier produit, en l'occurrence la fraise, peut être amené à jouer un rôle particulier dans la conception des produits suivants. En déterminant un large espace de conception, ce premier produit permet de réaliser des apprentissages structurants qui seront réutilisés par la suite. Cela accélère alors les processus de développement, comme cela a pu être entendu au cours

des échanges ayant eu lieu avec Agricool (alors que le fruit a nécessité 3 ans de développement, il n'a suffi que de 1 à 6 mois pour les espèces d'herbes aromatiques). On peut alors considérer ce premier produit comme étant une réserve de généricité, c'est-à-dire un moyen de concevoir plusieurs applications à partir de la même technique, au sens de Le Masson et al. (2016).

Le premier produit joue donc un rôle de validation de l'espace de conception atteignable, que l'entreprise doit s'efforcer de préserver dans les conceptions futures : la capacité de l'entreprise à réaliser ce premier produit fait alors partie du patrimoine de création de la startup. Pour l'entreprise, le choix de préserver la commercialisation de la fraise dans la ferme pilote de La Courneuve (simultanément au développement de la ferme modulaire à Dammartin dans laquelle les fraises ne sont plus produites) est alors d'autant plus justifié. Si l'on se rapporte aux cas présentés dans le Tableau 15, la réserve de généricité définie comme la capacité à concevoir de nouvelles applications représente une préservation avec validation : en préservant ce large espace de conception, la startup va progressivement valider de nouveaux éléments constitutifs de son modèle d'affaires.

5.2. Les traces du patrimoine de création d'Agricool au sein de la startup Orius

Le directeur technique de l'ingénierie d'Agricool faisant partie des co-fondateurs d'Orius et ayant été le point de contact principal entre Agricool et le CGS, a permis de prolonger l'étude en détaillant les premiers choix stratégiques de développement pris au sein de la nouvelle startup deeptech. Contrairement à la volonté d'Agricool de toucher les consommateurs finaux, le modèle de développement d'Orius consiste à se positionner comme un fournisseur d'équipements à destination de structures aux applications diverses. Le produit principal est un bioréacteur de type armoire destiné dès le début à deux usages distincts : un projet de recherche mené avec le CNES dans le but de produire des aliments avec des nutriments particuliers et la production d'ingrédients végétaux performants à destination de la cosmétique dans le cadre d'une collaboration avec Capsum, un sous-traitant de l'industrie cosmétique spécialisé dans la microfluidique. Le même bioréacteur étant utilisé pour ces deux applications, on retrouve l'intérêt de rendre indépendantes les activités de culture de celles du développement du bioréacteur. Cela va jusqu'à proposer la culture simultanée de plusieurs variétés dans le même bioréacteur ainsi que des systèmes de culture interchangeables (le bioréacteur étant fourni avec un système de culture pouvant être changé).

Par ailleurs, le choix du rapprochement avec l'entreprise Capsum au portefeuille de clients bien consolidé permet à Orius de ne pas avoir la charge de la commercialisation des ingrédients végétaux à haute valeur ajoutée produits. C'est à Capsum que reviennent ces activités de commercialisation. On retrouve, comme dans le cas d'Agricool, l'indépendance de la stratégie de développement commercial vis-à-vis des autres activités de développement menées par Orius.

Les contraintes de fabrication imposées par Capsum pour l'industrie de la cosmétique sont également l'occasion de valider un large espace de conception : les bioréacteurs sont donc produits selon le standard des « Bonnes Pratiques de Fabrication » (BPF ou GMP pour *Good Manufacturing Practices*). À ces contraintes s'ajoute aussi la volonté des dirigeants d'Orius de limiter les manipulations humaines au cours du protocole de culture : cela passe par une automatisation des

tâches, qui est déjà un apprentissage structurant pour un développement ultérieur dans l'industrie pharmaceutique.

Ces différents exemples de maintien des structures d'indépendance et de recherche d'une solution générique dès les premiers développements peuvent être vus comme des traces d'un patrimoine de création qui se serait transmis entre Agricool et Orius par l'intermédiaire des dirigeants d'Orius ayant contribué au développement d'Agricool. Cette capitalisation sur l'architecture de conception précédemment définie amène à reconsidérer la notion de pivot, définie dans le chapitre 2. Le changement de modèle d'affaires proposé par Orius à partir d'une technologie proche de celle conçue par Agricool pourrait, dans une lecture rapide, s'apparenter à un pivot. Néanmoins, s'il y a bien des modifications intrinsèques du modèle d'affaires initial faisant suite à son invalidation (le redressement judiciaire d'Agricool servant de preuve de l'invalidation du modèle d'affaires), il faut aussi noter la préservation d'une partie de l'architecture de conception mise en place par Agricool dans les choix de conception faits par Orius. En repartant de la définition du pivot proposée par Eisenmann et al. (2013), à savoir « *a revised model that changes some model elements while retaining others* » (p.1), l'approche par la conception permet alors de considérer le patrimoine de création comme un des éléments à retenir (la partie fixe). La notion de patrimoine de création enrichit ainsi la définition du pivot en explicitant ce qui a intérêt à être préservé pour garantir la générativité future du nouveau modèle déterminé. Il est d'ailleurs possible d'aller plus loin en s'intéressant à la conception même du patrimoine de création : construit à partir d'un processus de stabilisation progressive entre les modes de développement, les éléments à retenir comme patrimoine de création ne se formalisent qu'après plusieurs étapes dans le développement de l'entreprise.

5.3. Les descripteurs du scale-up à la lumière du patrimoine de création

Par l'intermédiaire de la notion de préservation, nous proposons une nouvelle description de la phase de scale-up : en effet, il s'agirait de déterminer les stabilisations progressives se mettant en place plutôt que de reproduire les éléments validés du modèle d'affaires. Les éléments stabilisés peuvent alors être considérés comme ne faisant plus l'objet d'explorations (c'est-à-dire qu'ils ne sont pas systématiquement remis en question) tout en étant les garants de la générativité de la proposition de valeur.

L'originalité apportée par le cas d'Agricool relève de la mise en évidence de la nature des éléments stabilisés. Si nécessairement certaines validations d'éléments du modèle d'affaires font aussi l'objet de préservations, c'est-à-dire de maintien de ces mêmes éléments dans la durée, l'étude des modes de développement successifs d'Agricool a mis en évidence que les stabilisations s'effectuaient au niveau de l'architecture de conception déterminée progressivement par la startup.

En ayant recours aux matrices de Suh, nous avons montré que le langage de la conception est particulièrement utile pour révéler les préservations qui prennent la forme de relations d'indépendance (et réciproquement de couplage) entre les activités. Les préservations ne portent donc pas directement sur les ressources mais plus exactement sur les moyens d'acquisition de ces ressources. Ces mêmes outils issus de la conception axiomatique sont également pertinents pour déterminer les apprentissages structurants réalisés lors du développement du premier produit.

Cette étude permet de proposer une autre approche pour caractériser le développement de la startup en phase de scale-up : en se focalisant sur la constitution de son patrimoine de création, la startup est en mesure de générer une gamme de produits à moindre effort. On peut ici faire un rapprochement avec la notion de reproduction, qui ne porte plus exclusivement sur les éléments du modèle d'affaires, mais qui s'applique à présent au maintien de la structure d'indépendance stabilisée au fil du temps par la startup elle-même ; c'est donc cette structure qu'il faudrait reproduire. Vue comme une nouvelle preuve du passage à l'échelle, la capacité de l'entreprise à générer une gamme de produits enrichit la méthodologie du *Lean Startup*.

L'architecture de conception ainsi préservée garantit la capacité à générer une famille de produits, grâce à la généricité de la technologie (Le Masson et al., 2016). Le patrimoine de création contribue dès lors à favoriser la capacité de l'entreprise à proposer des technologies génériques (Kokshagina, 2014) voire à faire émerger une stratégie de développement de plateforme, interne ou externe au sens développé par Gawer et Cusumano (2014). Au-delà d'être le lieu de la gestion de la tension puisqu'il intègre les règles de l'architecture de conception en constante régénération, le patrimoine de création trace les frontières de l'espace de conception atteignable : en le construisant, la startup peut définir ses modes de développement futurs concevables. Le deuxième cas d'étude présenté dans le chapitre suivant illustrera la conception du patrimoine de création durant cette phase de scale-up.

Synthèse du chapitre 4

Cette première recherche-intervention avait pour objectif de contribuer à enrichir les descripteurs de la phase de scale-up des startups deeptech. Le cas d'Agricool, à partir de l'étude des MVP successifs, a permis de mettre en évidence un mécanisme de gestion qui a lieu au moment du passage à l'échelle et qui consiste en une stabilisation progressive de l'architecture de conception. En passant du langage du modèle d'affaires à un langage de la conception, on est alors capable de saisir les règles de conception stabilisées au cours de la phase de scale-up. Dans la mesure où l'entreprise vit une étape de forte croissance, les règles qui définissent l'architecture de conception se doivent de garantir un caractère génératif à la solution conçue. Le caractère à la fois préservant et génératif des règles de conception révèle ce qui peut être considéré comme étant un patrimoine de création. La phase de scale-up des startups deeptech devient alors le lieu de la mise en lumière du patrimoine de création. Il s'agit dès lors de comprendre comment ce patrimoine de création se construit.

**Chapitre 5 – Gérer la constitution d'un patrimoine
de création en phase de scale-up : le cas de la startup
Poietis**

Chapitre 5 – Gérer la constitution d'un patrimoine de création en phase de scale-up : le cas de la startup Poietis

1. Étudier la constitution du patrimoine de création à partir de l'émergence des plateformes . 166

- 1.1. Les plateformes : un objet de recherche aux caractéristiques proches de celles d'un patrimoine de création..... 166
 - 1.1.1. *Le modèle d'affaires de plateforme, originaire du monde de l'automobile et devenu une forme d'organisation dominante à l'ère du numérique.....* 166
 - 1.1.2. *Préservation et générativité : deux caractéristiques des plateformes dans la conception de lignées de produits* 168
- 1.2. Enjeux de conception autour de l'évolution des plateformes..... 169
 - 1.2.1. *Concevoir et passer à l'échelle un modèle d'affaires de plateforme.....* 169
 - 1.2.2. *La conception de technologies génériques vues comme un type particulier de plateforme.....* 170
 - 1.2.3. *L'expansion fonctionnelle dans la construction des plateformes* 172
 - 1.2.4. *L'apport des travaux sur le renversement des plateformes à la compréhension des mécanismes de développement des plateformes* 172

2. La construction d'une plateforme à partir d'une recherche-intervention dans une startup deeptech de la santé : éléments de méthode..... 173

- 2.1. Mise en place d'une recherche-intervention 173
- 2.2. Récolte des données : une immersion dans l'entreprise..... 175
- 2.3. Choix méthodologiques pour l'analyse des données 179
 - 2.3.1. *Le recours à la conception axiomatique pour modéliser les plateformes* 179
 - 2.3.2. *Une formalisation du raisonnement de conception à partir de la théorie C-K pour caractériser les choix de conception* 180

3. Le cas de Poietis : une nouvelle technologie de bioimpression pour la médecine régénérative 180

- 3.1. La genèse de la startup Poietis et son positionnement dans l'écosystème de la bioimpression..... 181
 - 3.1.1. *La bioimpression assistée par laser de tissus biologiques* 181
 - 3.1.2. *Considérations techniques pour une compréhension plus fine des défis à relever*
..... 183
 - 3.1.3. *Stratégie de propriété industrielle et analyse du paysage concurrentiel* 185
- 3.2. La construction progressive d'un modèle d'affaires pérenne jusqu'à une phase de scale-up avérée 186

3.2.1.	<i>Des modèles d'affaires réussis à la commercialisation de deux bioimprimantes..</i>	186
3.2.2.	<i>Le démarrage d'une phase de scale-up avec la conception et la commercialisation de deux produits simultanément.....</i>	191
3.2.3.	<i>Le positionnement stratégique du couple formé par les deux bioimprimantes...</i>	192
3.3.	Poietis, l'archétype de la startup deeptech	194
4.	Une stratégie élaborée de conception d'une plateforme par Poietis.....	196
4.1.	Caractérisation de la solution de bioimpression conçue par Poietis sous la forme d'une plateforme	196
4.2.	Preuves de l'existence d'un cœur technique générique et de l'expansion fonctionnelle.....	199
4.2.1.	<i>La triple généricité de la technologie de bioimpression par laser.....</i>	199
4.2.2.	<i>De l'amélioration des performances d'une instanciation de la plateforme à l'expansion fonctionnelle de la plateforme</i>	200
4.3.	La conception progressive d'une plateforme pour préserver la continuité d'usage des bioimprimantes NGB-C et NGB-R	201
4.3.1.	<i>La recombinaison du cœur technique comme signe de la conception progressive de la plateforme.....</i>	202
4.3.2.	<i>Implication de l'expansion fonctionnelle sur la connaissance du cœur technique et la continuité d'usage entre les deux bioimprimantes.....</i>	202
4.3.1.	<i>Une modélisation des voies de conception pour gérer l'expansion fonctionnelle à partir de la théorie C-K.....</i>	211
4.3.2.	<i>L'instruction organisée des débats : une preuve de l'action managériale sur la conception de la plateforme.....</i>	214
5.	Discussion : enjeux organisationnels et managériaux pour la constitution d'un patrimoine de création en phase de scale-up	215
5.1.	La conception progressive d'une plateforme considérée à partir de la gestion de la continuité d'usage des bioimprimantes NGB-C et NGB-R	215
5.1.1.	<i>Une volonté stratégique forte des dirigeants</i>	215
5.1.2.	<i>Une intention tactique affirmée à travers la variété des voies de conception</i>	216
5.1.3.	<i>Un dispositif gestionnaire routinier.....</i>	216
5.1.4.	<i>Quelles sont les compétences nécessaires à la conception de la plateforme ?.....</i>	216
5.2.	Le détournement par un modèle de plateforme pour la constitution du patrimoine de création	217
5.3.	L'intérêt du patrimoine de création pour la compréhension des mécanismes de la phase de scale-up	218

Le chapitre précédent a mis en évidence comment rendre visible le patrimoine de création à partir du langage de la conception axiomatique, que sont les matrices de Suh. Nous avons ainsi souligné la complémentarité de ce langage avec la représentation des modèles d'affaires pour comprendre les efforts de conception propres à la phase de scale-up. En revanche, les travaux existants sur le patrimoine de création ne détaillent pas son processus de construction. En effet, les terrains des recherches, à partir desquels le patrimoine de création a été conceptualisé, étaient jusqu'à présent des entreprises déjà établies, disposant naturellement d'un patrimoine. Les startups, par essence récemment créées, se situent plutôt dans une période de mise en place du patrimoine. Ainsi, elles sont tout à fait pertinentes pour une étude de la constitution du patrimoine de création. Nous cherchons donc à présent à aller au-delà de l'observation du patrimoine de création, en nous demandant : **comment une startup deeptech se constitue-t-elle un patrimoine de création durant cette phase de scale-up ?**

Alors que les travaux sur le patrimoine de création et son évolution sont encore trop rares, le détour par le concept de plateforme donne des éléments utiles à l'élaboration d'un modèle d'évolution du patrimoine de création. En effet, les plateformes possèdent, comme le patrimoine de création, une propriété de générativité et présentent l'avantage de faire l'objet de nombreuses études dans la littérature. L'évolution des plateformes doit ainsi permettre de comprendre comment une startup deeptech gère une expansion fonctionnelle régulière, caractéristique de la phase de scale-up, tout en garantissant la généricité de la technologie développée. Dans une première partie, nous nous appuyons sur la littérature portant sur les plateformes pour expliciter le phénomène d'expansion fonctionnelle et la généricité de la technologie dans la conception des plateformes et ainsi affiner notre question de recherche. Nous détaillons ensuite la méthode d'analyse du cas de la startup Poietis. La troisième partie consiste en une présentation précise du cas, ainsi qu'en une justification de l'atteinte de la phase de scale-up par Poietis et de son caractère deeptech. L'avant-dernière partie du chapitre est consacrée aux résultats de cette étude. Nous revenons sur la question principale portant sur la constitution du patrimoine de création dans une dernière partie.

1. Étudier la constitution du patrimoine de création à partir de l'émergence des plateformes

1.1. Les plateformes : un objet de recherche aux caractéristiques proches de celles d'un patrimoine de création

1.1.1. Le modèle d'affaires de plateforme, originaire du monde de l'automobile et devenu une forme d'organisation dominante à l'ère du numérique

Une recherche dans la base de données bibliographique Scopus est un premier indicateur de la prédominance des solutions numériques lorsqu'il s'agit de plateforme. Sur les 2567 articles

recensés par une sélection à partir des termes plateforme et modèle d'affaires⁴³, on en dénombre 977 relatifs au monde du numérique⁴⁴. Les *digital platforms* prennent désormais des formes variées et plusieurs concepts ont émergé dans la littérature, dont, entre autres, les *multisided platform*, *multisided markets*, *direct and indirect network externalities*, *technical or sociotechnical views of digital platform*, récapitulés par De Reuver et al. (2018, tableau 1, p.127). Dans leur programme de recherche sur les plateformes numériques, les auteurs proposent d'ailleurs de clarifier les définitions de ces concepts et d'en délimiter les périmètres selon les architectures et les secteurs d'activité. En outre, la revue de la littérature détaillée proposée par Asadullah et al. (2018) souligne bien la diversité des types de plateformes numériques. Basées ou non sur une solution technologique, elles peuvent être catégorisées selon quatre dimensions : modèle d'affaires, mode d'interaction, mode de gouvernance, forme de propriété (d'après leur tableau 3, p.10). Au-delà des solutions logicielles, la filière électronique montre une appétence forte aux modèles d'affaires de plateforme compte-tenu de la grande diversité des acteurs de cet écosystème et de leur nombre, abondant ainsi dans le sens de Gawer et Cusumano (2014) : « *there are increasing incentives for more firms and users to adopt a platform and join the ecosystem as more users and complementors join* » (p.417).

Mais c'est d'abord dans l'industrie automobile que les plateformes ont vu le jour, comme le rappelle Steinberg (2022) : « *The automobile industry is one of the first sites where we see an overt deployment of the stack as an industrial model of platform development: building multiple models of cars from a single base or standard* » (p.1075). L'usage du terme de plateforme remonte aux années 1970 jusqu'à devenir courant à partir des années 1980 dans l'industrie automobile (Steinberg, 2022). La notion de plateforme est loin d'avoir disparu du monde de l'automobile : une étude de Ben Mahmoud-Jouini et Lenfle (2010) s'intéresse justement au cycle de vie des plateformes et à leur évolution plus particulièrement dans le cas de la réutilisation d'une plateforme de l'industrie automobile. Avec l'avènement des technologies numériques dans le monde automobile, la combinaison de stratégies de développement basées sur des plateformes *software* et *hardware* n'en est qu'à ses débuts. Puntigam et al. (2020) donnent d'ailleurs l'exemple d'une plateforme de simulation d'un véhicule à partir de prototypes virtuels.

Si les plateformes ont émergé dans le monde de l'automobile, pour connaître un développement fulgurant dans le numérique, la combinaison des plateformes existantes dans l'automobile avec les nouvelles plateformes numériques est tout à fait d'actualité. Cela rejoint la conclusion dressée par Steinberg (2022) qui fait le lien avec les ambitions de certaines grandes entreprises technologiques d'intégrer l'industrie automobile. Pourtant, vu comme un secteur hautement régulé, l'automobile, comme la santé ou l'éducation, présentait pour les grandes entreprises technologiques de trop fortes barrières à l'entrée compte-tenu des contrôles liés à la réglementation et des coûts opérationnels élevés pour Ozalp et al. (2022). Ces derniers font en effet état d'une entrée des grandes entreprises technologiques sur ces marchés, qu'ils modélisent à travers un processus qu'ils nomment « *digital colonization* ». Ils le définissent à partir de plusieurs étapes : la récupération des données à partir des infrastructures fournies, l'analyse des données et leur combinaison avec d'autres secteurs, puis la conception et la commercialisation de nouveaux

⁴³ Recherche faite le 10/07/2023 et réalisée à partir de la requête suivante : {platform} AND {business model}, dans les champs « titre de l'article, résumé et mots-clefs »

⁴⁴ La requête est alors : {platform} AND {business model} AND "digital*" OR "software", dans les mêmes champs.

produits et services. La capacité des géants du numérique ayant développé un modèle d'affaires de plateforme à intégrer des marchés particulièrement concurrentiels interroge les propriétés des plateformes.

1.1.2. Préservation et générativité : deux caractéristiques des plateformes dans la conception de lignées de produits

La revue de la littérature proposée par Jiao et al. (2007) relie la conception de familles de produits (autrement appelées gammes ou lignées de produits) avec le développement de produits basés sur une plateforme dans le but de réaliser des économies d'échelle. Reprenant des travaux existants, les auteurs voient dans les lignées de produits : « *a set of similar products that are derived from a common platform and yet possess features/functionality to meet particular customer requirements* » ; et poursuivent en explicitant le lien entre la plateforme et la famille de produits : « *all product variants share some common structures and product technologies, which form the platform of product family* » (p.7). La définition d'une structure commune appelle justement à la préserver. Pour Baldwin et Woodard (2008), la modularité de l'architecture de la plateforme se définit entre les éléments avec une « *low variety and high reusability* » et ceux avec une « *high variety and low reusability* » (p.9), la plateforme étant définie par les premiers éléments. D'ailleurs, dans le cas de la réutilisation de plateforme en vue de la conception de nouveaux produits, Ben Mahmoud-Jouini et Lenfle (2010) mettent en évidence un processus d'apprentissage, dit « *smart reuse* », pour une « *continuous adaptation between the existing components of the platform and the requirements of the new products* » (p.17). Ce processus se base notamment sur une règle de conception qui stipule que la conception d'un nouveau produit doit réutiliser le plus d'éléments possibles de la plateforme. On retrouve déjà dans cette règle des traces de la notion de préservation.

Les travaux sur les familles de produits issus de plateformes sont une preuve de la générativité des plateformes, qui, selon la définition partagée par les chercheurs en développement de produit d'après Baldwin et Woodard (2008), servent à décrire des « *projects that created a new generation or family of products for a particular firm* » (p.4). Mais certains dilemmes subsistent lorsqu'il s'agit de les concevoir. En effet, en s'intéressant aux produits basés sur une plateforme, E. F. Thomas (2014) souligne ces dilemmes : s'il y a besoin de plus de ressources au début du développement en comparaison avec le lancement d'un produit unique, les effets d'échelle en termes de coûts sont significatifs lorsqu'il s'agit d'industrialiser ; c'est aussi le temps d'atteinte du marché qui se réduit au fur et à mesure du lancement des produits dérivés, alors que les choix de conception initiaux ne sont pas toujours optimaux car il s'agit aussi de garantir à terme la création d'une gamme de produits. L'originalité des travaux d'E. F. Thomas (2014) tient plus particulièrement à l'étude des environnements turbulents, dans lesquels des « *frequent and unpredictable market and/or technical changes within in the industry increase risk and uncertainty in the [new product development] strategic planning process* » : cette définition des environnements turbulents, basée sur les changements qui touchent notamment la technologie et le marché, les rapproche de la situation de double inconnu caractéristique de la conception de plateformes pour les technologies génériques (Kokshagina et al., 2016). E. F. Thomas (2014) montre alors qu'en réponse à des environnements turbulents, la conception de plateformes de produits est une solution : plus la turbulence est importante, plus la tendance à opter pour une plateforme de

produits est grande ; cela est encore plus marqué dans le cas d'une turbulence sur le marché (vue comme une incertitude sur le client ou un changement de la demande) par rapport à une turbulence sur la technologie (qui correspond au degré de changement de l'innovation technologique). Ces travaux démontrent l'intérêt du développement de dispositifs stables (ce qui est le propre de la plateforme) dans un environnement mouvant, pour être en mesure de générer plus rapidement une série de produits dérivés adaptés aux turbulences, ce que l'on peut considérer comme des ouvertures de la plateforme.

Ainsi, nous avons montré que les plateformes possèdent deux propriétés qui sont aussi partagées par le patrimoine de création : la préservation et la générativité. Face à la proximité des caractéristiques des plateformes avec celles du patrimoine de création, nous en déduisons qu'une plateforme peut être considérée comme étant une forme de patrimoine de création. Dans la suite du chapitre, nous assimilerons le patrimoine de création à une plateforme. Cela nous amène à reformuler la question de recherche : **comment une startup deeptech dans la phase de scale-up gère-t-elle l'émergence d'une plateforme ?**

1.2. Enjeux de conception autour de l'évolution des plateformes

1.2.1. Concevoir et passer à l'échelle un modèle d'affaires de plateforme

Les grandes étapes de la conception de plateformes technologiques sont résumées par Tura et al. (2018), qui précisent s'appuyer sur une approche par les sciences de la conception. Ils montrent ainsi comment les choix de conception peuvent influencer chacune des étapes principales de la construction d'une plateforme. En résumé, Tura et al. (2018) définissent quatre étapes : l'architecture de plateforme, la logique de création de valeur, la gouvernance et la concurrence entre concepteurs de plateformes. À partir de ces étapes, les auteurs récapitulent une liste des « *core platform design problems* » (p.884-885). Concernant l'architecture de la plateforme, le premier objectif est de définir les interactions principales entre les acteurs et leurs structures. Le rôle des acteurs dans la plateforme donne des indications quant à la logique de création de valeur mise en place. La gouvernance consiste à déterminer le management et la propriété, et à prendre en considération les règles de gestion de la plateforme (régulations, lois). La question de la concurrence apparaît à des étapes-clefs : le lancement de la plateforme ainsi que son passage à l'échelle font l'objet de choix de conception influençant les interactions de la plateforme avec son écosystème.

En effet, l'étude des compétitions entre les acteurs d'une plateforme technologique met en lumière les reconfigurations des interactions induites par l'évolution de la plateforme. Pour qualifier ces changements, Cabanes et al. (2015) se proposent d'introduire le concept de pervasivité d'une technologie. La pervasivité contribue à définir « la capacité d'une invention technique à se diffuser à travers un large ensemble de systèmes techniques » ainsi que « le degré de transformation et de réorganisation qu'implique une invention technique sur les autres systèmes » (p.16). Cabanes et al. (2015) montrent alors que le choix d'une évolution d'une plateforme selon une stratégie de pervasivité technologique appelle à « contrôler le degré de transformation des différents systèmes techniques, tout en augmentant le nombre de relations entre différents systèmes » (p.25). Le cas de l'entreprise Intel, qui fait l'objet de travaux détaillés conduits par Gawer et Henderson (2007), est

un bon révélateur des dilemmes liés à la gestion des acteurs en lien avec la plateforme et potentiellement concurrents, appelés complémenteurs. Gawer et Henderson (2007) mettent en évidence comment Intel, en tant que propriétaire de la plateforme, a structuré les choix de positionnement sur des marchés complémentaires lucratifs en limitant les gains par la subvention de l'entrée de complémenteurs sur ces mêmes marchés, tout en conservant le contrôle de l'architecture de la plateforme. Cela démontre une réelle capacité de gestion des opportunités relatives au positionnement sur des marchés complémentaires.

D'autres méthodes comme la *Product Platform Concept Exploration Method* de Simpson et al. (2001) ont été définies pour répondre aux problèmes de conception de plateformes. Les auteurs proposent une méthodologie d'exploration des produits issus d'une plateforme dans le but de développer des familles de produits et démontrent son efficacité dans le cas d'une gamme de moteurs conçue à partir d'une plateforme. Néanmoins, nous questionnons l'adaptabilité de leur méthodologie à des situations de double inconnu, au niveau du marché et de la technologie. En effet, la première étape de leur méthode consiste à réaliser une segmentation du marché, qui n'est pas rediscutée dans la suite du processus et qui fait apparaître des segments de marché déjà connus a priori. De même, la classification des facteurs techniques sur lesquels jouer pour moduler les performances du système ne semble pas faire l'objet d'un travail d'exploration particulier : ces paramètres de conception sont connus à l'avance. L'apport des méthodes de conception dans l'inconnu est donc pertinent lorsque ni le marché ni les solutions techniques n'existent en amont de la conception de la plateforme.

Ce sont les travaux sur le passage à l'échelle des modèles d'affaires de plateforme qui permettent de mieux saisir les enjeux d'exploration du marché. Il s'agit tout d'abord de noter que le passage à l'échelle d'une plateforme ne se confond pas avec la phase de croissance, parce qu'il est permis par la mise en place de règles de conception spécifiques à la création d'effets de réseau et d'interactions entre les acteurs (Varga et al., 2023). C'est selon ces règles que l'exploration du marché a lieu. Par ailleurs, l'architecture d'une plateforme influence sa capacité à passer à l'échelle : Padmanabhan et Subramaniam (2020) montrent d'une part que les architectures ouvertes, favorisées par une certaine modularité, permettent déjà un passage à l'échelle au niveau des usages ; et d'autre part qu'il existe une modularité de l'architecture optimale vis-à-vis de la performance du passage à l'échelle d'une plateforme. Les choix de conception tout au long des étapes de la construction de la plateforme ont bien un impact sur la capacité de la plateforme à passer à l'échelle. Les règles, largement évoquées par la littérature, qui déterminent ces choix, nous intéressent plus particulièrement pour comprendre l'émergence d'une plateforme capable de constituer une lignée de produits.

1.2.2. La conception de technologies génériques vues comme un type particulier de plateforme

Les travaux de Gawer et Cusumano (2014) introduisent la distinction entre les plateformes dites internes et externes. Dans une situation d'innovation incrémentale pour le développement de nouveaux produits, les auteurs indiquent que les concepteurs ont une tendance naturelle à « *systematically reuse patterns and design rules from previous work and improve upon prior art and the work of others* » (p.419). C'est ce qui définit les plateformes internes, ou autrement dit

spécifiques aux entreprises, dont le but est de garantir l'existence d'une famille de produits ou d'un ensemble de propriétés sur un produit donné. Gawer et Cusumano (2014) précisent leurs propos à partir des travaux de Baldwin et Clark (2000) en exprimant deux règles de conception propres à la gestion des plateformes internes : la stabilité de l'architecture du système et la réutilisation systématique ou planifiée des composants modulaires. Par ailleurs, Gawer et Cusumano (2014) définissent les plateformes externes ou plateformes industrielles comme des « *products, services, or technologies developed by one or more firms, and which serve as foundations upon which a larger number of firms can build further complementary innovations and potentially generate network effects* » (p.420). Les auteurs vont jusqu'à proposer un parallèle avec la notion de *dominant design* qui sert à définir la forme et les propriétés principales d'un produit : qu'il s'agisse d'une plateforme ou d'un *dominant design*, on voit apparaître un phénomène de stabilisation progressive d'un sous-système de composants formant un cœur commun, laissant alors la possibilité d'innover à la périphérie de ce cœur.

Cette distinction entre deux niveaux nous amène à faire un parallèle avec les *general purpose technologies* définies par Bresnahan et Trajtenberg (1995), ce qui ouvre la voie à une comparaison avec les technologies génériques, c'est-à-dire avec des technologies capables de « *addressing sets of emerging markets, mobilizing various technological alternatives, and supporting economic growth and development* » (Kokshagina, 2014, p.33). Une technologie générique portée par une entreprise peut alors être considérée comme une plateforme interne, dont le but est de constituer une lignée de produits. Ce sont les débats soulevés par les technologies génériques et les plateformes qui sont les plus intéressants à mettre en évidence pour consolider la comparaison. En effet, Kokshagina (2014) montre comment la conception de technologies génériques permet de limiter les risques dans le choix du modèle d'affaires par l'exploration de plusieurs marchés pour compenser l'absence de signaux sur les marchés dominants. Cela rejoint la problématique soulevée par Gawer et Henderson (2007) qui s'intéressent au cas d'Intel et aux choix de positionnement de la plateforme sur un ou plusieurs marchés complémentaires.

La conception de technologies génériques a déjà fait l'objet de travaux de recherche : à partir de deux cas d'études techniques issus du CEA, Hooge et al. (2016) démontrent qu'il est préférable, en situation de double inconnu, d'opter non pas pour une stratégie de réduction des incertitudes, mais de construction d'un « *'generic core' by building new interdependencies between previously independent states* » (p.477). Popiolek et al. (2014) précisent cette construction à partir des théories de la conception innovante : la mise en lien de technologies connues et la définition de relations d'indépendances ou d'interdépendances entre ces technologies permet en effet d'atteindre une grande variété d'applications. Le déploiement d'une technologie générique apparaît bien comme un moyen de garantir la générativité d'une solution innovante. L'existence d'un cœur générique à construire et à préserver renvoie à la notion de plateforme. Les règles de définition des indépendances et des interdépendances pour gérer l'exploration des marchés peuvent être vues comme un moyen de définir ceux atteignables par la plateforme. La définition d'un cœur générique devient dès lors une règle de conception que l'entreprise se donne pour garantir sa générativité. En cela, le développement d'une technologie générique, vue comme un type de plateforme, appartient au patrimoine de création.

1.2.3. L'expansion fonctionnelle dans la construction des plateformes

La notion d'expansion fonctionnelle provient, à l'origine, d'études portant sur l'évolution des biens de consommation courants. La thèse réalisée par El Qaoumi (2016) indique que l'expansion fonctionnelle est « une nouvelle forme de l'innovation contemporaine, se caractérisant par une logique d'expansion des caractéristiques ou des fonctions et des usages, [qui] s'impose donc, comme un facteur clé de la dynamique de marché et comme un avantage concurrentiel pour les entreprises » (p.19). Il s'agit donc de comprendre que les produits évoluent en intégrant de nouvelles fonctions, qui ne sont pas issues d'une amélioration ou d'une combinaison de celles passées (El Qaoumi, 2016 ; M. Thomas et al., 2021).

Ce concept a ensuite été élargi à d'autres cadres : par exemple, les travaux conduits par Gilain et al. (2019) rendent visible la dynamique de l'expansion fonctionnelle dans le cas de l'industrie aérospatiale. Les auteurs constatent d'abord une explosion des coûts de conception des avions à partir de l'augmentation progressive du temps de développement des avions. Faisant planer le risque d'une démesure des coûts d'acquisition des avions en quelques décennies, Gilain et al. (2019) proposent un modèle pour saisir la complexité du produit et de son évolution. Ils analysent ainsi les modifications de la réglementation des avions commerciaux et font alors apparaître le phénomène d'expansion fonctionnelle. L'étude des coûts à partir de ce modèle montre plutôt la capacité des bureaux d'études à limiter une croissance exponentielle par le contrôle de l'expansion fonctionnelle.

Plusieurs types d'expansion fonctionnelle coexistent comme le montrent Le Masson et al. (2019) en proposant un modèle pour la caractériser, qu'ils illustrent ensuite à partir d'une étude de l'évolution des fonctions de huit objets du quotidien (du téléphone portable au fer à repasser en passant par la brosse à dents). L'expansion fonctionnelle peut ainsi être dite endogène dans la mesure où elle est issue d'un régime d'extension des techniques provenant d'une logique interne. Le concept d'expansion fonctionnelle endogène ouvre alors la voie à une expression d'un gain en fonctionnalités non pas uniquement basé sur les innovations de rupture, mais sur « *an "heritage" of previously designed techniques that actually determines the potential of future expansions* » (p.1024). Le patrimoine sur lequel s'appuie l'expansion fonctionnelle se caractérise, selon Le Masson et al. (2019), par sa capacité à créer les possibles fonctions nouvelles et par l'interdépendance de la structure de ses éléments. Le rapprochement avec le concept de plateforme est naturel : il s'agit dès lors de comprendre comment le phénomène d'expansion fonctionnelle influence l'émergence de la plateforme, autrement dit, comment la plateforme se construit en prenant en compte l'expansion fonctionnelle.

1.2.4. L'apport des travaux sur le renversement des plateformes à la compréhension des mécanismes de développement des plateformes

Un cas particulier dans la conception de plateforme relève du rôle des complémentateurs dans la compétition sur la prise de contrôle de l'architecture de la plateforme. C'est ce que M. Thomas et al. (2021) appellent « *platform overthrow* », ce que l'on traduira par renversement de plateforme. Les auteurs explicitent un certain nombre de cas, dans le numérique, où l'architecture de la plateforme, définie par le propriétaire de la plateforme, a été récupérée par un complémentateur. Ils

cherchent alors à en comprendre les mécanismes, qui se retrouvent à la fois au niveau des propriétaires et au niveau des complémentateurs. M. Thomas et al. (2021) avancent comme résultat central de leurs travaux que ces mécanismes correspondent d'une part à une expansion fonctionnelle du complémentateur et d'autre part à l'augmentation de la généricité du cœur technique par celui qui remportera le contrôle de l'architecture de la plateforme. En effet, l'expansion fonctionnelle suppose une extension de la généricité pour le maintien de la plateforme.

En cherchant à caractériser l'expansion fonctionnelle pouvant engendrer ce renversement de plateforme, M. Thomas et al. (2021) déterminent trois actions possibles :

- La résolution de problèmes fonctionnels durables,
- L'ajout de nouvelles fonctions aux fonctions existantes,
- L'augmentation du potentiel de l'écosystème.

De même, le gain en généricité du cœur technique peut être réalisé à partir de trois mouvements, comme les auteurs le mettent en évidence :

- La reconfiguration du cœur technique,
- La transition du cœur technique,
- La modification des limites du cœur technique.

Nous pouvons nous inspirer de ces résultats relatifs à la situation de renversement de plateforme pour enrichir notre compréhension des mécanismes de construction et d'évolution des plateformes. Dans la mesure où nous avons pu montrer qu'il existait un phénomène d'expansion fonctionnelle dans le cadre de la construction de plateforme (section 1.2.3) et que la considération des technologies génériques comme un type particulier de plateforme amenait à se donner comme règle de conception des plateformes la garantie de l'existence d'un cœur générique (section 1.2.2), l'extrapolation des résultats de M. Thomas et al. (2021) vient enrichir notre compréhension de l'émergence des plateformes, et *a fortiori* notre modèle de constitution d'un patrimoine de création. Nous chercherons donc dans la suite du propos à répondre à la question suivante : **comment le gain en fonctionnalités et en généricité peut-il être garanti par une startup deeptech en phase de scale-up ?**

2. La construction d'une plateforme à partir d'une recherche-intervention dans une startup deeptech de la santé : éléments de méthode

2.1. Mise en place d'une recherche-intervention

La volonté de saisir avec précision les enjeux de constitution d'un patrimoine de création à travers l'émergence d'une plateforme a conduit à chercher une startup deeptech en phase de scale-up avec laquelle mener cette étude. Nous avons eu l'opportunité de travailler avec l'entreprise Poietis, basée à proximité de Bordeaux et spécialisée dans la bioimpression par laser. Dans la mesure où Poietis est un membre actif de la communauté d'entrepreneurs Les Deeptech⁴⁵ animée par

⁴⁵ La communauté Les Deeptech joue notamment le rôle de collectif de partage d'expériences et d'informations entre entrepreneurs deeptech : <https://www.lesdeeptech.fr/communaute-startups-deeptech-france/>

Bpifrance et où un premier contact avec le CGS avait eu lieu par le passé, l'accès à cette startup deeptech était facilité. De plus, arrivée à une phase-clef de son développement avec la mise sur le marché de deux bioimprimantes, Poietis est apparue comme étant un candidat pertinent pour cette étude.

Deux entretiens préliminaires d'environ une heure chacun ont pu avoir lieu, en visioconférence, courant mars 2021, avec le directeur de la technologie, Bertrand Viellerobe, puis le président directeur général et co-fondateur, Fabien Guillemot. Ces premiers échanges ont permis de prendre connaissance des problématiques propres à Poietis, de se familiariser avec la technologie développée et de confirmer la pertinence de Poietis vis-à-vis de l'étude conduite. Ils ont été complétés par une visite des locaux de l'entreprise en août 2021, conduite par Bertrand Viellerobe, à la suite de laquelle nous avons convenu de démarrer l'étude durant l'année 2022.

Du point de vue de Poietis, l'étude avait pour intérêt de prendre du recul sur la stratégie de l'entreprise, plus particulièrement dans le but de clarifier son positionnement vis-à-vis d'investisseurs. Les questionnements principaux portaient également sur les choix de conception à réaliser pour les prochains produits et la détermination des éléments à préserver entre chaque produit. Les premières discussions avaient par ailleurs confirmé l'intérêt de ce cas pour la recherche menée sur les mécanismes de scale-up des startups deeptech. Cette entreprise d'une trentaine de collaborateurs, arrivée à un certain stade de maturité, après avoir obtenu plusieurs succès, a vu son carnet de commandes considérablement s'étoffer au cours de l'année 2022 : ces éléments ont été autant de signes précurseurs d'une phase de scale-up, permettant de faire de Poietis un cas d'étude tout à fait adapté pour mener nos travaux dans le cadre d'une recherche-intervention.

Une deuxième visite avec Bertrand Viellerobe a pu avoir lieu en mars 2022 pour préparer plus spécifiquement la recherche-intervention et réactualiser les questionnements respectifs. Le travail a ensuite été organisé sous la forme de trois comités de pilotage, réunissant les deux co-fondateurs de Poietis, Fabien Guillemot et Bruno Brisson, directeur en charge du développement commercial, Bertrand Viellerobe et l'équipe de recherche du CGS composée de Pascal Le Masson, Blanche Segrestin et de la doctorante. Les comités de pilotage ont respectivement eu lieu en avril, juin et novembre 2022. Ils ont permis de délimiter des étapes de récupération des données et d'élaboration du modèle. La recherche a pu être menée grâce aux deux séjours passés au sein de Poietis, le premier de sept jours consécutifs entre fin avril et début mai 2022 puis un second durant trois jours à la mi-août 2022. L'ensemble des interactions avec Poietis est récapitulé dans le Tableau 22 ci-après.

Tableau 22. Résumé des interactions directes de la doctorante avec Poietis

<i>Date</i>	<i>Modalité</i>	<i>Participants</i>	<i>Durée</i>
10 mars 2021	Entretien préliminaire en visioconférence	Bertrand Viellerobe	1h
25 mars 2021	Entretien préliminaire en visioconférence	Fabien Guillemot	1h
20 août 2021	Visite préliminaire	Bertrand Viellerobe	3h
21 mars 2022	Visite complémentaire	Bertrand Viellerobe	2h
13 avril 2022	Comité de pilotage de lancement, en visioconférence	Bruno Brisson, Fabien Guillemot, Pascal Le Masson, Blanche Segrestin, Bertrand Viellerobe	2h
28 avril – 6 mai 2022	1 ^{er} séjour à Poietis	Interlocuteurs détaillés dans le Tableau 23	7 jours
10 juin 2022	Comité de pilotage intermédiaire, à Bordeaux	Bruno Brisson, Fabien Guillemot, Pascal Le Masson, Blanche Segrestin, Bertrand Viellerobe	3h
17-19 août 2022	2 nd séjour à Poietis	Interlocuteurs détaillés dans le Tableau 23	3 jours
29 novembre 2022	Comité de pilotage final, en visioconférence	Bruno Brisson, Fabien Guillemot, Pascal Le Masson, Blanche Segrestin, Bertrand Viellerobe	2h

2.2. Récolte des données : une immersion dans l'entreprise

Les deux séjours dans les locaux de Poietis ont permis de diversifier significativement les interlocuteurs, d'assister aux manipulations des bioimprimantes et aux travaux sur les dispositifs eux-mêmes, de prendre la position d'observatrice lors de quelques réunions, et de réaliser un certain nombre d'entretiens. Ces derniers sont résumés dans le Tableau 23, faisant aussi apparaître les principaux sujets d'échange et la fonction de chaque interlocuteur. La variété et la richesse des multiples échanges ayant eu lieu ont permis d'acquérir une connaissance fine des activités et des produits, mais aussi plus partiellement de l'histoire des développements réalisés. Sur les 10 jours de visite réalisés, ce sont ainsi 24,5 heures d'entretiens qui ont été comptabilisées.

Dans le but d'atteindre un niveau de compréhension suffisant, ces entretiens ont été complétés par des séances en présence du dispositif de bioimpression, en sus des deux premières visites réalisées avec Bertrand Viellerobe en amont de la phase d'étude. Une première séance a consisté à voir la bioimprimante en fonctionnement et une seconde a été dédiée aux questions d'assemblage de la machine. Elles sont récapitulées dans le Tableau 24 ci-après.

Tableau 23. Détail des collaborateurs de Poietis ayant été rencontrés dans le cadre de la recherche-intervention mise en place et sujets principaux abordés au cours des échanges

<i>Date</i>	<i>Fonction</i>	<i>Sujets principaux abordés</i>	<i>Durée</i>
28/04/2022	<i>Chief Technology Officer</i> / Responsable industrialisation (Bertrand Viellerobe)	Présentation générale du cadre (ingénierie tissulaire, bioimpression), particularités de la bioimpression bas-haut, avancées techniques (brevet, laser), historique des bioimprimantes, projet cartilage	2h
02/05/2022	<i>Chief Business Officer</i> / Directeur Général (Bruno Brisson)	Organisation de l'entreprise, vision, modèle d'affaires, relations investisseurs	1h30
02/05/2022	Responsable R&D (ancien)	Automatisation et développement de la cartouche, NGB-C Marseille, structuration de la R&D, futures explorations et modèles d'affaires possibles	2h
03/05/2022	Responsable équipe clinique	Peau et preuves de la généricité, autres projets cliniques, retour d'expérience clinique avec l'AP-HM, évolutions de l'organisation	2h30
03/05/2022	<i>Chief Technology Officer</i> / Responsable industrialisation (Bertrand Viellerobe)	Financement, historique des bioimprimantes, automatisation avec bras-robot (VS platines), intégration des solutions propres à la NGB-C dans la future NGB-R	1h
04/05/2022	<i>Chief Business Officer</i> / Directeur Général (Bruno Brisson)	Investissement, rencontre fondateurs	1h
05/05/2022	Prestataire pour le développement de l'interface utilisateur du logiciel	Évolutions du logiciel, retour d'expérience avec l'AP-HM, développement logiciel pour les NGB-C et NGB-R	1h
05/05/2022	Responsable R&D (nouveau)	Structuration de la R&D, bioimpression par laser	1h
06/05/2022	<i>Chief Technology Officer</i> / Responsable industrialisation (Bertrand Viellerobe)	Modèles et théories, attentes de l'étude actuelle, autres travaux de recherche, fonctionnement cartouche VS lame pour NGB-C et NGB-R, nombre de cartouches par couches, précision bras-robot, partenaires industriels et premiers bons de commande	1h30
06/05/2022	<i>Chief Scientific Officer</i> / Président (Fabien Guillemot)	Processus de conception, relations investisseurs, écosystème (US / Fr), choix stratégiques (VS écosystèmes), URGO, objectifs dans le temps, histoire du choix de la peau	2h

06/06/2022	Deux doctorants en biologie, spécialisés sur les cellules souches et neuronales, Université de Barcelone	Cellules souches et neuronales, application à l'ingénierie tissulaire	30 min
17/08/2022	Chercheur en biologie, spécialiste des cellules souches	Travaux avec le consortium sur le pancréas, caractérisation des cellules souches	1h
17/08/2022	<i>Chief Technology Officer</i> / Responsable industrialisation (Bertrand Viellerobe)	Débats entre les bioimprimantes clinique et recherche	45 min
18/08/2022	Technicienne de l'équipe clinique	Débats entre les bioimprimantes clinique et recherche, perception, intérêt	1h
18/08/2022	<i>Chief Technology Officer</i> / Responsable industrialisation (Bertrand Viellerobe)	Technologie du visé-tiré, projet européen sur le cartilage	1h
18/08/2022	Stagiaire dans l'équipe R&D	Modélisation du jet pour l'impression, visualisation des résultats des tests avec les sphéroïdes et preuve de la nécessité du visé-tiré pour des gros objets	15 min
19/08/2022	<i>Chief Technology Officer</i> / Responsable industrialisation (Bertrand Viellerobe)	Aspects financiers, projet cartilage, motivations pour les choix de projet, performances, récapitulatif des projets	2h
19/08/2022	Ingénieur production	Débats relatifs à la conception entre les bioimprimantes clinique et recherche et perception, tests et validations	1h30

Tableau 24. Détails des séances d'étude de la bioimprimante de Poietis dans des contextes de projet différents, fonction de l'interlocuteur associé et sujets des échanges

<i>Lieu</i>	<i>Fonction</i>	<i>Projets</i>	<i>Sujets principaux abordés</i>	<i>Durée</i>
Salle blanche	Technicienne de l'équipe clinique	Pancréas	Cellules souches, composition de la bioencres, fonctionnement de la bioimprimante	~1h30
Atelier production	Ingénieur mécanique de l'équipe industrialisation	NGB-C Barcelone	Contraintes production : cas de la façade, taille de la bioimprimante ; cœur laser et évolutions	~1h30

Enfin, le cadre de la collaboration a permis la prise de notes lors de trois réunions en tant qu'observatrice non participante. Ces moments ont été l'occasion d'une meilleure compréhension des enjeux techniques propres aux projets et aux systèmes développés, ainsi qu'une connaissance plus pratique des instances de gestion mises en place au sein de Poietis. Le détail des participants et des sujets abordés lors de ces réunions est présenté dans le Tableau 25 ci-dessous.

Tableau 25. Dénomination, sujets et fonctions des participants aux réunions auxquelles la doctorante a assisté comme observatrice non participante

<i>Date</i>	<i>Nom</i>	<i>Sujets abordés</i>	<i>Fonctions des participants</i>	<i>Durée</i>
29/04/2022	Comité de pilotage - Système	Mécanique (aéroulrique) Électronique (sous-traitants pour l'armoire électronique) Buses (précisions de la fonction et coûts associés) Microscope (choix sous-traitance) Logiciel (spécifications fonctionnelles) Production (calendrier)	Animateur : <i>Chief Technology Officer</i> (Bertrand Viellerobe) Équipe R&D : ingénieur production, ingénieur électronique, spécialiste de la bioimpression avec buses, responsable du logiciel Décideurs : <i>Chief Scientific Officer</i> (Fabien Guillemot), <i>Chief Business Officer</i> (Bruno Brisson)	2h30
04/05/2022	Comité de pilotage du projet européen sur le cartilage	Impression de sphéroïdes	Équipe du projet : <i>Chief Technology Officer</i> (Bertrand Viellerobe), responsable R&D (nouveau), ingénieur R&D (ingénierie tissulaire et biomatériaux) Décideur : <i>Chief Scientific Officer</i> (Fabien Guillemot)	1h30
05/05/2022	Comité de pilotage - Consommables machines	Fournisseurs pour les consommables (cartouches de verre recouvertes d'une fine couche d'or sur laquelle est déposée la bioencres)	Animateur : <i>Chief Technology Officer</i> (Bertrand Viellerobe) Équipe R&D : responsable R&D (nouveau), ingénieur production, élève-ingénieur en alternance en génie mécanique Décideurs : <i>Chief Scientific Officer</i> (Fabien Guillemot), <i>Chief Business Officer</i> (Bruno Brisson)	1h

Les trois précédents tableaux indiquent la diversité et la richesse des données ayant été récoltées. À cela, il faut également ajouter l'ensemble des données secondaires nécessaires à la conduite de l'étude, qu'il s'agisse de données publiques (site internet de Poietis, médias dont interviews et présentations vidéo, publications sur les réseaux sociaux, brevets) et de données internes. Poietis a en effet mis à disposition un certain nombre de documents relatifs au développement technique (dont les dossiers pour le crédit-impôt recherche entre 2018 et 2021 détaillant les différentes étapes de conception réalisées), mais également le carnet de commandes pour 2022-2023 et diverses présentations à destination de parties prenantes externes dont des investisseurs. En outre, la position de chercheur en thèse Cifre au sein de Bpifrance a permis d'avoir accès aux demandes de financement faites par Poietis (c'est-à-dire aux dossiers transmis par l'entreprise et aux décisions des chargés d'affaires Bpifrance).

Ce sont les données décrites dans leur ensemble qui font l'objet de l'analyse présentée dans la suite du propos.

2.3. Choix méthodologiques pour l'analyse des données

2.3.1. Le recours à la conception axiomatique pour modéliser les plateformes

En se basant sur les travaux menés par Legrand et al. (2017) et M. Thomas et al. (2021), nous prenons le même parti pris de l'intérêt que représentent les matrices de Suh pour rendre visible le renversement de plateforme. Dans la mesure où les matrices de Suh sont construites à partir d'une correspondance entre les fonctionnalités auxquelles la solution répond et les paramètres de conception déterminés pour atteindre ces fonctionnalités, le recours à la conception axiomatique permet de modéliser le phénomène d'expansion fonctionnelle. Les données récoltées servent ainsi à élaborer notre modèle de plateforme à partir de l'étude des interdépendances entre les éléments de la matrice de Suh, c'est-à-dire les couples fonctions-paramètres (FR-DP). Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'évolution de la matrice de Suh face à une situation d'expansion fonctionnelle de la plateforme.

Contrairement à l'usage des matrices de Suh fait dans le chapitre précédent, nous ne détaillerons pas l'ensemble des fonctionnalités et des paramètres de conception ainsi que les relations entre eux. Il s'agit bien d'y avoir recours pour expliciter un modèle de plateforme plus général et de comprendre la forme que prend ce modèle dans le cas d'une startup deeptech en phase de scale-up, pour en déduire des outils de gestion. Par ailleurs, c'est bien la plateforme globale que nous cherchons à modéliser et non pas les différents produits, comme nous l'avions fait dans le cas des MVP successifs d'Agricool. Alors que dans le cas d'Agricool les MVP étaient définis permettant d'en faire une évaluation *ex post*, nous nous plaçons cette fois dans un cas où la plateforme décrite par une matrice de Suh est elle-même en construction. On attend donc de la modélisation par la conception axiomatique de faire apparaître des règles de conception dynamiques.

2.3.2. Une formalisation du raisonnement de conception à partir de la théorie C-K pour caractériser les choix de conception

La théorie C-K, introduite par Hatchuel et Weil (2002, 2003), relie une approche basée sur la connaissance à une approche basée sur la créativité pour comprendre le raisonnement de conception. C'est plus particulièrement parce que la théorie C-K formalise l'émergence d'une innovation et explicite plusieurs voies de conception alternatives pour répondre à une même problématique que nous y avons recours dans le cadre de la compréhension des mécanismes de développement d'une plateforme.

Le point central de la théorie repose sur la mise en lumière de l'existence de deux espaces en expansion : l'espace des concepts (C) dans lequel sont formulées des propriétés qui ne sont ni vraies ni fausses, c'est-à-dire inconnues ou sans statut logique, et l'espace des connaissances (K) qui regroupe des propositions avec un statut logique, tout ce qui est de l'ordre du connu. C'est l'expansion conjointe de ces deux espaces qui est particulièrement intéressante et à partir de laquelle on modélise le raisonnement de conception. De nouvelles connaissances peuvent être générées dans l'espace K, on parle alors d'expansion en K ; tandis que les concepts de l'espace C peuvent être raffinés ou faire l'objet d'une exploration, par un opérateur dit de partition. En sus des opérations qui ont lieu au sein même des espaces, la théorie C-K démontre que la génération de nouveaux concepts innovants passe par une mobilisation des connaissances dans l'espace K et que ces nouveaux concepts appellent ensuite un approfondissement des connaissances. Au-delà de l'expression d'un raisonnement de conception à partir des passages de l'espace C vers l'espace K (appelés conjonction) ou de l'espace K vers l'espace C (appelés disjonction), la théorie C-K présente une utilité en termes d'exploration de concepts innovants, générés grâce à la mobilisation des connaissances et à l'expansion conjointe des deux espaces.

Nous avons ainsi recours à la théorie C-K à deux reprises dans la suite du chapitre. En premier lieu, elle permet de mettre en évidence le raisonnement de conception qui conduit à l'élaboration du modèle d'affaires du cas étudié. En second lieu, nous y aurons recours pour expliciter l'ensemble des voies de conception possibles lorsqu'il s'agit de gérer le phénomène d'expansion fonctionnelle.

3. Le cas de Poietis : une nouvelle technologie de bioimpression pour la médecine régénérative

Véritable révolution du XX^e siècle, la médecine régénérative n'a cessé depuis de réaliser des avancées scientifiques majeures. Cette science de la réparation tissulaire, du remplacement d'organes ou de la régénération cellulaire a pour objectif principal de redonner toutes ses fonctions à un corps humain traumatisé (par une maladie chronique ou un événement accidentel). La transplantation d'organes, autrement appelée greffe, en est un des exemples les plus répandus et les mieux maîtrisés de nos jours. Les récentes recherches en médecine régénérative portent plus spécifiquement sur la thérapie génique et la thérapie cellulaire à partir de cellules souches. L'ingénierie tissulaire fait également partie des champs de développement de la médecine

régénérative. En combinant un ensemble de techniques, les scientifiques cherchent à fabriquer des substituts biologiques à des tissus humains ou à certaines de leurs fonctions. Cela nécessite de maîtriser les caractéristiques biologiques du tissu, les conditions de culture cellulaire pour permettre la croissance tissulaire, ou encore les sciences des matériaux pour concevoir les meilleures structures des tissus biologiques ainsi formés. Le contexte général d'émergence de ces technologies est plus amplement décrit dans la thèse de Pilorget (2019), à laquelle le lecteur plus intéressé pourra se référer. Nous détaillons ci-après la technologie développée par Poietis et nous montrons que cette startup est bien dans une phase de scale-up et qu'elle partage le caractère deeptech conformément aux caractéristiques proposées dans le chapitre 1.

3.1. La genèse de la startup Poietis et son positionnement dans l'écosystème de la bioimpression

3.1.1. La bioimpression assistée par laser de tissus biologiques

Créée en 2014, Poietis est une startup qui a toujours eu pour ambition d'apporter des solutions de médecine régénérative. Fabien Guillemot⁴⁶, chercheur à l'INSERM, et Bruno Brisson, consultant et entrepreneur, se sont associés afin de porter jusqu'au stade clinique des solutions de bioimpression de tissus vivants, dans la perspective à long terme de réaliser des greffes. Cette volonté est déjà inscrite dans les statuts de la société (soulignée par nos soins dans l'article 2 des statuts retranscrit ci-après) :

ARTICLE 2 – OBJET

La Société a pour objet, tant en France qu'à l'étranger :

- *l'étude, la recherche, le développement scientifique et technique dans les domaines de la biologie, de la biologie médicale et de la biotechnologie, en vue de la conception et de la fabrication de nouveaux tissus biologiques obtenus par bioimpression et utilisés à des fins de recherche biopharmaceutique, dermo-cosmétique et de traitements thérapeutiques favorisant la réparation tissulaire,*
- *les prestations de services en biotechnologie,*
- *le développement, la gestion et la commercialisation d'outils à usage biologique, médical, thérapeutique ou diagnostic,*
- *la participation de la Société, par tous moyens, dans toutes opérations pouvant se rapporter à son objet par voie de création de sociétés nouvelles, de souscriptions ou d'achat de titres ou droits sociaux, de fusion ou autrement,*
- *et, généralement, toutes opérations financières, commerciales, industrielles, mobilières et immobilières pouvant se rattacher directement ou indirectement à l'objet ci-dessus ou à tous objets similaires ou connexes, de nature à favoriser son développement ou son extension.*

⁴⁶ Publications de Fabien Guillemot : <https://www.researchgate.net/scientific-contributions/Fabien-Guillemot-39153479>

Bioimprimer consiste à déposer progressivement des cellules vivantes sur un substrat, à cultiver ces cellules et à assembler ces couches de cellules bioimprimées pour fabriquer un tissu selon des caractéristiques prédéfinies. Ce procédé d'impression par couches successives ajoutées peut être mis en parallèle du principe de la fabrication additive (plus connue sous la terminologie d'impression 3D). On retrouve d'ailleurs des caractéristiques proches : un procédé d'impression en trois dimensions par accumulation de couches et la maîtrise du positionnement précis de la matière imprimée sur le substrat receveur, souvent piloté par ordinateur. La différence principale, et qui fait toute la complexité de la bioimpression, réside dans la nature même de la matière imprimée : des cellules vivantes. Deux enjeux majeurs apparaissent : la survie de ces cellules et leur capacité intrinsèque à se réorganiser et à se reproduire au cours de la phase de culture cellulaire (ce que l'on appelle la maturation), conditionnant l'obtention d'un tissu viable. Le défi majeur de la bioimpression est donc de prédire les processus d'auto-organisation des cellules dans le temps.

Les principes de la bioimpression ont été décrits à la fin des années 1980. Mais il faut attendre 2010 pour que le terme soit défini, à la suite des avancées scientifiques réalisées dans le monde de la recherche sur les biomatériaux et en biologie cellulaire. C'est une véritable révolution qui s'est produite, comme en témoignent l'importance que ce sujet a pris au niveau de la publication d'articles scientifiques et la publication de familles de brevets ces dernières années. Ces données sont récapitulées dans la Figure 22.

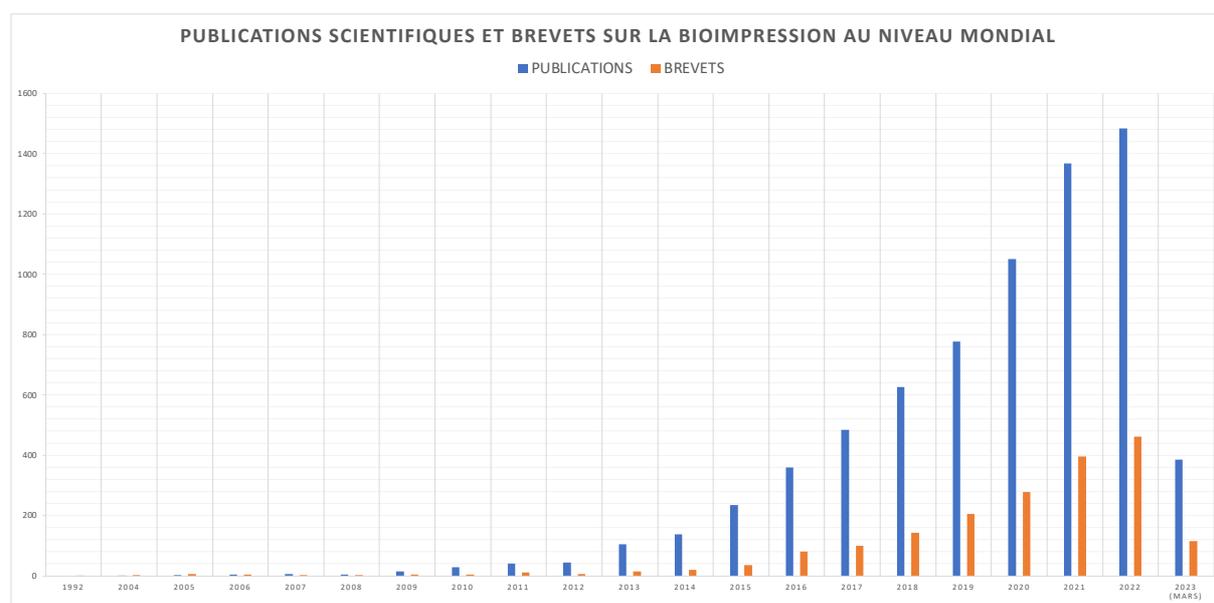


Figure 22. Visualisation de l'intérêt croissant porté à la bioimpression sur le plan mondial à partir du nombre de publications scientifiques et de dépôts de brevets jusqu'en mars 2023

La technologie de bioimpression par laser (ou *Laser-assisted bioprinting*, LAB) développée par Poietis a fait plus spécifiquement l'objet des recherches conduites par Fabien Guillemot à partir des années 2000. Des travaux de recherche ont été menés durant une dizaine d'années avant la création de l'entreprise au sein du Laboratoire de Bioingénierie Tissulaire (BioTis, UMR 1026, INSERM/Université de Bordeaux) se caractérisant par son approche multidisciplinaire (biologie, chimie, physique, ingénierie, approche clinique). Une première machine de bioimpression par laser

avait d'ailleurs été conçue en interne à l'INSERM dès 2007. C'est la volonté d'exploiter cette technologie à plus grande échelle et en vue d'essais cliniques qui a conduit à la création d'une startup.

La maîtrise simultanée de plusieurs disciplines scientifiques est une des caractéristiques principales de Poietis. De la physique du laser, en passant par la mécanique et le contrôle-commande, sans oublier la biologie cellulaire et les biomatériaux, c'est par la mise en relation de toutes ces disciplines que Poietis conçoit un système de bioimpression, le protocole d'impression associé et réalise l'impression d'un tissu vivant. Ces compétences-clefs sont internalisées et la proportion de docteurs, autour de 25 %, issus de domaines divers, est très importante.

Bien que la peau soit le seul tissu qui ait été commercialisé par Poietis jusqu'à présent, les projets portant sur d'autres types de tissus sont nombreux. C'est déjà plus de 30 types cellulaires qui ont pu être bioimprimés. Les premières recherches à l'INSERM avaient d'abord pour objet les cellules osseuses. Dans le cadre de consortia de recherche auxquels Poietis est intégré, les tissus faisant l'objet de travaux de recherche sont par exemple : le cartilage, les cellules pancréatiques, le foie, ou encore des cellules cardiaques pour la réparation du cœur.

3.1.2. Considérations techniques pour une compréhension plus fine des défis à relever

La technologie de Poietis consiste en un ensemble composé d'une machine réalisant un protocole d'impression pour fournir un produit biologique. Cela en fait une startup pouvant a priori être considérée à la fois comme une medtech (vente d'une machine) et comme une biotech (vente d'un produit biologique). Dans le cas d'une utilisation clinique, le produit biologique bioimprimé est obtenu à partir de cellules prélevées chez le patient (on parle dans ce cas de greffes autologues à la différence des greffes allogéniques faisant intervenir un donneur et un receveur distincts) puis cultivées pour assurer leur reproduction et leur réorganisation dans le cadre fourni par le protocole de bioimpression.

Les cellules prélevées sont manipulées et mélangées à des matériaux spécifiques de sorte à constituer une bioencres (liquide). La bioencres est ensuite déposée sur une surface, appelée cartouche, en-dessous de laquelle est transmise une impulsion laser pour éjecter des petits amas de cellules (de quelques cellules à quelques dizaines de cellules par amas dans le cas général) et les déposer sur une plaque disposée au-dessus. L'impression assistée par laser a lieu dans le sens bas → haut. Si le sens de dépôt de la bioencres sur le substrat n'est pas à première vue le plus naturel, plusieurs arguments le justifient. Dans le cas contraire où la bioencres serait disposée à l'envers, des phénomènes de ménisque et de sédimentation apparaissent, limitant la taille des objets organiques imprimés et ne garantissant pas un film d'épaisseur constante sur la cartouche. Cette spécificité dans le sens d'impression permet aussi d'assurer que les gouttes de bioencres éjectées arrivent avec une énergie cinétique très faible voire nulle au niveau du substrat, ce qui diminue les risques de dégradation du matériel biologique.

Pour réaliser l'impression par laser sans dommage sur les cellules vivantes, la solution fait intervenir une couche d'or sacrificielle déposée sur la cartouche réceptrice de la bioencres. Cette très fine couche d'or est nécessaire à l'éjection des amas de cellules par un phénomène de plasma qui permet d'initier le processus de création de la bulle de cavitation, nécessaire au développement du jet de la goutte qui se déposera sur le substrat. La cartouche a été conçue pour assurer un étalement

homogène de la bioencre, afin de limiter la variabilité des manipulations réalisées par une main humaine. En revanche, à chaque impulsion laser, une zone d'or de la couche est ablatée, ce qui limite le nombre d'utilisations de la cartouche et engendre des manipulations dans l'enceinte de la bioimprimante.

Le dépôt des différentes couches d'impression est défini par un protocole réalisé par un ordinateur (on parle de conception assistée par ordinateur), tout en prenant en considération les phases de maturation des cellules entre les dépôts successifs de couches cellulaires. Le protocole d'impression spécifie des motifs d'impression pour positionner les cellules à des endroits précis, de façon à optimiser leur écartement. Le but est qu'elles puissent former une couche homogène après leur multiplication (pour certains tissus). Plusieurs impressions successives sont réalisées pour reconstituer les couches du tissu ; en l'occurrence pour la peau, il s'agit de fabriquer un derme et une première couche de kératinocytes qui permettront de recréer un épiderme. Entre chacune des étapes, les cellules se développent et s'organisent dans un incubateur, ce qui nécessite plusieurs jours pour obtenir une peau bioimprimée.

Ces quelques éléments techniques, illustrés par la Figure 23, permettent de saisir toute la complexité de la technologie développée par Poietis. Les défis techniques restent nombreux, et portent à la fois sur le protocole d'impression, le matériel biologique à imprimer, la bioimprimante elle-même.

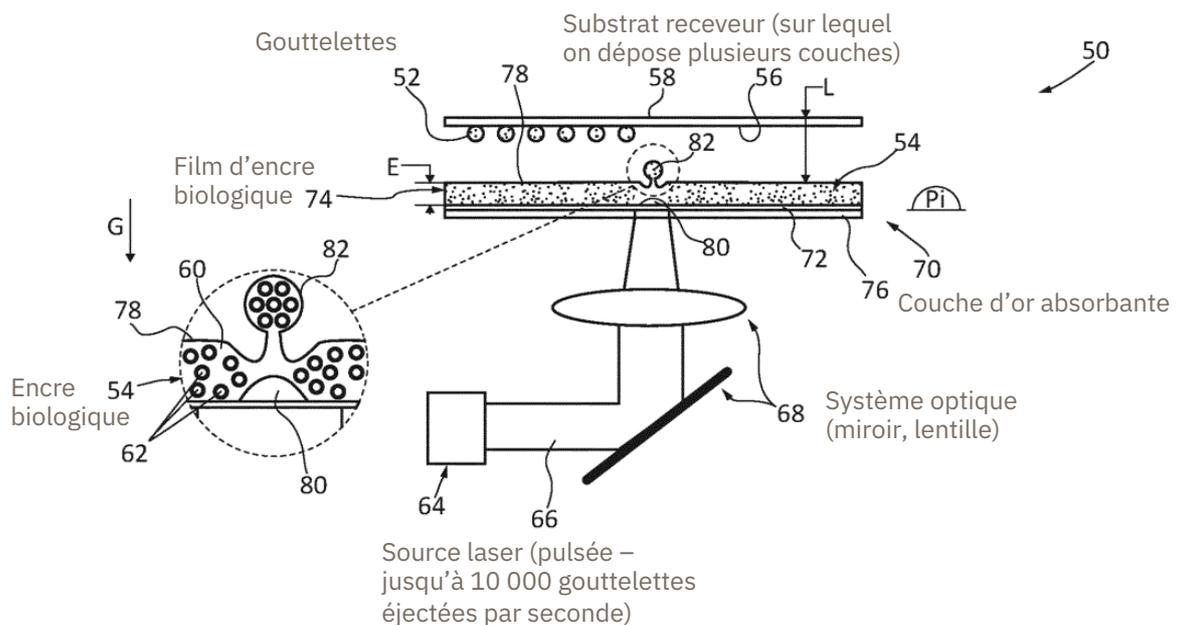


Figure 23. Représentation schématique d'un dispositif d'impression par laser illustrant l'invention portée par le brevet intitulé « Procédé d'impression d'éléments biologiques par laser et dispositif pour sa mise en œuvre »

Source : demande de brevet n°FR3030361 publiée le 24/06/2016, avec explicitation partielle des légendes des composants du système par nos soins

Au sujet du matériel biologique, une précision peut être apportée quant à l'intérêt porté sur la peau ; une photographie d'une peau bioimprimée par Poietis est proposée dans la Figure 24. Par rapport à d'autres tissus ou organes, la réglementation autour de la peau existe et les protocoles pour les essais cliniques sont définis par les instances de régulation ; ce qui constitue déjà un premier

argument en sa faveur. Alors que les premières recherches de l'INSERM sur la bioimpression étaient dédiées aux cellules osseuses, il a très rapidement été décidé de centrer les efforts sur la bioimpression de peau. Cela a notamment été motivé par la petite taille du marché de la réparation osseuse à partir de la bioimpression : en effet, des solutions alternatives à base de biomatériaux se substituant à l'os existent et garantissent un très bon rapport entre le coût de la technologie et les résultats obtenus. À l'inverse, le marché lié aux greffes de peau est avéré, puisque l'on fait déjà des greffes autologues de peau sur les grands brûlés ou dans le cas de maladies chroniques avec pour limite principale le besoin de prélever une surface quasiment aussi importante que l'emplacement de la greffe. Des réflexions ont par ailleurs été menées concernant la cornée, pour laquelle les besoins cliniques sont avérés. Néanmoins, la peau offre plus d'applications à court-terme, en dehors des contraintes cliniques, comme les activités dans l'industrie de la dermo-cosmétique. Les interdictions de 2013 concernant la mise sur le marché européen de produits testés sur animaux favorisent l'émergence de méthodes alternatives performantes, ce qui est un atout pour le développement de la solution de bioimpression.

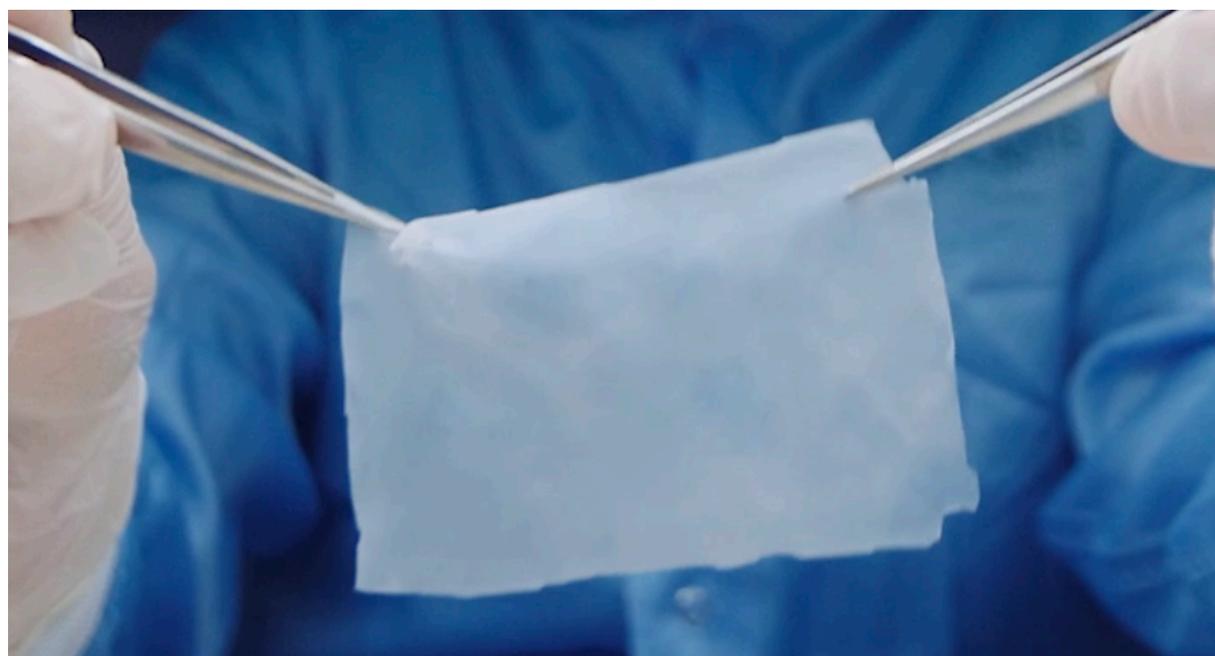


Figure 24. Peau formée par un derme et un épiderme et obtenue par un protocole de bioimpression par laser réalisé par la startup Poietis, dont la taille ne dépasse pas 40 cm²

Source : © Poietis

3.1.3. Stratégie de propriété industrielle et analyse du paysage concurrentiel

La stratégie de protection de la propriété industrielle a toujours été au cœur des préoccupations des dirigeants de Poietis, avant même la création de la startup. Trois brevets avaient déjà été licenciés à l'entreprise en tant que spin-off de l'INSERM et de l'Université de Bordeaux, assurant ainsi à Poietis une position forte dans le champ de la bioimpression. Le portefeuille de brevets s'est depuis considérablement développé, la startup cherchant à protéger systématiquement les nœuds technologiques stratégiques : Poietis disposait en 2022 d'une douzaine de familles de brevets, ce qui représente une soixantaine de brevets déposés, plaçant dès lors la startup parmi les

plus importants déposants mondiaux dans le champ de la bioimpression, aux côtés d'entreprises comme Cellink (Suède), Organovo (États-Unis), Cyfuse (Japon), ou encore Advanced Solutions (États-Unis). Au cours de la dernière décennie, les progrès en bioimpression ont été fulgurants, comme en témoigne l'augmentation exponentielle du nombre de brevets et de publications récapitulée dans la Figure 22 (section 3.1.1) ; les brevets déposés dans ce champ protègent de plus en plus des applications de la bioimpression, plutôt que les procédés de bioimpression eux-mêmes. Le nombre d'acteurs maîtrisant la technologie de bioimpression par laser reste tout de même très réduit.

En effet, plusieurs stratégies de bioimpression existent et leur pertinence varie selon les tissus fabriqués et les objectifs recherchés. Les concurrents de Poietis se positionnent majoritairement sur des technologies de bioextrusion qui consistent en un dépôt de cellules et de gel (composé de biomatériaux pour le support des cellules) par une aiguille. L'inconvénient majeur de cette technique réside dans la faible viabilité cellulaire engendrée : le passage des cellules dans l'aiguille (qui joue le rôle d'un entonnoir) les stresse et les comprime, elles sont alors significativement moins nombreuses à survivre. De plus, la résolution de ce type d'impression est moyenne (plusieurs centaines de micromètres) quand la technologie laser permet d'atteindre 10 μm , pour la même concentration de cellules dans la bioencre (100 millions/mL en l'occurrence). La technologie LAB assure de nos jours la meilleure résolution, jusqu'à aller à l'impression à la cellule unique, tout en garantissant un taux de viabilité cellulaire autour de 90 %. D'autres solutions d'impressions à buses cohabitent : l'impression par microvannes et l'impression jet d'encre. Le Tableau 26 récapitule les solutions de bioimpression ainsi que leurs caractéristiques principales, à savoir la quantité de cellules déposées et la résolution.

Tableau 26. Caractérisation des solutions de bioimpression selon les critères de densité cellulaire et de régulation

	Bioextrusion	Impression par microvannes	Impression jet d'encre	Bioimpression par laser (LAB)
Densité cellulaire	100 M de cellules / mL	~ M de cellules / mL	< 10 M de cellules / mL	100 M de cellules / mL
Résolution	~ mm	100 μm	10 μm	10 μm

3.2. La construction progressive d'un modèle d'affaires pérenne jusqu'à une phase de scale-up avérée

3.2.1. Des modèles d'affaires successifs à la commercialisation de deux bioimprimantes

Les premières sources de chiffre d'affaires ont été la vente de contrats de recherche et développement avec des industriels de la dermo-cosmétique. Ces contrats ont permis de contribuer au financement du développement des premières versions de la bioimprimante tout en testant la technologie d'impression, à terme, sur plus d'une trentaine de types cellulaires. Le premier produit conçu et vendu par l'entreprise est un modèle de peau bioimprimée, dénommé Poieskin, pour tester

des produits cosmétiques auprès d'industriels. Le produit vendu faisait moins d'un centimètre carré (ayant la forme d'une pièce de monnaie). Cependant, les prix que les industriels étaient prêts à payer sont restés trop faibles pour assurer la rentabilité du produit.

Poietis, forte de son expérience en conception de machines, acquise au fur et à mesure des développements, a fait le choix de poursuivre dans cette voie en développant une première bioimprimante dédiée à une utilisation pour la recherche (appelée NGB-R, pour *Next Generation Bioprinting for Research*) et une seconde pour le monde clinique (NGB-C). Plusieurs stratégies de pénétration du marché ont pu être discutées et mises en regard des stratégies nationale et européenne dans le domaine de la médecine régénérative et des médicaments de thérapie innovante (MTI).

Le modèle économique retenu est un modèle décentralisé : l'objectif réside dans la capacité des centres de thérapie cellulaire à s'équiper avec la bioimprimante NGB-C afin qu'ils réalisent sur place la production des tissus pour des greffes autologues, sinon bien trop complexes sur le plan logistique. L'atout majeur est alors de pouvoir réaliser le processus de bioimpression dans sa totalité au plus près du patient, augmentant ainsi les chances que le tissu vivant bioimprimé soit viable. Avec ce modèle d'affaires pour la solution clinique, le développement de la solution recherche a aussi été élaboré pour donner la capacité aux laboratoires de recherche eux-mêmes de fabriquer leurs tissus bioimprimés, de faire évoluer les protocoles et d'en créer de nouveaux.

Le Tableau 27 résume les différents produits testés par Poietis et leurs modèles d'affaires associés. Il faut noter qu'à chaque modèle d'affaires peut correspondre une ou plusieurs bioimprimantes et qu'une même bioimprimante peut avoir été utilisée pour réaliser plusieurs modèles d'affaires, qui ne se sont pas forcément succédé dans le temps mais qui ont pu cohabiter simultanément.

La première version de la NGB-R est sortie en 2019 puis elle a été suivie de la NGB-C, installée en novembre 2021 au sein du Laboratoire de culture et de thérapie cellulaire (LCTC) de l'Hôpital de la Conception de l'Assistance Publique – Hôpitaux de Marseille (AP-HM). Cette première collaboration dans le cadre clinique est motivée par la nécessité de qualifier le tissu bioimprimé comme MTI par l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM). Pour Poietis, la mise en place de ce partenariat n'est pas anodine compte-tenu de l'expertise de l'Hôpital de la Conception de l'AP-HM sur les essais cliniques de phase précoce, en particulier dans le cas de la fabrication d'épidermes destinés aux grands brûlés. L'apport majeur de la technologie de Poietis pour le LCTC réside dans la capacité à fabriquer une peau totale, c'est-à-dire constituée d'un derme et d'un épiderme.

La conception simultanée de deux bioimprimantes NGB-R et NGB-C, dont les photographies sont présentées sur les Figure 25 et Figure 26, se justifie d'abord par la spécificité forte des contextes d'utilisation de ces instruments ainsi que par la variété des objectifs des utilisateurs. Il faut en effet noter que ce sont deux populations différentes qui manipulent les bioimprimantes. L'une est constituée de chercheurs, potentiellement dans plusieurs domaines, pour lesquels la bioimprimante sera un outil d'expérimentations (sur les protocoles de bioimpression, sur les matériaux pour fabriquer les bioencres ou les substrats, sur les types de cellules pouvant être bioimprimées, etc.). L'autre est composée de praticiens (médecins, biologistes,

techniciens de laboratoire) qui exécutent un protocole d'impression après avoir fabriqué la bioencres à partir des cellules prélevées chez le patient.

La difficulté principale relative au développement d'une solution clinique est de rendre la machine, sa conception et ses fonctionnalités compatibles avec les exigences de fabrication de médicaments, ce qui se traduit en termes de stérilité du produit, de reproductibilité du procédé ou encore de traçabilité des matières premières. Ces conditions de fabrication sont réglementées par la Commission européenne dans le but de fournir une assurance de la qualité du produit, en l'occurrence un MTI. Elles sont dénommées GMP, pour *Good Manufacturing Practice*. Afin de limiter tout risque de contamination du tissu bioimprimé, qui ne peut pas être stérilisé sans tuer les cellules qui le composent, le protocole pour la bioimpression doit être automatisé au maximum. Cette condition n'est pas nécessaire dans le cas de la solution recherche puisque les tissus produits ne seront pas implantés sur des patients, mais serviront par exemple dans la recherche en biologie fondamentale à réaliser des tests de toxicité de candidats médicaments ou d'ingrédients pour la cosmétique. Pour permettre une plus grande flexibilité dans l'utilisation, plusieurs actions restent manuelles dans la NGB-R.

Enfin, les deux bioimprimantes se distinguent par leur capacité à réaliser un ou plusieurs protocoles. Les procédures pour la validation d'un MTI par l'ANSM étant longues et complexes, seul le protocole de fabrication de peau est en cours de validation. La NGB-C est donc spécifique à un unique protocole. À l'inverse, la NGB-R permet aux chercheurs de tester plusieurs protocoles et d'en créer de nouveaux. Les paramètres de fonctionnement sont donc utilisables sur une large gamme, et des modules d'impression peuvent être rajoutés. Ainsi, plusieurs techniques de bioimpression sont disponibles sur la NGB-R, comme la Figure 27 l'illustre.

D'autres arguments peuvent aussi être évoqués pour justifier le développement simultané des bioimprimantes NGB-C et NGB-R et leur maintien dans la durée. Les inconnus relatifs au marché clinique sont particulièrement importants et sont dépendants des choix stratégiques des politiques nationales. Dans le cas où les gouvernements soutiennent des politiques d'implantation d'usines dans ce secteur, ce n'est plus la médecine personnalisée au plus près du patient qui est mise sur le devant de la scène. À l'inverse, certaines politiques soutiennent le développement de centres de fabrication de MTI au sein même des hôpitaux, pour lesquels la solution de bioimpression de Poietis est adaptée. La pandémie de la Covid-19 a également eu des répercussions sur le marché clinique, pour lequel les dispositifs de financement ont été plus importants sur la période. Le double positionnement permet de gagner en résilience. De même, les inconnus technologiques relatifs à l'automatisation des protocoles de bioimpression, pour un usage clinique des tissus bioimprimés, sont suffisamment importants pour ne pas garantir a priori la réalisation future d'une bioimprimante. Face à la situation de double inconnu plus marquée encore dans le cas clinique, la bioimprimante NGB-R peut au moins être considérée comme une solution de secours. Enfin, conformément à l'article 2 des statuts de la société, présenté dans la section 3.1.1, il est bien évoqué à la fois des fins de recherche et un usage médical des produits.

Tableau 27. Les différents modèles d'affaires mis en place par Poietis avec leurs usages (recherche ou clinique), les dénominations des bioimprimantes et leurs descriptifs

Prototypes de la bioimprimante pour premières preuves de concept (internes)	Contrats de recherche et développement avec industriels de la dermo-cosmétique	Vente d'un tissu bioimprimé (<1 cm²) à des industriels	Vente de bioimprimantes NGB-R (industriels et laboratoires)	Première bioimprimante clinique : NGB-C (Marseille)	Ventes de bioimprimantes NGB-R et NGB-C
Recherche	Recherche	Recherche	Recherche	Clinique	Recherche & Clinique
V1 (INSERM, 2007) V2 (2013) V2.1	V2.1 NGB (17.03 – jusqu'en 2018) NGB-R (2018-2020)	V2.1 NGB (17.03 – jusqu'en 2018)	NGB-R (2018-2020)	NGB-C 2021-2022 : conception et mise en service 2023 : utilisation par l'AP-HM	2022 : développement 2023 : ventes
Premières impressions de tissus, fonctionnement manuel, preuve de la reproductibilité du processus	Utilisation pour tester des lasers, pour des tests paramétriques, plusieurs types cellulaires imprimés	1 ^{er} modèle de Poieskin : petit format (<1cm ²) Tests de nouvelles fonctions, tests paramétriques	Modifications mécaniques, bioimprimante finalement utilisée pour la recherche en interne (pas de vente à cause du Covid)	Bioimprimante qualifiée pour un usage clinique, modifications principales au niveau du logiciel	Intégration de développements de la NGB-C (Marseille) sur la NGB-R, modularisation des bioimprimantes



Figure 25. Bioimprimante NGB-C installée en novembre 2021 pour démarrer la première phase des tests cliniques à l'Hôpital de la Conception – AP-HM

Source : <https://poietis.com/poietis-and-assistance-publique-hopitaux-de-marseille-ap-hm-annonce-the-first-installation-of-a-3d-bioprinting-platform-for-manufacturing-implantable-biological-tissues-in-hospitals/>



Figure 26. Bioimprimante NGB-R, version 2023

Source : https://www.linkedin.com/posts/poietis_bioprinting-tissueengineering-frenchtech-activity-7074346184294686720-s5xE?utm_source=share&utm_medium=member_desktop

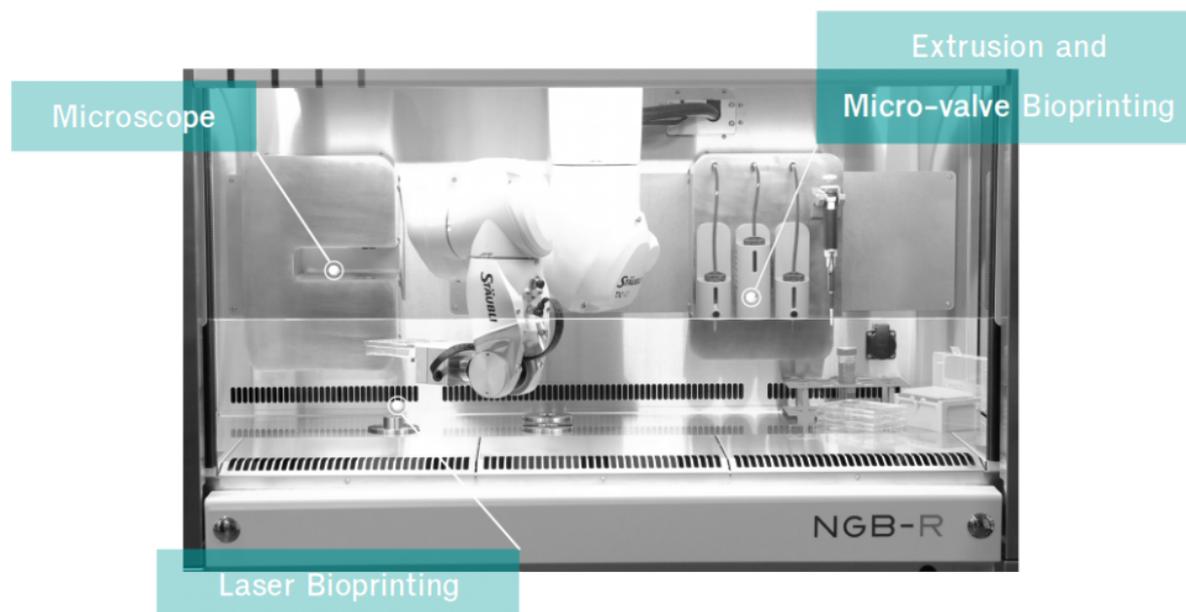


Figure 27. Détail des modules principaux de la bioimprimante NGB-R

Source : © Poietis

3.2.2. Le démarrage d'une phase de scale-up avec la conception et la commercialisation de deux produits simultanément

Au début de la recherche-intervention, Poietis entre dans sa phase de scale-up. On retrouve bien les indices d'un démarrage du scale-up proposé dans le Tableau 7 au chapitre 2. Dès 2015, Poietis a réalisé une première levée de fonds de 2,5 millions d'euros, dont une partie sous la forme d'un crowdfunding. Une seconde a été réalisée en 2018 pour un montant levé de 5 millions d'euros, dont une partie était encore issue d'un crowdfunding. Ce n'est pas tant le montant des fonds levés qu'il faut souligner, mais plutôt le choix du crowdfunding, qui n'est pas une forme privilégiée par les entreprises technologiques habituellement. Poietis ne se démarque donc pas par le montant des levées de fonds, en revanche, c'est son carnet de commandes en 2022 et en 2023 qui est un indicateur fiable des financements recherchés et prévus. En outre, depuis sa création, plusieurs contrats de recherche et développement ont été signés avec des industriels. Poietis a ainsi mené des travaux en collaboration avec L'Oréal sur les follicules pileux, avec Servier pour l'évaluation de la toxicité hépatique de candidats médicaments, avec BASF sur le modèle de peau, avec URGO sur le pansement actif ou encore avec Sederma sur les glandes sébacées. Poietis a également intégré plusieurs programmes de recherche européens autour des cellules pancréatiques, des cellules neuronales pour le traitement de maladie neurologiques ou du cartilage par exemple ; ces programmes pouvant aussi intégrer des hôpitaux dans un objectif clinique. Ces différentes collaborations ont ainsi amené Poietis à tester la bioimprimante dans des situations de recherche variées. Enfin, en 2012, avant même la création juridique de la société, le projet de bioimpression par laser avait remporté un prix i-Lab dans la catégorie émergence ; ce prix a ensuite été suivi d'un second en 2014 dans la catégorie création-développement. En 2016 et en 2017, Poietis a été lauréate du World Innovation Challenge (phases I et II), puis en 2018 du EY Disruptive Strategy Award. Ces prix sont une reconnaissance externe du potentiel porté par l'entreprise.

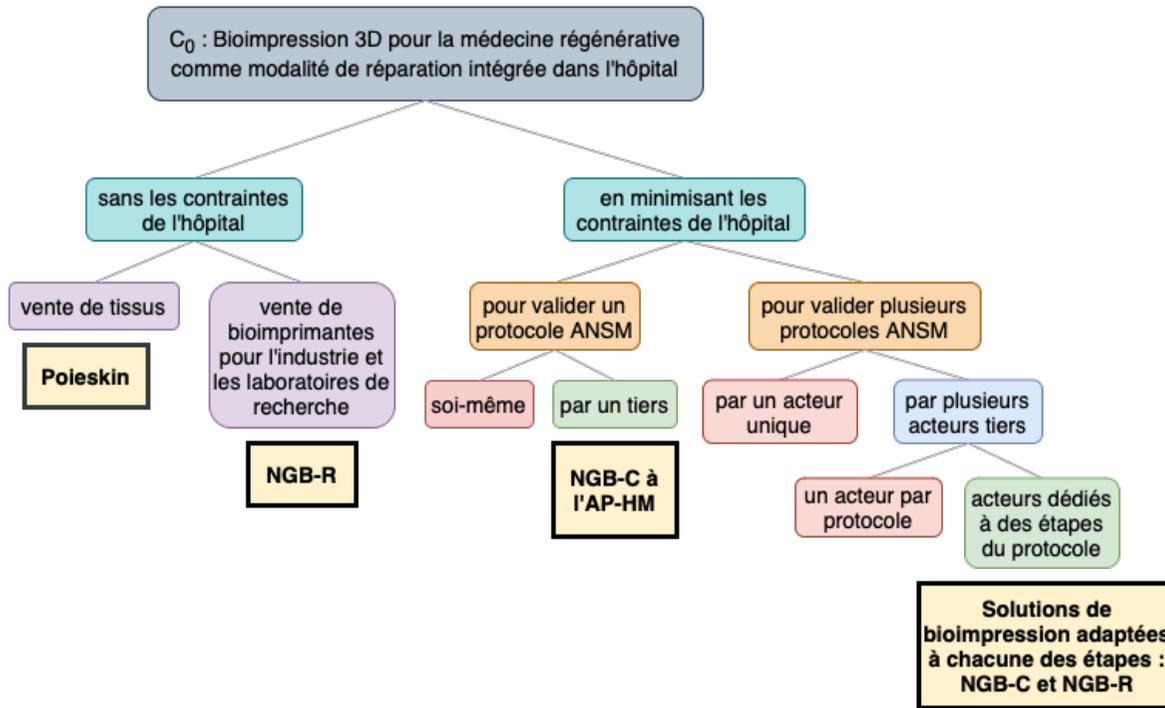
En sus de ces indices du démarrage du scale-up, des indicateurs plus classiques sont aussi vérifiés. Compte-tenu du carnet de commandes développé en 2022 et des livraisons de bioimprimantes en 2023, le chiffre d'affaires de Poietis est en très nette augmentation en 2023. Le nombre de collaborateurs se stabilise entre 2022 et 2023 autour de 25 personnes. En outre, le Tableau 27 présenté dans la section précédente rend compte des évolutions du modèle d'affaires de Poietis, laissant sous-entendre que plusieurs MVP ont été réalisés en préfiguration de la phase de scale-up, conformément à la méthodologie du *Lean Startup*. Alors que la cadence de la production doit augmenter pour honorer le carnet de commandes, on peut légitimement s'étonner que l'entreprise choisisse de concevoir, produire et livrer simultanément deux bioimprimantes différentes. C'est d'ailleurs un des éléments qui freine la recherche de fonds, alors que les startups ont très largement recours aux levées de fonds pour passer à l'échelle.

En effet, en fonction des investisseurs, Poietis se situe entre une biotech (même si la typologie est surtout définie relativement au développement de molécules) et une medtech (c'est-à-dire une entreprise de dispositifs médicaux) ; tout en restant soumise à de longs temps d'accès au marché. Si les premiers investisseurs, au profil de *business angels* après une carrière dans l'industrie, n'étaient pas rebutés par le caractère générique de la proposition de valeur, la deuxième étape de financement s'est avérée plus complexe. Dans la mesure où cette deuxième étape coïncide avec le démarrage d'une phase de scale-up, réputée par les difficultés de gestion qu'elle entraîne, il s'agit alors de savoir comment convaincre les investisseurs de l'intérêt de la proposition de valeur basée sur la généralité de la technologie.

3.2.3. Le positionnement stratégique du couple formé par les deux bioimprimantes

Nous proposons une première justification de la pertinence de la commercialisation simultanée de deux bioimprimantes à partir d'une modélisation du raisonnement qui y conduit par la théorie C-K. La Figure 28 suivante explicite les différentes voies de conception possibles à partir d'un inconnu désirable (C_0) formulé à partir des travaux menés à l'INSERM puis au sein de la jeune entreprise Poietis, à savoir : « Bioimpression 3D pour la médecine régénérative comme modalité de réparation intégrée dans l'hôpital ».

ESPACE DES CONCEPTS



ESPACE DES CONNAISSANCES

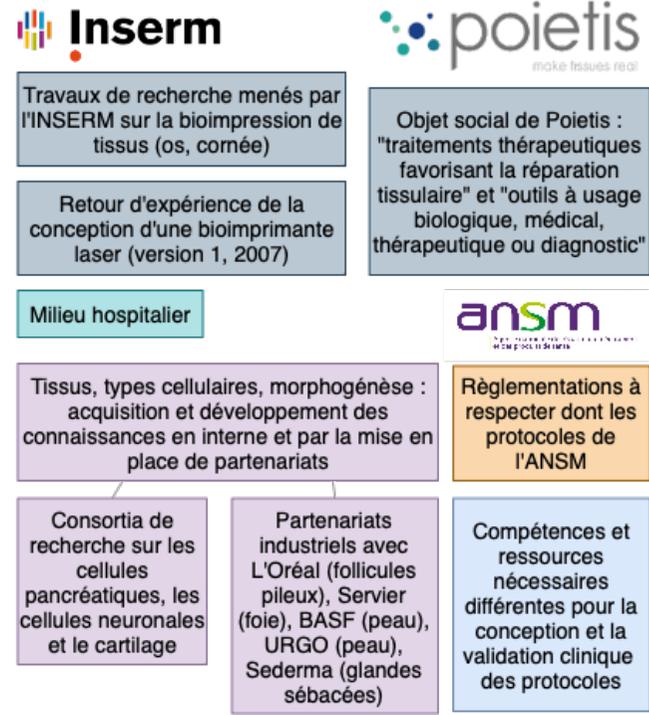


Figure 28. Modélisation du raisonnement de conception par la théorie C-K conduisant à la prise en considération de la valeur de la conception simultanée des bioimprimantes NGB-C et NGB-R

Lecture de la figure : à chaque nouvelle étape dans le parcours des branches de l'espace des concepts correspond un ou plusieurs éléments dans l'espace des connaissances, qui précède la formulation apparue dans l'espace des concepts. La correspondance est mise en évidence par un jeu de couleurs, toutes sont à prendre en compte sauf le rouge, le vert et le jaune, correspondant respectivement aux impasses dans le raisonnement, aux voies de conception empruntées et aux solutions détaillées qui intègrent dès lors l'espace des connaissances.

Plusieurs voies de conception ont été empruntées par Poietis, qui a d'abord cherché à s'émanciper des contraintes liées au milieu hospitalier (dont l'automatisation pour garantir l'asepsie du tissu bioimprimé et la reproductibilité du protocole) en fournissant des solutions de bioimpression aux industriels et aux laboratoires de recherche pour une contribution indirecte à l'intégration de la solution au sein de l'hôpital. Puis l'acquisition de connaissances et de compétences relatives au déploiement dans le milieu hospitalier, c'est-à-dire au respect des réglementations de l'ANSM, a permis à Poietis de concevoir des protocoles adaptés et de faire un choix de positionnement dans la chaîne d'acteurs pour la validation de ces protocoles. Ainsi, la voie de conception qui consistait pour Poietis à valider seul le protocole ANSM était trop coûteuse (par exemple la nécessité de procéder aux manipulations dans une salle blanche de classe A pour valider les essais cliniques indique déjà le niveau élevé des contraintes réglementaires conduisant à la recherche d'un partenaire, trouvé au sein de l'AP-HM). En outre, pour tirer pleinement parti de la capacité de la technologie de Poietis à réaliser des tissus biologiques variés, il s'agit de faire valider autant de protocoles par l'ANSM. Compte-tenu des durées de validation et de déploiement, l'intérêt social va dans le sens d'une multiplicité d'acteurs positionnés sur des protocoles différents, et plus précisément à des étapes différentes des protocoles pour garantir à Poietis un positionnement stratégique sur un maximum de protocoles. On atteint alors une voie de conception conduisant à fournir un couple de solutions utiles à des étapes différentes de la validation des protocoles de l'ANSM.

3.3. Poietis, l'archétype de la startup deeptech

Il reste à justifier le caractère deeptech de Poietis pour fournir une garantie supplémentaire de la pertinence de ce cas d'étude vis-à-vis de la question de recherche soulevée, à savoir : **comment le gain en fonctionnalités et en généricité peut-il être garanti par une startup deeptech en phase de scale-up ?**

En plus d'être une startup considérée comme deeptech par Bpifrance (sa présence dans l'observatoire des startups deeptech l'attestant⁴⁷), on retrouve dans le cas de Poietis les caractéristiques des startups deeptech présentées dans le Tableau 1 au chapitre 1 réalisé à partir de la revue de la littérature comparée entre les différents types d'entreprises technologiques. Une brève synthèse des paragraphes précédents mis en rapport avec la liste des caractéristiques du Tableau 1 permet de vérifier le caractère deeptech de Poietis :

- La startup ayant été créée en 2014 et n'ayant pas dépassé la cinquantaine de collaborateurs depuis sa création, sa croissance est bien limitée. Ayant poursuivi son activité jusqu'à présent, elle fait partie des startups ayant perduré plus longtemps que la moyenne.
- 9 ans après sa création, Poietis passe à l'échelle, démontrant ainsi un bon taux de survie, en comparaison avec l'âge moyen des entreprises innovantes qui se situe autour de 3,5 ans⁴⁸.

⁴⁷ Le lecteur est invité à vérifier l'information sur la page dédiée : <https://observatoire.lesdeeptech.fr/companies/poietis>

⁴⁸ Cette donnée est tirée d'une étude de l'INSEE sur la population des entreprises innovantes françaises en 2018 : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5896782?sommaire=5759063>

- À défaut d'avoir réalisé plusieurs levées de fonds significatives, les choix stratégiques se sont orientés vers la recherche de clients pour augmenter le chiffre d'affaires ; sans pour autant négliger la levée de fonds comme levier de financement puisque 7,5 millions d'euros ont été levés.
- Les premiers clients du carnet de commandes de Poietis sont européens, témoignant ainsi de l'internationalisation précoce du marché.
- Les ventes de bioimprimantes ont décollé à partir de 2022, soit 8 ans après la création de l'entreprise, mettant en évidence à la fois le long temps de pénétration du marché, ainsi que l'effort de R&D à fournir pour concevoir le produit, qui se répercute sur les besoins en financement.
- Le récapitulatif des modèles d'affaires de Poietis décrit dans la section 3.2.1 montre à la fois les incertitudes auxquelles Poietis a été soumise tout au long de son développement, ainsi que la difficulté à réaliser des validations successives des MVP (conformément à la méthodologie du *Lean Startup*), différents modèles d'affaires ayant pu exister en même temps.
- La technologie de bioimpression par laser mise sur le marché par Poietis provient directement des premiers travaux de recherche menés par l'INSERM dans les années 2000 au sein de l'équipe de recherche dirigée par Fabien Guillemot, devenu cofondateur de la startup : il s'agit bien, à l'origine, d'un transfert de technologie entre le monde académique et l'industrie. Cette proximité avec le monde de la recherche est toujours d'actualité au sein de Poietis, les travaux de R&D menés dans le cadre de projets européens de recherche en étant une parfaite illustration.
- L'objet social de Poietis, retranscrit dans la section 3.1.1, met en évidence la recherche d'impact positif par les dirigeants à travers le développement d'une solution de médecine régénérative à destination de patients nécessitant le remplacement de tissus biologiques et à destination des chercheurs pour le développement de nouvelles thérapies. En outre, les collaborations effectuées avec des industriels de la dermo-cosmétique ont aussi souligné l'intérêt des technologies de bioimpression pour la fabrication de tissus utiles aux tests de nouvelles substances (notamment en vue de remplacer les tests sur des animaux).
- Avec plus de 60 brevets déposés, la propriété industrielle a toujours été au cœur des choix stratégiques de la startup.

La startup Poietis est donc un cas archétypal d'une startup deeptech en phase de scale-up. En somme, l'existence de deux bioimprimantes aux caractéristiques proches sans être identiques laisse présager le déploiement d'une stratégie de conception de plateforme. Compte-tenu des critères soulevés dans la première partie de ce chapitre pour la conception et l'évolution des plateformes, nous cherchons dans la suite à déterminer comment Poietis gère l'expansion fonctionnelle au niveau de la plateforme formée par les deux bioimprimantes et la généricité du cœur technique de la plateforme.

4. Une stratégie élaborée de conception d'une plateforme par Poietis

Les caractéristiques principales des deux bioimprimantes sont récapitulées comme suit :

- La NGB-C (clinique) est utilisée par des praticiens pour réaliser un protocole unique automatisé et reproductible en garantissant l'asepsie du produit final greffé.
- La NGB-R (recherche) est utilisée manuellement par des chercheurs sur des larges gammes de paramètres pour explorer et concevoir plusieurs protocoles et applications.

Face à l'éventail des objectifs à atteindre, il s'agit déjà de démontrer la pertinence d'un modèle de plateforme pour caractériser les problèmes de gestion auxquels Poietis est confrontée en tant que startup deeptech en phase de scale-up.

4.1. Caractérisation de la solution de bioimpression conçue par Poietis sous la forme d'une plateforme

Nous élaborons un modèle des activités menées par Poietis en s'inspirant de deux scénarii. Le premier repose sur une conception indépendante des deux bioimprimantes et le second définit une plateforme commune aux deux bioimprimantes. Les données récoltées et analysées dans le cadre de la recherche-intervention nous amènent à proposer une troisième modélisation qui est compatible avec la faible connaissance que Poietis a de la plateforme.

Une première hypothèse simple consisterait à considérer séparément les deux produits de Poietis : la NGB-C d'un côté et la NGB-R de l'autre, conçues indépendamment au sein de la même startup et partageant « par hasard » des fonctionnalités et des paramètres communs. En réutilisant le langage de la conception axiomatique proposé par Suh (1998), on peut exprimer chacune des bioimprimantes à partir d'une matrice représentant les fonctionnalités réalisées (FR) et des paramètres de conception développés (DP). Dans le cas d'une conception totalement indépendante, on pourrait définir une partie commune aux deux bioimprimantes, appelée cœur commun, qui serait a priori assez réduit, et un ensemble de couples FR-DP relatifs aux modules propres des bioimprimantes, sans qu'il n'y ait de contraintes particulières sur les couplages ou les indépendances entre ces modules (puisque nous nous plaçons dans l'hypothèse d'une conception indépendante des deux bioimprimantes). Cette stratégie de conception est schématisée à travers la Figure 29. La connaissance du cœur commun, même réduit, est déjà problématique car elle ne reflète pas la difficulté que Poietis rencontre à déterminer un langage générique de description des deux bioimprimantes. En outre, cette première tentative de modélisation ne présente pas d'intérêt stratégique pour l'entreprise (puisque'il s'agit de fournir deux fois le même travail en parallèle) et n'est pas suffisamment fidèle à la réalité observée pour que nous la considérions. Les fortes contraintes, ne serait-ce qu'économiques, qui pèsent sur une startup deeptech ne permettent en effet pas ce surcroît d'efforts. Ainsi les bioimprimantes NGB-C et NGB-R ne peuvent pas être considérées indépendamment l'une de l'autre.

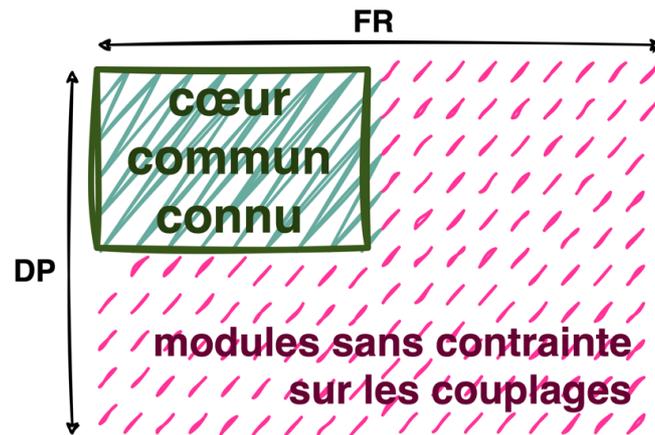


Figure 29. Stratégie invalidée d'une conception indépendante de deux bioimprimantes et représentation agrégée sous la forme d'une matrice de Suh

Le cas de la conception d'une plateforme peut constituer une deuxième hypothèse. La revue de la littérature a notamment mis en évidence que l'architecture d'une plateforme, contrôlée par le propriétaire de la plateforme, est basée sur un cœur technique auquel des modules appartenant à un autre type d'acteurs, les complémenteurs, peuvent s'adjoindre. L'enjeu pour le propriétaire, qui cherche à maîtriser l'écosystème de la plateforme et son évolution, est de s'assurer que les modules des complémenteurs soient toujours couplés au cœur technique. Dans le cas de Poietis, les complémenteurs sont définis vis-à-vis des bioimprimantes NGB-C et NGB-R respectivement, qui sont les points d'entrée pour accéder à la technologie. Dans un souci de simplification, on pourra considérer que les bioimprimantes NGB-C et NGB-R jouent le rôle de complémenteurs fournissant des modules indépendants qui, intégrés avec le cœur technique, génèrent des solutions qui leur sont propres ; le cœur technique, c'est-à-dire ce qui joue le rôle de plateforme dans cette modélisation, peut correspondre à la technologie NGB développée par Poietis. Nous nous référons aux travaux de Legrand et al. (2017) pour élaborer la modélisation simplifiée de cette deuxième stratégie, présentée dans la Figure 30.

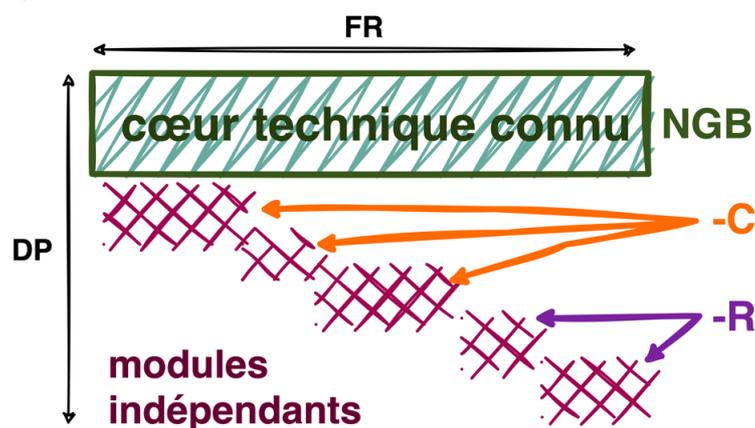


Figure 30. Stratégie de conception d'une plateforme et positionnement des deux complémenteurs (NGB-C et NGB-R) sous la forme d'une matrice de Suh, d'après Legrand et al. (2017)

Si cette deuxième tentative de modélisation a été validée sur des plateformes existantes, on se rend compte à partir du travail de recherche réalisé auprès de Poietis qu'elle ne correspond pas à la réalité que connaît l'entreprise face à cette plateforme en construction. La différence majeure que l'on voit apparaître dans l'étude menée avec Poietis porte sur le cœur technique : **pour Poietis, il n'est pas possible de définir a priori ce qui est dans le cœur technique**. Il est en effet apparu que les éléments du cœur technique sur lequel l'entreprise s'appuie pour développer sa plateforme sont sans cesse remis en question. Autrement dit, on peut considérer que le cœur technique est inconnu et que la distinction entre les éléments du cœur technique et les parties modulaires n'est pas figée. L'acceptation que l'on fait de la plateforme est alors plus large que dans le cas précédent où elle était réduite au cœur technique. On cherche à contenir dans la plateforme l'ensemble des instanciations possibles. En effet, Poietis n'a pas développé deux familles de produits mais deux bioimprimantes en vue d'usages particuliers et à partir desquelles il s'agit de déterminer une stratégie d'organisation des interdépendances. À ce sujet, l'indépendance des modules, vus comme des éléments différenciants entre les deux bioimprimantes, laisse entendre un découplage, ce qui n'est pas connu de Poietis. L'étude approfondie des questionnements autour des modules propres montre que certains modules peuvent intégrer le cœur technique, à travers la mise en commun d'un paramètre de conception par exemple. Il ne faut donc pas exclure les cas où les modules sont couplés. Par ailleurs, le fait de considérer les bioimprimantes NGB-C et NGB-R comme des complémenteurs alors qu'elles sont définies et conçues par Poietis, permet de voir l'ajout de nouvelles fonctionnalités comme un espace où la modularité est envisageable : Poietis n'a pas à se prémunir du risque de renversement de plateforme, au sens de M. Thomas et al. (2021), vis-à-vis de ses deux bioimprimantes. En revanche, face à la dynamique d'expansion fonctionnelle, la question se pose de savoir si le cœur technique, qui a la propriété d'être générique (par définition), doit intégrer ces nouvelles fonctions. Nous représentons cette troisième modélisation de la plateforme conçue par Poietis dans la Figure 31. La plateforme ainsi définie est composée à la fois du cœur technique inconnu et des modules qui sont ou non dépendants ; la frontière entre le cœur technique et les modules n'est pas figée.

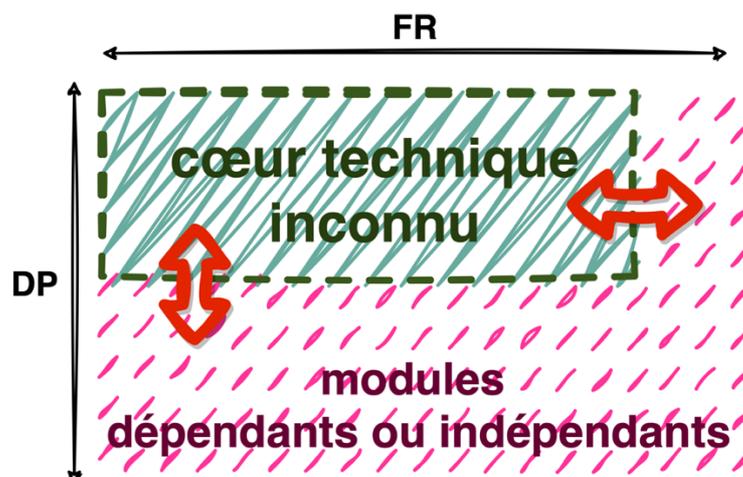


Figure 31. Stratégie de conception d'une plateforme avec un cœur technique inconnu et en recomposition

4.2. Preuves de l'existence d'un cœur technique générique et de l'expansion fonctionnelle

La modélisation proposée dans la Figure 31 appelle à une explication plus élaborée. Nous démontrons dans la suite du propos qu'il existe bien un cœur technique au caractère générique dans la plateforme en élaboration au sein de Poietis ainsi qu'un phénomène d'expansion fonctionnelle. Les bioimprimantes NGB-C et NGB-R sont vues comme deux instanciations différentes de la plateforme. Nous verrons ultérieurement le processus de construction de ce cœur technique.

4.2.1. La triple généricité de la technologie de bioimpression par laser

L'étude du système global de bioimpression amène à considérer trois éléments qui sont autant de lieux de généricité : au niveau de la bioimprimante, au niveau des types cellulaires imprimés et au niveau des protocoles d'impression. Certes, la conception simultanée de deux dispositifs d'impression en vue d'applications différentes est une première preuve de la généricité de la technologie de bioimpression par laser développée par Poietis. Mais il serait réducteur de n'accorder à Poietis que la seule capacité de conception de machines, ce potentiel de généricité se déclinant bien au-delà d'outil de production.

D'une part, les travaux de recherche menés depuis les débuts de l'entreprise ont toujours concerné simultanément plusieurs types cellulaires, selon les demandes des industriels et la participation à des consortia de recherche. Les partenariats mis en place par Poietis assurent une capacité à adapter la solution technologique à une diversité d'applications. L'adoption d'une stratégie de co-développement si aboutie (en nombre et en termes de diversité des partenaires) donne déjà une preuve de la gestion de la généricité mise en place par l'entreprise. Poietis va plus loin encore dans la gestion de la généricité en commercialisant une bioimprimante à destination des équipes de recherche capable d'être manipulée pour tester l'impression de nouveaux tissus biologiques et ainsi enrichir la base de types cellulaires bioimprimés. La startup exprime très clairement sa volonté de rendre la bioimprimante accessible dans ce but-là.

D'autre part, Poietis a bel et bien mis au point des protocoles d'impression adaptés à chaque type cellulaire bioimprimé. Si, en effet, la lignée de produits se déploie au niveau des bioimprimantes et des types cellulaires, il est aussi possible de l'observer au niveau des protocoles d'impression. Deux exemples concrets peuvent venir appuyer le propos : l'utilisation d'une même gamme d'hydrogels et les tests mis en place dans le développement des protocoles. Le substrat receveur sur lequel sont déposées les cellules bioimprimées par le jet généré par le laser à partir de la bioencre est un ensemble de polymères mis en présence d'eau, ce que l'on appelle un hydrogel. Le choix a été fait d'utiliser les mêmes hydrogels pour l'ensemble des projets de bioimpression, ce qui engendre un gain de temps non négligeable même si ce choix n'est pas toujours adapté. En particulier, dans le cas de l'impression d'amas de cellules souches, l'adhérence de ces amas sur l'hydrogel n'est pas suffisante, rendant les amas mobiles sur l'hydrogel et modifiant *de facto* le motif d'impression et avec lui l'homogénéité du tissu finalement formé. Si l'hydrogel n'a pas été remplacé, pour pallier cette difficulté, des protéines y ont été rajoutées pour attirer les cellules souches et les maintenir en place. L'exemple fourni par l'hydrogel souligne comment les protocoles sont définis à partir d'une base commune qui reste adaptable pour tenir compte des spécificités des

bioimpressions réalisées. Le développement des protocoles d'impression est aussi marqué par les tests réalisés pour démontrer la validité des étapes du protocole. Chaque projet est ainsi soumis aux mêmes tests, portant notamment sur le temps d'impression, la viabilité des cellules dans la bioencore, leur temps de conservation et plus généralement les limites du matériel biologique (comme le temps de viabilité de l'hydrogel disposé sur un substrat receveur retourné en dehors d'un milieu de culture et sous la hotte). L'enjeu de la qualification de la pertinence des tests est de limiter les actions chronophages dont l'utilité n'est pas prouvée dans la suite du protocole. Ainsi, la détermination d'une série définie de tests réalisés systématiquement souligne également la capacité d'adaptation des protocoles d'impression à des situations variées. Enfin, la stratégie de déploiement de la technologie de bioimpression à destination du monde de la recherche contribue à garantir le développement de nouveaux protocoles de culture en démultipliant le nombre d'acteurs capables de les concevoir.

Plus précisément, concernant le rôle de la bioimprimante NGB-R, le choix de fournir une solution de bioimpression pour favoriser la recherche scientifique peut être rapproché de la gestion des marchés complémentaires d'Intel, mise en évidence par les travaux de Gawer et Henderson (2007). Les auteurs montrent en effet que l'ouverture de la propriété industrielle à des marchés complémentaires ne va pas à l'encontre du maintien du contrôle de l'architecture de la plateforme : *« On one hand, Intel committed to making money in complementary markets—signaling that it would not drive returns down—by structuring entry into complementary markets as separate organizational units with Profit & Loss responsibility (“Job 2”). But at the same time it committed that it would not make “too much” money in these markets by actively giving away IP and subsidizing competitive entry. [...] Further, the careful choice of which complementary market to enter (the connectors) while giving away the corresponding IP not only helped Intel to solve the dilemma, but also allowed the firm to push forward the platform/applications interface— thereby retaining control of the architecture—while renewing incentives for complementors to innovate “on top of” the new extended platform. »* (p.26). Par conséquent, pour en revenir au cas de Poietis, l'existence d'une deuxième bioimprimante pour la recherche fournit bien une garantie de la généricité de la solution de bioimpression de Poietis.

4.2.2. De l'amélioration des performances d'une instanciation de la plateforme à l'expansion fonctionnelle de la plateforme

L'histoire des activités de conception de Poietis peut être résumée sous la forme d'une histoire de l'expansion fonctionnelle progressive et des solutions techniques associées. À chaque ajout d'une nouvelle fonction, l'enjeu est de s'assurer que l'on maîtrise l'influence sur les réalisations passées : selon un principe de bonne conception, on cherche alors à atteindre de nouvelles fonctions grâce à des paramètres de conception qui soient le plus découplés possible du système dont on hérite. Dans le cas où le changement est plus profond, il est nécessaire de vérifier les dépendances entre les couples fonctionnalités et paramètres de conception (FR-DP). Par ailleurs, on peut déjà noter que les expansions fonctionnelles sur l'une des bioimprimantes peuvent provenir de l'acquisition d'un savoir-faire sur l'autre bioimprimante : c'est ce que l'on observe dans le cas où l'on réutilise un paramètre de conception ayant servi à répondre à une fonction spécifique à une des bioimprimantes pour répondre à une nouvelle fonction propre à l'autre bioimprimante.

Le phénomène d'expansion fonctionnelle de la plateforme peut s'observer sur la Figure 31 : cela correspond à l'apparition d'une nouvelle fonction (FR), induisant la création d'un ou plusieurs paramètres de conception (DP) voire le couplage avec des paramètres existants. Un nouvel espace de performance de la plateforme est alors défini et il peut être atteint par une instanciation particulière de cette plateforme, c'est-à-dire par l'une ou l'autre des bioimprimantes ou les deux. Il s'agit de s'interroger d'abord sur le statut de cette nouvelle fonction vis-à-vis de l'existant, en déterminant les éventuels couplages avec les modules voire le cœur technique. Face à l'inconnu relatif au cœur technique et plus particulièrement à la frontière avec les modules, l'ajout d'une nouvelle fonction à la matrice de Suh ne se pose pas en termes d'intégration dans le cœur technique ou dans la partie modulaire, mais plutôt vis-à-vis des modifications potentielles qu'elle peut entraîner dans le cœur technique.

En outre, l'apparition d'une nouvelle fonction dans le cœur technique de la plateforme est coûteuse puisqu'elle engendre des modifications au niveau des paramètres de conception et des couplages FR-DP plus généralement qui doivent être prises en compte dans les différentes instanciations de la plateforme, à savoir les deux bioimprimantes. En outre, le cœur technique est inconnu, ce qui ne permet pas d'anticiper les conséquences de l'apparition de cette fonction en termes de dépendances dans le cœur technique. A priori, Poietis n'a donc pas intérêt à intégrer directement la nouvelle fonction dans le cœur technique. Dans les faits, la question de la gestion de l'expansion fonctionnelle se pose lorsqu'il s'agit d'intégrer à la plateforme une fonction qui a été précédemment développée pour l'une des instanciations de la plateforme.

Le cas de l'amélioration des performances de la bioimprimante NGB-C donne une illustration fidèle de la problématique de l'expansion fonctionnelle de la plateforme. Compte-tenu de l'intérêt social de la bioimprimante à destination du marché clinique et de la plus grande valeur du marché clinique par rapport au marché de la recherche, il est assez naturel de rechercher l'amélioration des performances de la NGB-C. Dès lors qu'un nouveau besoin sur le marché est traduit par une fonctionnalité à ajouter et que Poietis a développé la solution technique correspondante, la question de l'intégration de cette performance (vue comme un couple FR-DP) au cœur technique de la plateforme se pose, pour en faire bénéficier aussi la bioimprimante NGB-R. Cela passe par la détermination des conséquences du phénomène d'expansion fonctionnelle sur la connaissance du cœur technique et des implications en termes de gestion de la plateforme par Poietis.

4.3. La conception progressive d'une plateforme pour préserver la continuité d'usage des bioimprimantes NGB-C et NGB-R

Dans le but de garantir la pérennité de la plateforme et par là même l'existence conjointe des deux bioimprimantes, la mise en évidence dans la section 3.2.3 de l'intérêt du couple formé par les deux bioimprimantes donne une explication quant à la volonté de Poietis de permettre une utilisation conjointe des deux bioimprimantes, plus particulièrement en vue de la validation de protocoles d'impression par l'ANSM. Cela revient à assurer une utilisation similaire des deux bioimprimantes pour ne pas avoir à concevoir des protocoles d'impression spécifiques à chacune des bioimprimantes pour réaliser le même tissu. Concrètement, Poietis se donne pour objectif de

pouvoir réaliser les développements de protocoles avec la NGB-R puis de les réutiliser directement sur la NGB-C. Dans toute la suite, nous parlerons de « continuité d'usage » pour qualifier cette capacité sans alourdir le propos. Cette partie a pour objectif de déterminer les mécanismes de gestion mis en place par Poietis pour assurer la continuité d'usage alors que la plateforme est en cours de définition.

4.3.1. La recomposition du cœur technique comme signe de la conception progressive de la plateforme

À chaque nouvel ajout d'une performance à la bioimprimante NGB-C, la question de la recomposition du cœur technique est soulevée. Le cœur technique au départ inconnu se voit donc être partiellement révélé par cette recomposition, si elle a lieu. En effet, la nouvelle performance peut se traduire en termes de FR liées soit au cœur technique soit aux modules propres à la NGB-C (conformément à la modélisation de la Figure 31). Si la nouvelle performance intègre le cœur technique, cela signifie que sa définition ne sera pas sans conséquence pour la NGB-R. Il s'agira bien de recomposer le cœur technique pour prendre en considération la performance, par la création de nouveaux DP ou le couplage avec des DP existants. Ces questionnements sont soulevés à chaque nouvelle performance ajoutée. C'est pourquoi, cette connaissance plus fine du cœur technique se constitue progressivement au niveau des parties spécifiques de la matrice de Suh liées à une performance donnée. Cela a pour conséquence une plus grande maîtrise de la généricité de la technologie, comme on a pu le souligner dans la section 4.2.1.

C'est aussi l'occasion de réaliser une extension progressive des fonctionnalités avec une maîtrise des dépendances avec les FR et les DP existants. Le cas de Poietis met en évidence un phénomène de conception que l'on pourrait nommer « plateforme par morceaux » qui repose sur l'indépendance, au sens de la conception axiomatique, entre ce qui fait partie du cœur technique d'une plateforme générant une même lignée de produits et les modules propres à l'une ou l'autre des bioimprimantes, pour lesquels une indépendance est en général souhaitable.

Pour déterminer si cette recomposition a lieu ou s'il n'y a qu'une maîtrise des dépendances au niveau des modules face à une nouvelle performance au niveau de la NGB-C, il faut s'interroger sur l'introduction de la performance à la NGB-R. Nous chercherons donc à comprendre dans la suite du chapitre ce qui motive l'intégration d'une performance propre à la NGB-C à la NGB-R, quelles sont les voies de conception qui apparaissent et comment Poietis gère cette interrogation. Nous verrons aussi que l'intégration d'une performance peut aussi avoir lieu de la bioimprimante NGB-R vers la bioimprimante NGB-C.

4.3.2. Implication de l'expansion fonctionnelle sur la connaissance du cœur technique et la continuité d'usage entre les deux bioimprimantes

Face à la difficulté à concevoir et à commercialiser deux produits simultanément en phase de scale-up, la réduction de l'effort à mener est à privilégier et passe a priori par une mutualisation des développements. La réutilisation par l'une des bioimprimantes d'un paramètre de conception développé pour répondre à la nouvelle performance ajoutée à l'autre semble donc assez naturelle et propice à une diminution du coût global de la conception. Par exemple, les barrières à l'entrée du marché clinique sont particulièrement importantes, en particulier pour répondre aux exigences

règlementaires : en faisant des apprentissages ciblés sur la bioimprimante NGB-R, Poietis peut s'extraire des contraintes propres au marché clinique pour une première phase de tests et de définition des paramètres de conception principaux (c'est-à-dire ceux qui appartiendraient à première vue au cœur technique).

Il est légitime de s'interroger quant à l'intérêt des réutilisations des paramètres de conception vis-à-vis du modèle d'affaires, et en particulier lorsqu'elles touchent le cœur technique, qui représente indéniablement un coût (c'est-à-dire qu'il faut prendre en compte les effets sur les deux bioimprimantes). Trois arguments peuvent être apportés. Premièrement, la modélisation de l'activité de conception à partir de la représentation schématique de la plateforme sous la forme d'une matrice de Suh fait apparaître une forme assez résiliente de la matrice à travers sa modularité (le cœur technique pouvant être vu lui aussi comme un module). L'existence d'un cœur technique, par définition commun aux deux bioimprimantes, est un indicateur de la généricité de la solution, ce qui contribue à assurer une pérennité au modèle d'affaires. Deuxièmement, la question de l'intérêt de la réutilisation se pose au niveau de l'intégration d'un paramètre de conception déjà conçu pour l'une des bioimprimantes à l'autre : l'effort de R&D a donc déjà été fourni pour répondre à une fonctionnalité spécifique à la première bioimprimante. L'intégration de ce nouveau paramètre à la deuxième peut alors permettre soit d'atteindre la même fonctionnalité, soit d'en réaliser une autre plus adaptée aux besoins du marché de la deuxième bioimprimante. Troisièmement, selon le principe de limitation des interdépendances pour assurer une bonne conception, on cherchera à intégrer des solutions sous une forme modulaire qui limite les couplages, même lorsqu'il s'agit de recomposer le cœur technique. Cela va dans le sens des bonnes pratiques des méthodologies entrepreneuriales qui prônent également la modularité pour une meilleure adaptation des solutions aux clients.

Au-delà des économies de développement des bioimprimantes, Poietis veut assurer que les apprentissages puissent bien être transférés entre les versions recherche et clinique pour favoriser l'utilisation conjointe des deux bioimprimantes : la version recherche permettant la mise au point de protocoles pour réaliser la bioimpression d'une large variété de types cellulaires, les protocoles étant ensuite directement appliqués à la version clinique de la bioimprimante pour limiter les développements spécifiques et accélérer leur mise sur le marché après la validation des essais cliniques. On voit dès à présent que la bioimprimante NGB-R contribue à améliorer la généricité de la bioimprimante NGB-C. Par conséquent, Poietis cherche à optimiser la structuration des apprentissages conjoints. C'est justement ce qui permet de définir ce qui appartient au cœur technique : le rôle du cœur technique, qui par définition est partagé par l'ensemble des instanciations de la plateforme, est d'être le garant de la continuité d'usage.

Afin de comprendre plus précisément comment Poietis gère l'expansion fonctionnelle et acquiert une meilleure connaissance de son cœur technique, nous étudions 17 débats qui ont eu lieu au sujet de l'intégration dans l'une des bioimprimantes d'un paramètre de conception développé en vue de l'atteinte d'une performance par l'autre bioimprimante. Les débats sont présentés dans le Tableau 28, où sont indiqués également l'argumentaire, la décision, la traduction en termes de voie de conception empruntée et l'impact sur la continuité d'usage. Bien que nous ayons précisé que nous nous intéressons plus particulièrement dans le cadre de la modélisation aux cas où la nouvelle performance est ajoutée à la NGB-C, plusieurs de ces débats portent sur

l'introduction de modifications développées initialement sur la NGB-R à la NGB-C. Ils sont ainsi la preuve que l'expansion fonctionnelle porte sur la plateforme elle-même et pas uniquement sur un produit qui serait considéré comme principal (NGB-C) vis-à-vis d'un produit secondaire (NGB-R) ; ce qui va dans le sens de la valeur accordée au couple formé par les deux bioimprimantes. En outre, la diversité des voies de conception empruntées fait apparaître aussi des voies de conception plus originales, qui démontrent l'existence d'une vraie stratégie de gestion. Nous détaillons dans la section suivante la définition de ces différentes voies de conception. Dans le but de proposer une lecture du tableau suivant, nous explicitons deux des débats soulevés.

Exemple de la cartouche

On s'intéresse dans un premier temps au cas de la cartouche de la bioimprimante qui sert de réceptacle à la bioencres et qui est représentée dans la Figure 32 ci-après. Cette cartouche a été développée par une équipe de R&D avec pour objectif de résoudre la problématique du rechargement manuel des lames sur lesquelles la bioencres est déposée avant l'impression. C'est en effet la taille importante des tissus bioimprimés en vue d'une utilisation clinique qui nécessite de renouveler plusieurs fois le protocole d'impression. L'action manuelle présente en effet deux problèmes majeurs pour une utilisation clinique : la variabilité en termes de quantité de bioencres déposée et d'homogénéisation de cette bioencres sur l'ensemble de la lame et le risque de contamination du milieu élevé compte-tenu de la fréquence des interactions. Un dispositif d'automatisation de dépose de la bioencres sur un nouveau système de lame, appelé cartouche, a donc été intégré à la bioimprimante NGB-C. La question soulevée est ensuite de **savoir si ce nouveau dispositif présente un intérêt (au-delà du seul gain de temps) pour la bioimprimante NGB-R** ainsi que son impact sur la continuité d'usage entre les deux bioimprimantes. En effet, la garantie de l'asepsie du produit final ne fait pas partie des attendus de la NGB-R pour laquelle une utilisation manuelle est plutôt demandée pour une plus grande adaptabilité des opérations. Néanmoins, la cartouche permet un nouvel usage de la NGB-R, à savoir la production en série de plusieurs échantillons comparables (puisque réalisés dans les mêmes conditions). C'est aussi la garantie de la continuité d'usage qui a motivé l'intégration du système de cartouche à la plateforme, quand bien même cela introduit une recomposition du cœur technique, ce dispositif étant central dans le processus de bioimpression par laser.

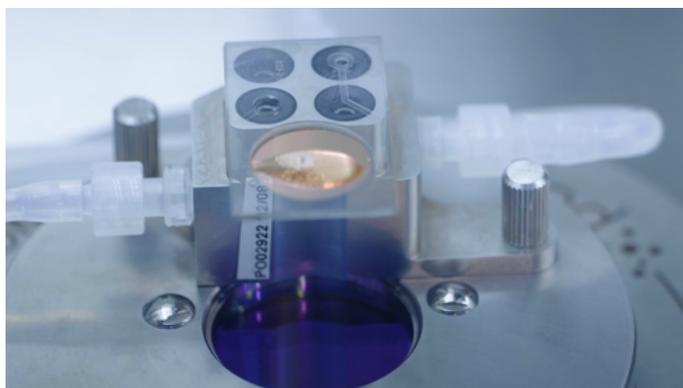


Figure 32. Dispositif de la cartouche avec une couche d'or absorbante

Source : © Poietis

Exemple du bras-robot

Le deuxième cas détaillé est celui du bras-robot, qui a déjà été représenté dans la Figure 27 de la section 3.2.1 (au centre de la photographie). Face à la même problématique de l'automatisation des actions dans la version clinique de la bioimprimante, les actions réalisées par l'utilisateur ont été décomposées et imitées par un bras robotisé, venant en remplacement d'un système de platines de déplacement. L'intérêt majeur du précédent système reposait sur la très grande précision des platines ; mais elles ne permettaient pas d'effectuer l'ensemble des mouvements nécessaires sans intervention de l'utilisateur et elles demandaient un effort de conception particulier pour être compatibles avec les bonnes pratiques de fabrication (GMP), à l'inverse du bras-robot. C'est l'argument de la **garantie de la continuité d'usage qui a entraîné l'intégration du bras-robot à la NGB-R malgré la perte de précision engendrée**. Il s'agit donc d'un cas où le cœur technique a été recomposé, ce qui en plus de présenter un coût entraîne une diminution des performances d'un des produits. Ce débat et la décision qui en sort appellent à être justifiés. D'autres situations similaires sont explicitées dans le tableau ci-après.

Tableau 28. Liste des débats étudiés portant sur l'intégration d'une performance développée sur l'une des bioimprimantes à l'autre bioimprimante

<i>Objet du débat</i>	<i>Débat soulevé</i>	<i>Arguments</i>	<i>Décision</i>	<i>Voie de conception</i>	<i>Continuité d'usage entre la NGB-C et la NGB-R</i>
Interface utilisateur du logiciel	L'interface est-elle la même pour la NGB-C et la NGB-R ?	Utilisateurs et usages différents : soit solution commune avec deux options (coûteux) soit deux interfaces différentes Intérêt d'avoir une expérience utilisateur par bioimprimante pour vendre à chaque utilisateur la bioimprimante adaptée Prise en compte des retours utilisateurs avec adaptations fréquentes à l'une ou l'autre des bioimprimantes dans le cas d'une interface unique (coûteux)	Spécifique à chaque bioimprimante	Sans recomposition du cœur technique, solution modulaire	Absence de contraintes sur la continuité d'usage
Briques élémentaires du logiciel	Quelles briques doivent être réutilisées dans l'une ou l'autre des bioimprimantes ?	D'une part, le logiciel de la NGB-C doit être compatible avec une partie des protocoles développés sur la NGB-R (performance minimale assurée à NGB-C). D'autre part, il faut s'assurer que le logiciel de la NGB-R fasse au moins ce que fait celui de la NGB-C (performance minimale de NGB-C atteinte par NGB-R).	Intégration des briques élémentaires dans les deux bioimprimantes	Recompositions multiples du cœur technique et atteinte par la NGB-R des performances minimales de la NGB-C avec potentiel pour atteindre de nouvelles performances pour la NGB-R	Continuité d'usage garantie et circonscrite à un espace précis

Fonctionnalités du logiciel à la suite des retours des utilisateurs	Quelles sont les fonctionnalités du logiciel à intégrer dans l'une ou l'autre des bioimprimantes ?	Celles qui assurent une meilleure performance globale sont intégrées parce qu'elles sont bénéfiques à tous les utilisateurs (quelle que soit leur typologie)	Intégration des fonctionnalités améliorant la performance globale dans les deux bioimprimantes	Recompositions multiples du cœur technique et atteinte des mêmes espaces de performance	Continuité d'usage garantie
Cartouche (réceptacle de la bioimprimante)	Quel est l'intérêt d'un système automatisé si des actions manuelles perdurent dans la NGB-R ?	Changement dans l'usage de la cartouche : intérêt pour l'automatisation du procédé pour la NGB-C dans le but de fournir un tissu de grande taille et intérêt pour la bioimpression de plusieurs petits tissus identiques pour la NGB-R Gain de temps utile aussi pour la recherche	Intégration de la technologie développée pour la NGB-C dans la NGB-R	Recomposition du cœur technique et atteinte d'espaces de performance différents	Continuité d'usage garantie
Bras-robot de la bioimprimante	Faut-il garder le système de platines de la NGB-R pour une meilleure précision ou assurer plus de mouvements avec le bras-robot ?	Platines : précision meilleure pour le positionnement de la plaque ; mais non compatible pour la NGB-C (pas de version GMP) et moins de choix de déplacement Bras-robot : existe en version GMP pour la NGB-C ; 6 axes de rotation ; mais moins précis Argument pour le choix du robot dans les deux cas : assurer la continuité d'usage entre la NGB-R et la NGB-C	Intégration de la solution choisie pour la NGB-C dans la NGB-R	Recomposition du cœur technique et limitation de l'espace de performance de la NGB-R	Continuité d'usage garantie
Baie électrique de la bioimprimante	Faut-il un système de baie électrique propre à chaque bioimprimante ?	Améliorations de la NGB-C récupérées pour la NGB-R : simplifications au niveau du contrôleur et du bras-robot	Intégration de la solution développée pour la NGB-C dans la NGB-R	Recomposition du cœur technique et atteinte des mêmes espaces de performance	Continuité d'usage garantie

Design extérieur de la bioimprimante	Est-il nécessaire de diminuer la taille de la NGB-R pour éviter de la démonter ?	Diminution de l'encombrement de la bioimprimante vue comme une propriété utile	Intégration des modifications du design de la NGB-C dans la NGB-R	Recomposition du cœur technique et atteinte des mêmes espaces de performance	Continuité d'usage garantie
Vitesse des ventilateurs de la NGB-C	Les environnements d'usage des bioimprimantes étant différents, faut-il avoir le même flux d'air ?	Vitesse de l'air plus importante pour une diminution du risque de contamination, conformément aux contraintes de l'utilisation dans une salle blanche de classe A (NGB-C) Choix délibéré d'un bridage des performances de la NGB-R pour assurer une différenciation avec la NGB-C	Pas d'intégration de la solution présente sur la NGB-C dans la NGB-R	Sans recomposition du cœur technique, solution modulaire et limitation de l'espace de performance de la NGB-R	Continuité d'usage limitée au niveau de la NGB-R par rapport à la NGB-C
Bonnes pratiques de fabrication (GMP) garanties	Faut-il assurer une absence de particules dans l'utilisation de la NGB-R comme c'est le cas pour la NGB-C ?	Particules aussi liées aux protocoles qui sont par définition plus souples en recherche donc risque de surqualité sur la conception de la NGB-R	Pas d'intégration de la solution présente sur la NGB-C dans la NGB-R	Sans recomposition du cœur technique, solution modulaire	Absence de contraintes sur la continuité d'usage
Changement de fournisseur pour la conception externe de la NGB-C	Faut-il garder des solutions sur étagères pour limiter les surcoûts ?	Transfert des compétences, matériaux, fonctionnement global et gestion d'un unique fournisseur Pas de doublons du fournisseur Capacité en interne conservée car solutions personnalisées conçues en collaboration et accumulation de savoir-faire	Récupération du fournisseur de la NGB-C pour la NGB-R	Recomposition du cœur technique et atteinte des mêmes espaces de performance	Continuité d'usage garantie

Intégration de la tête d'extrusion du module microsion dans la bioimprimante (emplacement, usinages, pièces, etc.)	Quelle utilité de la tête d'extrusion pour la NGB-R ?	Favoriser la modularité des bioimprimantes en intégrant des modules d'impression différents de la technologie laser Emplacements pour les modules d'autant plus utiles pour la NGB-R car potentiellement plus de modules à proposer Contrôle-commande identique du bras-robot entre la NGB-C et la NGB-R pour le déplacement vers les modules	Intégration de la solution développée pour la NGB-C dans la NGB-R	Recomposition du cœur technique et atteinte par la NGB-R des performances minimales de la NGB-C avec potentiel pour atteindre de nouvelles performances pour la NGB-R	Continuité d'usage garantie et circonscrite à un espace précis
Tête microvanne du module microsion de la bioimprimante	Faut-il ajouter une tête microvanne au module microsion de la NGB-C ?	Pas d'utilité vis-à-vis du protocole de bioimpression de peau pour le cas clinique	Pas d'intégration de la solution présente sur la NGB-R dans la NGB-C	Sans recomposition du cœur technique, solution modulaire et limitation de l'espace de performance de la NGB-C	Continuité d'usage limitée de la NGB-R vers la NGB-C
Protocoles d'impression de la peau	Quels sont les protocoles développés sur la NGB-R à intégrer à la NGB-C ?	Intégrer de nouveaux protocoles validés en recherche Différencier ceux qui peuvent avoir une application clinique	Intégration des protocoles de la NGB-R à la NGB-C	Recomposition du cœur technique et limitation de l'espace de performance de la NGB-C	Continuité d'usage limitée de la NGB-R vers la NGB-C
Motifs d'impression laser comme fonctionnalité de la bioimprimante	Faut-il pouvoir changer le motif d'impression sur la NGB-C ?	Non car application de protocoles donnés et validés (problème du coût élevé de la validation, réalisée par les essais cliniques)	Pas d'intégration de la solution présente sur la NGB-R dans la NGB-C	Sans recomposition du cœur technique, solution modulaire et limitation de l'espace de performance de la NGB-C	Continuité d'usage limitée au niveau de la NGB-C (dans sa version validée par l'ANSM) par rapport à la NGB-R

Microscope comme fonctionnalité de la NGB-R	Quel est l'intérêt de l'observation avec un microscope dans le cas clinique ?	Intérêt du microscope qui porte sur les vérifications pendant la réalisation du protocole de bioimpression mais pas sur le protocole lui-même dans le cas de la bioimpression de peau Fonctionnalité au coût élevé	Pas d'intégration de la solution présente sur la NGB-R dans la NGB-C	Sans recomposition du cœur technique, solution modulaire et limitation de l'espace de performance de la NGB-C	Absence de contraintes sur la continuité d'usage
Visé-tiré comme fonctionnalité de la NGB-R	Une grande précision sur la cible (cellules de la bioencre) pour le tir laser est-elle nécessaire dans le cas de la NGB-C ?	Intérêt du visé-tiré : encres peu denses ou gros objets Cas de la peau avec une bioencre très dense donc pas de nécessité à réaliser un visé-tiré pour la version actuelle de la NGB-C	Intégration de la technologie à valider pour une NGB-C future dans le cas de l'impression d'agrégats	Recomposition du cœur technique et atteinte des mêmes espaces de performance	Continuité d'usage garantie
Tests des fonctionnalités de la NGB-R	Quel intérêt de savoir valider la NGB-C à partir de la validation de la NGB-R ?	Charge de travail importante pour la validation : objectif de diminuer au maximum les temps de validation et de réutiliser les tests développés pour la NGB-R vers la NGB-C Déjà de nombreux tests pour la NGB-C dans le cadre des GMP et de la réglementation	Intégration des tests de la NGB-R pour la validation de la NGB-C	Recomposition du cœur technique et atteinte par la NGB-C des performances minimales de la NGB-R avec potentiel pour atteindre de nouvelles performances pour la NGB-C	Continuité d'usage garantie et espace de performance plus important pour la NGB-C

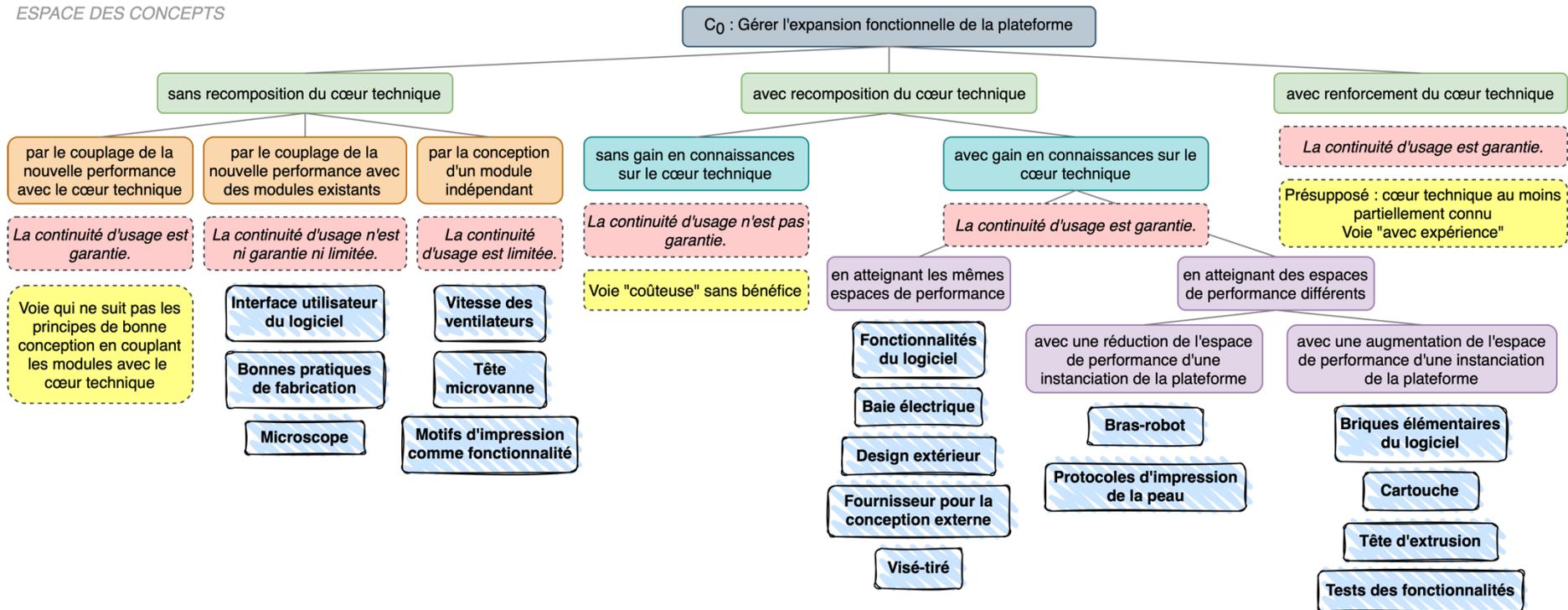
4.3.1. Une modélisation des voies de conception pour gérer l'expansion fonctionnelle à partir de la théorie C-K

Dans le but de montrer l'effort de conception à fournir pour construire le cœur technique, nous modélisons le raisonnement de conception qui y conduit. Pour cela, nous avons recours à la théorie C-K, qui permet de mettre au point le référentiel présenté dans la Figure 33. Il permet déjà de saisir la diversité et la richesse des voies de conception empruntées par Poietis lorsqu'il s'agit de décider si une performance doit être atteinte par les deux bioimprimantes.

La première étape pour réaliser ce référentiel consiste à formuler le concept de départ, qui doit être l'expression d'un inconnu et être particulièrement désirable. La formulation retenue est la suivante : « Gérer l'expansion fonctionnelle de la plateforme ». L'inconnu concernant la plateforme est particulièrement important puisque l'on a montré que la frontière entre le cœur technique et les modules n'est pas définie. Faire porter le concept de départ sur la plateforme au lieu de s'intéresser à l'une des bioimprimantes s'explique par l'intérêt que représente la plateforme par rapport à l'une de ses instanciations en termes de conception future : c'est la plateforme qui assure la générativité de la technologie et en cela elle est particulièrement désirable.

Lecture de la Figure 33 : les partitions dans l'espace des concepts (qui correspondent à un niveau donné dans le parcours des branches qui forment les concepts) sont justifiées par les éléments présentés dans l'espace des connaissances et avec lesquels une correspondance de couleurs a été faite. Par ailleurs, les éléments avec les bordures en pointillés dans l'espace des concepts sont fournis à titre indicatif pour caractériser les voies de conception (en jaune) et préciser les implications en termes de continuité d'usage (en rose) ; ils sortent du cadre formel habituel de la théorie C-K. Les éléments terminaux des branches (en bleu) correspondent aux objets des débats précisés dans le Tableau 28.

ESPACE DES CONCEPTS



ESPACE DES CONNAISSANCES

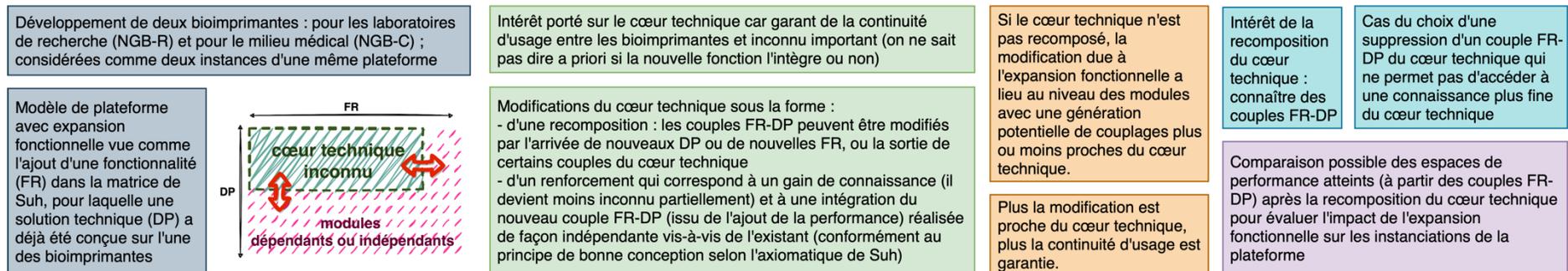


Figure 33. Modélisation du raisonnement de conception par la théorie C-K conduisant à la prise en considération de la valeur de la conception simultanée des bioimprimantes NGB-C et NGB-R

Le positionnement des différents débats du Tableau 28 sur plusieurs voies de conception met en évidence des voies de conception originales choisies par Poietis pour gérer l'expansion fonctionnelle. Chaque cas est traité individuellement et fait l'objet de deux arbitrages principaux portant sur la continuité d'usage et sur les performances propres à la NGB-R (respectivement NGB-C). Ces arbitrages ont pour conséquence d'une part de maîtriser la continuité d'usage des deux bioimprimantes (comme le cas du bras-robot peut le souligner) et d'autre part d'organiser la complémentarité et la différenciation de la gamme de produits au niveau des espaces de performance atteints (le cas de la cartouche intégrée à la NGB-R est intéressant puisqu'il met en évidence un gain en fonctionnalité pour la NGB-R par rapport à la NGB-C).

La diversité des voies de conception soulignée dans la Figure 33 et le nombre de débats mis en évidence dans le Tableau 28 montrent bien que l'on se retrouve en présence d'une entreprise ayant déjà fait un certain nombre d'apprentissages et pour laquelle la connaissance du cœur technique est désormais plus fine. Cette meilleure connaissance du cœur technique est un moyen d'anticiper les efforts à réaliser pour une expansion fonctionnelle future. Ainsi, c'est vers la voie dite « avec expérience » que Poietis se tourne progressivement en cherchant à renforcer le cœur technique, à savoir à gagner en connaissance du cœur et à assurer simultanément l'indépendance des nouveaux couples FR-DP issus de l'intégration de nouvelles performances vis-à-vis du cœur technique existant. Le déplacement vers cette voie de conception s'effectue plus particulièrement au cours de la phase de scale-up, durant laquelle l'entreprise acquiert progressivement une capacité à prévoir le coût de l'ajout de nouvelles performances. La formalisation du raisonnement de conception proposée dans le référentiel C-K de la Figure 33 sert comme aide à la décision.

Exemple de la couche d'or

Cet usage peut être mis en évidence avec l'exemple du développement d'un laser ne nécessitant pas de couche d'or sur la cartouche servant de réceptacle à la bioencres. Le caractère sacrificiel de la couche d'or pose en effet un problème puisqu'il faut changer la cartouche au bout d'un certain nombre de tirs du laser, la couche d'or étant ablatée tir après tir. Pour la version clinique de la bioimprimante, ce changement de cartouche représente un risque de contamination du milieu. L'existence de la couche d'or se justifiant par rapport à la protection des cellules vis-à-vis du transfert d'énergie du laser pouvant conduire à leur mort, la solution technologique à cette problématique repose sur une innovation portée par le laser. C'est la NGB-C qui bénéficierait prioritairement de cette innovation, ce qui soulève la question de l'intégration du nouveau laser à la NGB-R. La détermination des voies de conception possibles permet d'anticiper celle à emprunter à partir des objectifs fixés (continuité d'usage et espaces de performance). De plus, le gain en connaissances sur le cœur technique montre que la bioimpression par laser ainsi que le dispositif de cartouche sont intégrés au cœur technique avec un couplage lié à la couche d'or. En effet, l'avantage concurrentiel de Poietis repose sur le type de bioimpression par laser, qui est bien commun aux deux bioimprimantes et donc bien intégré au cœur technique ; tandis que la décision relative au débat sur la cartouche a conduit à une recomposition du cœur technique pour intégrer la cartouche également à la NGB-R en augmentant son espace de performance (conformément au résultat présenté dans la Figure 33). Le choix de la solution de l'intégration du nouveau laser aux deux bioimprimantes va alors dans le sens de la voie de conception relative à un renforcement du

cœur technique, en particulier dû au découplage entre la cartouche et le laser par l'absence de couche d'or. Ce cas est une preuve de l'acquisition d'une capacité à gérer le phénomène d'expansion fonctionnelle tout en garantissant la généricité du cœur technique. Poietis fournit bien un effort particulier pour construire un cœur technique générique au lieu de se contenter de la construction d'un portefeuille de produits. Nous déduisons de cet exemple la pertinence de la modélisation proposée du raisonnement de conception vis-à-vis des problèmes de gestion apparaissant en phase de scale-up. Par ailleurs, la pertinence de cette stratégie doit aussi être évaluée en tenant compte de l'évolution du modèle d'affaires induite par la suppression de la couche d'or sur les cartouches.

4.3.2. L'instruction organisée des débats : une preuve de l'action managériale sur la conception de la plateforme

Il est particulièrement intéressant de noter que les différents débats et les choix des voies de conception associées font partie des processus de décision mis en place par Poietis. En se rendant capables de recomposer voire de renforcer le cœur technique de la plateforme, les dirigeants de Poietis posent des actions managériales fortes. Il est d'autant plus pertinent de le souligner que nous avons précédemment mis en évidence 17 cas de débats instruits. L'effort pour gérer la continuité d'usage est donc constant. C'est une nouvelle preuve de l'existence d'une plateforme et non pas de produits indépendants issus d'une succession de MVP eux-mêmes indépendants.

Cela amène à se questionner plus précisément sur les processus d'instruction des débats au sein de Poietis. Au cours des différentes réunions énumérées dans le Tableau 23 de la section 2.2, plusieurs débats ont été soulevés ; les informations complémentaires étant ensuite récupérées dans le cadre des autres formes d'interaction. Pour la majorité d'entre eux, c'est au cours de comités de pilotage spécifiques aux différents projets que les débats sont tranchés en présence des experts techniques et de la direction. Dans la mesure où ces débats soulèvent des questions d'indépendance entre les solutions techniques, le cadre de résolution est systématiquement multidisciplinaire. Cela est rendu possible par le fort tropisme scientifique des collaborateurs qui présentent des expertises significativement différentes. L'existence d'un comité de pilotage nommé « Système » est à souligner dans la mesure où les sujets traités le sont parce qu'ils sont en lien avec les deux bioimprimantes. Ce sont les experts techniques avec le *Chief Technology Officer* (Bertrand Viellerobe) qui présentent les débats et l'argumentaire associé, tandis que les dirigeants, respectivement le *Chief Scientific Officer* et le *Chief Business Officer* (Fabien Guillemot et Bruno Brisson) les tranchent.

Certains débats sont aussi instruits plus près des équipes techniques. C'est le cas lorsque le retour des utilisateurs est particulièrement nécessaire et implique des modifications bien précises. Par exemple, pour le logiciel qui fait l'objet d'un certain nombre de modifications introduites au fil des développements de chacune des bioimprimantes, les retours des utilisateurs de la NGB-R sont pris en compte en interne. En effet, l'équipe de biologie utilise plusieurs versions de la bioimprimante NGB-R pour mettre en place des protocoles d'impression et réaliser des tests sur des types cellulaires, ce qui correspond à l'usage commercial de cette bioimprimante. Leurs retours sont donc directement pris en compte par l'intermédiaire d'une personne en charge du lien entre l'équipe du développement du logiciel et l'équipe de biologie sur l'interface. De même, dans le cadre de la collaboration avec l'Hôpital de la Conception – AP-HM, les retours des utilisateurs de la NGB-

C sur place ont été directement intégrés au logiciel. Une autre situation d'instruction des débats a pu être observée dans le cadre du comité de pilotage du projet européen sur le cartilage, à propos de la fonctionnalité de visé-tiré. Dans ce cas, il s'agit d'un projet de recherche à visée clinique, et le débat a été instruit par l'équipe en charge du projet, dont le *Chief Technology Officer* (Bertrand Viellerobe), et le *Chief Scientific Officer* (Fabien Guillemot). Si les lieux d'instruction des débats sont divers, la présence quasi-systématique des responsables technique et scientifique atteste de la volonté managériale dédiée à la conception d'une plateforme.

5. Discussion : enjeux organisationnels et managériaux pour la constitution d'un patrimoine de création en phase de scale-up

L'étude de la construction d'une plateforme par Poietis au cours de sa phase de scale-up met en lumière la gestion de la constitution du patrimoine de création. Il s'agit de comprendre ce que le modèle de plateforme peut apporter à la compréhension de la constitution du patrimoine de création vis-à-vis des mécanismes organisationnels et managériaux à l'œuvre lorsque l'entreprise passe à l'échelle.

5.1. La conception progressive d'une plateforme considérée à partir de la gestion de la continuité d'usage des bioimprimantes NGB-C et NGB-R

5.1.1. Une volonté stratégique forte des dirigeants

La mise en évidence des différents débats relatifs à la construction de la plateforme est une première preuve d'une volonté stratégique marquée de la part des dirigeants. Il est clair que le choix du développement d'une plateforme implique des efforts de conception plus importants que l'amélioration d'un produit unique ou l'amélioration simultanée de deux produits indépendants. Cela se traduit par le questionnement systématique de la continuité d'usage entre les produits, sans succomber à la tentation de mettre au point des produits qui ne seraient pas considérés comme des instanciations de la plateforme. En outre, cette volonté est particulièrement affirmée alors que l'entreprise se trouve en phase de scale-up. Cela souligne un effort managérial particulier à fournir alors que les changements d'échelle demandent déjà un effort de gestion supplémentaire.

La mise en place d'une recherche-intervention pour étudier le scale-up de Poietis est aussi la preuve du fort intérêt des dirigeants quant à la formalisation de leur stratégie. Les comités de pilotage réunissant les parties prenantes de cette recherche-intervention ont été l'occasion de montrer l'intérêt de ces recherches pour Poietis. L'explicitation des processus de conception par le travail réalisé a permis aux dirigeants de nommer et d'objectiver les intuitions et les choix stratégiques faits au cours des différentes étapes de l'activité entrepreneuriale. En particulier, la justification théorique de la valeur contenue dans le couple formé par les deux bioimprimantes est un élément supplémentaire dans l'argumentaire face à des investisseurs qui chercheraient à privilégier un des deux produits.

5.1.2. Une intention tactique affirmée à travers la variété des voies de conception

La modélisation du raisonnement de conception relatif à la gestion de l'expansion fonctionnelle de la plateforme a montré une variété importante des voies de conception empruntées par Poietis. Nous en déduisons plusieurs règles pour les choix de conception de la plateforme, que l'on peut résumer comme suit :

- La prise en considération de la continuité d'usage ;
- L'intérêt que représente le renforcement du cœur technique ;
- L'organisation de la différenciation entre les produits en maîtrisant l'atteinte de performances propres aux instanciations de la plateforme.

Le suivi de ces règles implique une exploration systématique des voies de conception possibles. C'est la combinaison des voies de conception qui permet in fine le respect de l'ensemble de ces règles au niveau de la plateforme elle-même. Le respect de cette combinaison de règles est garanti par un dispositif organisationnel adéquat.

5.1.3. Un dispositif gestionnaire routinier

L'existence de cet effort de conception qui perdure sur le long terme nécessite un dispositif gestionnaire pour instruire les débats liés à l'expansion fonctionnelle de la plateforme. La routine organisationnelle mise en place consiste alors à déterminer les enjeux autour de la continuité d'usage entre les instanciations de la plateforme. Si les débats soulevés ont un caractère technique marqué, le processus d'accompagnement gestionnaire relatif à leur instruction n'est pas à négliger lorsqu'il s'agit de comprendre les motivations sous-jacentes. La présence systématique des dirigeants, et plus particulièrement du *Chief Scientific Officer*, dans le processus d'instruction des débats, amène alors à se demander quelles sont les compétences nécessaires pour gérer la continuité d'usage.

5.1.4. Quelles sont les compétences nécessaires à la conception de la plateforme ?

La démonstration de l'existence d'une stratégie de développement d'une plateforme amène à considérer une compétence relative à la gestion d'une plateforme portée par l'équipe de direction. C'est aussi une compétence technique multidisciplinaire qui est nécessaire pour être en mesure de faire évoluer la plateforme, tout en répondant aux besoins des marchés visés. La connaissance des marchés et la prise en compte des retours des utilisateurs sont particulièrement utiles pour définir ce qui doit être à l'origine d'une expansion fonctionnelle.

La modélisation du raisonnement de conception pour la gestion de l'expansion fonctionnelle de la plateforme a mis au jour le coût que représente la recomposition du cœur technique : l'accumulation des choix techniques au cours du développement peut en effet engendrer des couplages en termes de conception qui peuvent être modifiés par le phénomène d'expansion fonctionnelle. On est amené à faire le parallèle avec la notion de dette technique, explicitée par Bonet Faus et al. (2023) comme étant, dans le domaine de l'informatique : « *a collection of design choices and implementation constructs amassed during the development phase which set up a technical context that induces future costs* » (p.1268).

Cette notion de dette technique nous aide à comprendre qu'il ne s'agit pas de connaître la matrice de Suh dans son ensemble ; en revanche il s'agit plutôt de savoir gérer les évolutions de la matrice à chaque nouvelle expansion fonctionnelle, c'est-à-dire que les experts techniques doivent être en mesure de déterminer les couplages induits par l'intégration d'une performance (vue comme un couple FR-DP) à la matrice de Suh de la plateforme. Ce sont ces couplages qui génèrent la dette technique, au sens des surcoûts de développement liés à la création de niveaux de complexité sous-jacents à la matrice de Suh. Par ailleurs, il est juste de considérer la situation de double inconnu, à laquelle est soumis le développement des startups deeptech et qui ne laisse pas de doute quant à l'existence de phénomènes non traités par le passé par les équipes marketing ou technique. On en déduit qu'il n'est pas tenable de ne pas considérer les éléments constitutifs de la matrice de Suh et qu'il n'est pas non plus raisonnable d'en avoir une connaissance parfaite.

5.2. Le détour par un modèle de plateforme pour la constitution du patrimoine de création

Ce travail de modélisation de l'activité de conception par la représentation d'une plateforme à partir d'une matrice de Suh contribue à déterminer les différentes stratégies de conception de la plateforme et *a fortiori* les règles pour les gérer. Ces règles, dès lors qu'elles permettent la génération d'une gamme de produits, intègrent le patrimoine de création de la startup. Nous avons montré dans le cas de Poietis que ces règles de construction de la plateforme portaient plus particulièrement sur la maîtrise de l'architecture de la plateforme, y compris la gestion du cœur technique qui assure la généricité de la technologie proposée. De plus, la variété des voies de conception empruntées et le maintien de voies de conception originales sont aussi des règles du patrimoine de création.

C'est finalement la plateforme elle-même qui intègre le patrimoine de création. Notre première représentation du raisonnement de conception démontrant l'intérêt du maintien simultané des deux bioimprimantes dans la Figure 28 de la section 3.2.3 mettait déjà en évidence que le couple formé par la NGB-R et la NGB-C faisait partie du patrimoine de création de Poietis. L'étude de la gestion de l'expansion fonctionnelle de la plateforme a enrichi cette première conclusion en soulignant les enjeux de la gestion de la jonction entre le cœur technique et les modules formant la plateforme, qui définit alors les deux bioimprimantes comme des instanciations particulières.

L'argument portant sur la continuité d'usage lors de l'instruction des débats est également à prendre en considération dans la définition du patrimoine de création. C'est bien cette continuité d'usage qui est caractéristique du cœur technique, ce qui fait d'elle un élément du patrimoine de création : d'une part, en garantissant la continuité d'usage sur certains aspects des bioimprimantes, Poietis préserve la validité des apprentissages réalisés sur l'une et l'autre des bioimprimantes ; d'autre part, le caractère générique de la plateforme et plus fortement encore de son cœur technique sont la preuve de la générativité de la solution. La recherche d'une modularité de l'ensemble de la plateforme va aussi dans ce sens.

À ce propos, ce qui est plus intéressant encore et ce qui transparaît dans l'étude de Poietis, c'est que l'entreprise ne cherche pas à être modulaire sur un produit seulement, mais le fait qu'elle construise progressivement sa capacité à être modulaire sur toute une lignée de produits. C'est bien

la plateforme qui est construite selon ce principe, et la voie de conception consistant à renforcer le cœur technique par une recombinaison qui limite le couplage au sein du cœur technique en est une preuve. C'est en cela qu'elle présente de réelles qualités de générativité. Cette recherche de la modularité sur la lignée, qui prend effet dans les activités même de conception, est bien l'une des règles que se donne l'entreprise pour assurer son développement et lui garantir la capacité à couvrir une large gamme de couples produits-marchés. On y voit là un des éléments-clés de son patrimoine de création, dont l'utilité est directe en cas de *due diligence* réalisée par un potentiel investisseur : Poietis a progressivement acquis une capacité à aborder un ensemble de fonctionnalités différentes pour toute une gamme de produits et ce de façon modulaire, ce qui indique par conséquent l'atteinte d'un potentiel élevé sur le plan combinatoire.

5.3. L'intérêt du patrimoine de création pour la compréhension des mécanismes de la phase de scale-up

Le détour par la construction d'une plateforme modélisée avec le langage de la conception axiomatique a permis d'affirmer la pertinence de ce langage lorsqu'il s'agit de déterminer les processus de conception en œuvre au cours de la phase de scale-up. La phase de scale-up est désormais vue comme le lieu de l'enrichissement progressif du patrimoine de création. Nous avons montré que la logique générale de la constitution du patrimoine de création se base sur la sensibilité à un événement extérieur, vu comme un motif d'expansion fonctionnelle d'une plateforme. Le modèle de conception de plateforme et les règles du patrimoine de création qui permettent de formaliser ce phénomène d'expansion fonctionnelle en vue de sa gestion ont souligné les enjeux de la prise en compte des demandes des marchés. Cela rejoint tout à fait la théorie entrepreneuriale sur le scale-up qui prône la mise en place de tests successifs de l'innovation sur le marché à travers le développement de MVP, comme le montrent Anderson et al. (2017) en défendant des cycles de validation fréquents. L'évolution du patrimoine de création pendant la phase de scale-up fait apparaître une logique d'accumulation progressive de performances introduites par les marchés à la plateforme.

L'étude du cas de Poietis pourrait paraître insuffisante pour éclairer à elle seule la constitution d'un patrimoine de création. Un autre cas, assez proche par bien des aspects, a déjà été décrit par la littérature : il s'agit du compteur à scintillation liquide ou scintillateur liquide, dont le rôle est de détecter un rayonnement, et pour lequel de nombreuses applications existent (Rheinberger, 2001). L'auteur emploie d'ailleurs la notion de technologie générique pour le qualifier. Rheinberger (2001) retrace l'histoire de ce dispositif, élaboré depuis les années 1960, et de son passage à l'échelle en insistant sur sa capacité à répondre à des applications à la fois pour la recherche en biologie et pour le monde du médical, cette capacité étant maintenue tout au long du développement des produits basés sur la technologie. Comme dans le cas de Poietis, le premier prototype a été développé en collaboration avec des chercheurs puis il a connu des améliorations successives. De plus, les caractéristiques du milieu médical dans lequel le scintillateur liquide est utilisé sont identiques à celles du marché clinique pour la NGB-C de Poietis : le dispositif doit être polyvalent (comme l'est la bioimprimante vis-à-vis des différents types cellulaires), facile d'utilisation (ce qui correspond à un protocole d'utilisation très guidé) et fonctionner de manière

automatique. L'auteur met aussi en évidence l'importance de l'interface entre le monde de la recherche et le milieu médical dans le développement de la technologie générique et souligne les dimensions interdisciplinaire et internationale fortes. L'exemple du couplage entre les fonctions de vendeur et de service client par des personnes hautement qualifiées décrit par Rheinberger (2001) fait penser à la situation de Poietis où ces activités sont gérées directement par les équipes techniques. Si l'étude du compteur à scintillation liquide ne met pas directement en évidence un patrimoine de création, la ressemblance avec la technologie de bioimpression par laser de Poietis est frappante, jusque dans les processus de gestion mis en place. Ce deuxième cas conforte la pertinence d'une généralisation du propos.

Synthèse du chapitre 5

Dans le but de comprendre comment une startup deeptech se dote progressivement d'un patrimoine de création durant sa phase de scale-up, nous avons proposé une modélisation des processus de conception à l'œuvre. La mise en place d'une deuxième recherche-intervention a permis de mettre en évidence ce phénomène particulier, saisi grâce à un détour par la notion de plateforme, dont les processus sont mieux connus de la littérature. Notre modèle de plateforme a été élaboré à partir d'un recours à la conception axiomatique et d'une confrontation aux phénomènes observés et analysés dans le cadre de la recherche-intervention. C'est une gestion élaborée et complexe de l'expansion fonctionnelle de la plateforme par Poietis qui a été démontrée, justifiant ainsi l'originalité des choix de conception faits par la startup. En particulier, Poietis est en mesure de garantir la généricité de sa plateforme à chacune de ses évolutions. Cette capacité, qui intègre pleinement le patrimoine de création de Poietis, se constitue pendant la phase de scale-up. Néanmoins, le patrimoine de création ne se réduit pas qu'aux seuls aspects techniques, même en prenant en compte la dimension organisationnelle de ses aspects. Il s'agit dès lors de s'intéresser à la dépendance entre la stratégie d'apprentissage et l'écosystème qui prend forme autour de la startup.

Chapitre 6 – Construire le rapport à l'écosystème dès la stratégie de prototypage

Chapitre 6 – Construire le rapport à l'écosystème dès la stratégie de prototypage

1. Le scale-up vu à travers la stratégie de prototypage pour construire le rapport à l'écosystème ..	224
1.1. Le rapport à l'écosystème en phase de scale-up	225
1.2. Stratégies de construction du rapport à l'écosystème.....	225
1.2.1. <i>Le cas d'une évolution de l'écosystème</i>	225
1.2.2. <i>Le cas d'un écosystème stabilisé</i>	226
1.3. Le scale-up au prisme de la stratégie de prototypage	227
2. Une recherche-intervention pour analyser le passage à l'échelle d'une solution de valorisation du biogaz à partir de la stratégie de prototypage	229
2.1. Choix et justification du cas	229
2.2. Une recherche-intervention sous la forme d'une étude longitudinale	229
2.3. L'exploration des concepts alternatifs avec la théorie C-K.....	231
2.4. L'étude des preuves fournies par les prototypes	231
3. Une technologie de liquéfaction du biogaz au service du remplacement des énergies fossiles : la mission de SUBLIME Énergie.....	232
3.1. Motivations et objectifs à la création de SUBLIME Énergie	232
3.1.1. <i>La valorisation des gisements de biomasse méthanisable comme promesse de l'impact</i>	232
3.1.2. <i>Une solution de liquéfaction et d'épuration du biogaz pour les petites installations de méthanisation à distance du réseau de gaz : la représentation initiale de l'écosystème de SUBLIME Énergie.....</i>	233
3.2. Une startup deeptech issue du transfert d'une technologie du monde académique....	236
3.3. Un calendrier précis de maturation technologique pour passer à l'échelle.....	237
4. Évaluation et contrôle de la robustesse de la stratégie de prototypage pour l'élaboration du rapport à l'écosystème.....	240
4.1. Validité de la stratégie de prototypage pour un ensemble de concepts	240
4.2. Une pré-structuration du rapport à l'écosystème à partir de la définition de la stratégie de prototypage.....	244
4.2.1. <i>L'accumulation des apprentissages pour faire apparaître la multiplicité des rapports à l'écosystème</i>	244

4.2.2.	<i>L'enrichissement progressif des connaissances du rapport à l'écosystème à travers l'analyse des preuves apportées par la séquence des prototypes</i>	245
4.3.	Robustesse de la stratégie de prototypage pour une stabilisation du rapport à l'écosystème en phase de scale-up	254
4.3.1.	<i>Caractérisation de la stratégie de prototypage par la conception axiomatique pour la constitution du patrimoine de création</i>	254
4.3.2.	<i>Mise à l'épreuve de la robustesse de la stratégie de prototypage</i>	256

Les deux chapitres précédents ont montré à travers les deux études de cas associées, l'intérêt et les méthodes pour la constitution du patrimoine de création d'une startup deeptech en phase de scale-up. Le cas de la startup Agricool, à partir d'une analyse des développements successifs, a illustré comment l'entreprise stabilise des éléments de son architecture de conception tout en garantissant sa générativité. C'est le propre du patrimoine de création que de favoriser une capacité d'innovation préservatrice et générative : en s'appuyant sur l'architecture de conception stabilisée, l'entreprise est capable de déployer plus rapidement une gamme de produits. Positionnés sur plusieurs marchés avec des acteurs variés, les nouveaux produits font évoluer l'écosystème de la startup durant cette phase de scale-up. L'étude de la gestion de l'expansion fonctionnelle dans le cas de Poietis a ensuite montré la dimension progressive de la constitution du patrimoine de création. La stratégie de conception mise en place au sein de Poietis, assurant la généricité de la technologie, interroge aussi la construction du rapport de la startup avec son écosystème, qui est lui-même en transformation.

L'objet de ce chapitre est de comprendre comment une startup deeptech peut construire son rapport à l'écosystème pendant la phase de scale-up, dans le but de répondre à notre dernière question de recherche : **comment l'entreprise en phase de scale-up gère-t-elle son rapport à l'écosystème ?** Si cette formulation paraît quelque peu ambitieuse, nous ôtons dès à présent au lecteur ce doute en précisant que nous la traitons à partir d'une étude de la stratégie d'apprentissage portée par les prototypes successifs conçus pour réussir le scale-up. Nous cherchons à renforcer la stratégie de prototypage qui contribue à définir les écosystèmes sur lesquels la startup peut déployer sa technologie ; ce qui nous amène à reformuler la question de la façon suivante : **quels sont les moyens d'évaluation et de contrôle de la robustesse de la stratégie de prototypage ?**

Notre approche consiste à analyser à partir de la planification de la séquence des prototypes d'une startup deeptech comment celle-ci explore son rapport à l'écosystème. Nous montrons dans une première partie l'intérêt de la séquence des prototypes pour le passage à l'échelle et comment elle définit un certain rapport de la startup à son écosystème. La méthodologie de la récolte et de l'analyse des données est ensuite précisée (partie 2). Dans une troisième partie, nous détaillons le cas de SUBLIME Énergie, une startup deeptech ayant défini les étapes du passage à l'échelle à partir d'un calendrier précis de maturation technologique. Enfin, nous étudions le rôle des prototypes conçus et pensés par SUBLIME Énergie dans l'exploration du rapport à l'écosystème en s'appuyant à nouveau sur le cadre analytique de la conception axiomatique (partie 4). Nous mettons alors en lumière le rôle de la séquence des prototypes vis-à-vis du patrimoine de création.

1. Le scale-up vu à travers la stratégie de prototypage pour construire le rapport à l'écosystème

Dans cette première partie, nous justifions l'intérêt d'une étude de la séquence des prototypes pour la compréhension de la phase de scale-up, et plus particulièrement la construction du rapport à l'écosystème, vu comme un élément du patrimoine de création.

1.1. Le rapport à l'écosystème en phase de scale-up

Tout d'abord, nous entendons par « écosystème » l'ensemble des acteurs en lien avec l'entreprise (en l'occurrence la startup) et leurs interdépendances, conformément à la définition proposée par Adner (2017) : « *the alignment structure of the multilateral set of partners that need to interact in order for a focal value proposition to materialize* » (p.40). Les propriétés de l'écosystème, vu comme une structure, semblent donc a priori stables. Cette idée de stabilité des relations est déjà portée par Moore (2006) pour qui « *A business ecosystem definition is at its core a plan for how the contributions in the proposed system will be modularized, and what sort of firms will provide which element* » (p.33) : l'idée d'une planification des interactions laisse entendre une certaine maîtrise du rapport à l'écosystème.

Cependant, en cherchant à saisir les caractéristiques de l'environnement d'une organisation, Demil et al. (2018) montrent que les écosystèmes et les modèles d'affaires évoluent conjointement : « *Once defined, ecosystems, progressively constrain the business models [...]. But ecosystems also change through mutual interaction* » (p.1225). La modification du modèle d'affaires entraîne alors une reconfiguration de l'écosystème. M. Thomas (2021) va plus loin en complétant la notion d'écosystème avec la nature des interactions au sein de cet écosystème et le rôle de ces interactions dans la réussite de la mise sur le marché d'une innovation ; c'est cet ensemble qu'il nomme le milieu. Il démontre alors que la commercialisation d'une innovation, que l'on peut voir comme la rencontre d'un produit avec un marché, est le lieu de la conception de ce milieu. On en retient d'une part que la définition du modèle d'affaires fait apparaître l'écosystème et les interactions entre les acteurs ; et d'autre part qu'elle nécessite de fournir un effort de conception supplémentaire.

Face aux inconnus portant sur la technologie et le marché auxquels les startups deeptech sont soumises, la poursuite des explorations pendant la phase de scale-up induit des évolutions du modèle d'affaires, et avec lui, du rapport de la startup à l'écosystème. C'est pourquoi l'on se demande comment une startup deeptech en phase de scale-up construit ce rapport à l'écosystème.

1.2. Stratégies de construction du rapport à l'écosystème

La littérature semble opposer deux visions de l'écosystème. Soit l'écosystème est connu a priori, ce qui permet à la startup de définir un rapport stable. Soit l'écosystème connaît des reconfigurations, comme le modèle d'affaires. Cela entraîne deux stratégies de gestion différentes.

1.2.1. Le cas d'une évolution de l'écosystème

On avait déjà évoqué la question de l'évolution des modèles d'affaires dans le chapitre 2 (section 3.1.3) ; en soulignant leur évolution conjointe avec les écosystèmes, nous pouvons nous questionner sur le rôle des MVP et des pivots, déjà précisé vis-à-vis des modèles d'affaires dans le chapitre 2 (section 3.2), dans l'évolution du rapport à l'écosystème. En effet, à chaque nouveau test d'hypothèse réalisé par un MVP ou lors d'un pivot, le modèle d'affaires connaît une transformation de plus ou moins grande ampleur. Hampel et al. (2020) mettent d'ailleurs en garde contre les modifications des interactions avec les parties prenantes dans le cas des pivots et développent un

processus pour les identifier afin de gérer le rapport à l'écosystème. En outre, Duc et Abrahamsson (2016) vont jusqu'à considérer que les MVP jouent un rôle de transmission des connaissances entre l'entreprise et ses parties prenantes externes (comme les clients, les investisseurs, les mentors).

Ainsi, une première stratégie consiste à configurer progressivement le rapport à l'écosystème à partir des MVP voire des pivots réalisés en vue de la validation du modèle d'affaires. C'est la stratégie qui a été mise en œuvre par Agricoool, dont le cas a été présenté dans le chapitre 4. Dans le cas de Poietis (chapitre 5), le rapport à l'écosystème est lié au marché visé, la startup développant une technologie générique pour répondre à plusieurs marchés. La configuration du rapport à l'écosystème se fait aussi progressivement. De ces deux cas, nous avons pu mettre en évidence l'existence d'un patrimoine de création et l'effort à fournir pour sa constitution.

1.2.2. Le cas d'un écosystème stabilisé

Une seconde stratégie repose sur le principe d'une stabilité du rapport à l'écosystème. L'entreprise conçoit alors une séquence de prototypes pour fournir la solution technologique à l'écosystème. Cette stratégie, que nous appelons stratégie de prototypage, fait l'hypothèse d'un rapport stable à un écosystème connu. Elle consiste alors à augmenter progressivement la maturité technologique du produit défini vis-à-vis de cet écosystème.

Un des outils les plus courants pour évaluer ce gain en maturité est l'échelle TRL. C'est Mankins (1995) qui la démocratise, à travers la publication d'un bref article explicitant l'usage de cette unité de mesure au sein de la NASA. Il propose un résumé des niveaux de l'échelle, que nous reprenons dans sa totalité ci-après (Mankins, 1995, p.1) :

« TRL 1	<i>Basic principles observed and reported</i>
TRL 2	<i>Technology concept and/or application formulated</i>
TRL 3	<i>Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof-of-concept</i>
TRL 4	<i>Component and/or breadboard validation in laboratory environment</i>
TRL 5	<i>Component and/or breadboard validation in relevant environment</i>
TRL 6	<i>System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment (ground or space)</i>
TRL 7	<i>System prototype demonstration in a space environment</i>
TRL 8	<i>Actual system completed and "flight qualified" through test and demonstration (ground or space)</i>
TRL 9	<i>Actual system "flight proven" through successful mission operations »</i>

On note que dès le TRL 5, les composants du prototype sont validés dans un environnement qualifié de pertinent : l'environnement dans lequel le système global va s'insérer est donc défini a priori. Ainsi, la construction d'une séquence de prototypes basée sur l'échelle TRL laisse entrevoir une forte dépendance entre les prototypes conçus et la définition de l'écosystème de la startup.

Cette échelle de maturité technologique sert aussi lors de l'élaboration des feuilles de route technologique (*technology roadmap* dans la littérature anglophone), dont l'objectif est de réussir à amener le produit d'un niveau de TRL bas au niveau le plus élevé. Ces feuilles de route peuvent être utilisées à plusieurs niveaux (celui de l'organisation interne d'une entreprise établie, à l'échelle d'une industrie, sur le plan national) mais aussi dans le cas de startups comme le suggèrent Garza Ramos

et al. (2022, p.15) à propos de leur cas d'étude : « *This chart outlines how the company wants to develop the prototype (TRL 3/4) to a complete and qualified product (TRL 7/8) ready for the market.* ». Les auteurs voient dans la feuille de route technologique un moyen pour les startups de commencer par « *the exploration of further technology and the building up of necessary knowledge* » (p.15) et de jouer le rôle d'un outil de gestion des connaissances pour « *identify product and technology gaps* », ce que l'on peut rapprocher d'une situation de double inconnu sur le marché et la technologie. Cela amène à considérer une modification du marché dans la feuille de route, et donc de l'écosystème autour de la technologie. La maturité technologique est alors dépendante du rapport de la startup à son écosystème.

Cogez et al. (2013) prennent l'exemple de l'industrie des semi-conducteurs pour illustrer la conception par un ensemble d'acteurs d'une feuille de route technologique en situation de double inconnu. L'organisation de l'industrie des semi-conducteurs autour d'un inconnu commun conduit vers « *a collective effort to generate a new, additional shared body of expectations which would enable further collaboration.* » (p.11). On peut voir dans ce regroupement des acteurs pour concevoir une feuille de route et accompagner son évolution une sorte de stratégie de prototypage non plus basée sur le seul produit rencontrant son marché mais également sur l'organisation de l'écosystème pour mettre au point la technologie et définir le marché. On se rapproche ainsi de la définition proposée par Peltoniemi et Vuori (2004) des *business ecosystems* qui forment « *a dynamic structure which consists of an interconnected population of organizations* » (p.13).

Par conséquent, nous interrogeons le rapport entre les prototypes et la construction de l'écosystème, et plus particulièrement comment les apprentissages réalisés à travers le plan de maturation technologique amènent à réviser le rapport que la startup entretient avec l'écosystème défini initialement. Autrement dit, nous nous demandons comment la séquence des prototypes permet d'enrichir les connaissances de la startup sur les attentes de l'écosystème. Ayant précédemment souligné d'une part la capacité des startups deeptech à développer des technologies génériques, c'est-à-dire s'intégrant dans plusieurs écosystèmes, et d'autre part la persistance d'efforts de conception lors de la phase de scale-up, nous questionnons la robustesse de la stratégie de prototypage dans le cas des startups deeptech.

1.3. Le scale-up au prisme de la stratégie de prototypage

Afin de garantir la pertinence de l'étude de la stratégie de prototypage pour la compréhension de la phase de scale-up, on propose de vérifier que la construction d'une séquence de prototypes permette de passer à l'échelle. Pour cela, nous nous intéressons à la stratégie de prototypage classique dans le domaine du génie chimique ou génie des procédés.

Bien que le terme de scale-up soit originaire du monde du numérique, comme présenté dans la section 2.1 du chapitre 2, son utilisation est en effet bien plus fréquente dans le domaine du génie des procédés. L'un des enjeux principaux de la chimie industrielle est en effet de transposer des synthèses chimiques réalisées en laboratoire dans des contextes industriels, ce qui se traduit par la mise en œuvre de ces synthèses dans des réacteurs aux volumes significativement plus importants. Afin de se rendre compte de la très forte proportion de publications scientifiques, abordant la thématique du scale-up dans les domaines ayant des enjeux de passage à l'échelle de

procédés, nous réalisons une recherche bibliographique sur la base de données Scopus⁴⁹. À partir des résultats fournis sur le nombre de documents par domaine, nous récapitulons ces données dans la Figure 34. Les domaines scientifiques en lien avec la chimie sont mis en évidence en jaune sur le graphique, tandis que ceux proches des sciences de gestion sont en orange.

En génie des procédés, le scale-up apparaît comme étant lié au changement d'échelle du réacteur. Une recherche sur la base Scopus fournit d'ailleurs 3795 résultats pour l'association entre les termes de scale-up et de *batch*⁵⁰. Cela conduit à une nouvelle considération du scale-up à partir d'une étude des prototypes successifs permettant de passer d'une solution à petite échelle, en laboratoire, à une solution à l'échelle industrielle. L'étude de la séquence de prototypes ainsi construite peut raisonnablement être considérée comme un moyen d'affiner notre compréhension du scale-up.

**PARTS DES DOCUMENTS CONTENANT LE TERME DE "SCALE-UP"
SELON LES DOMAINES**

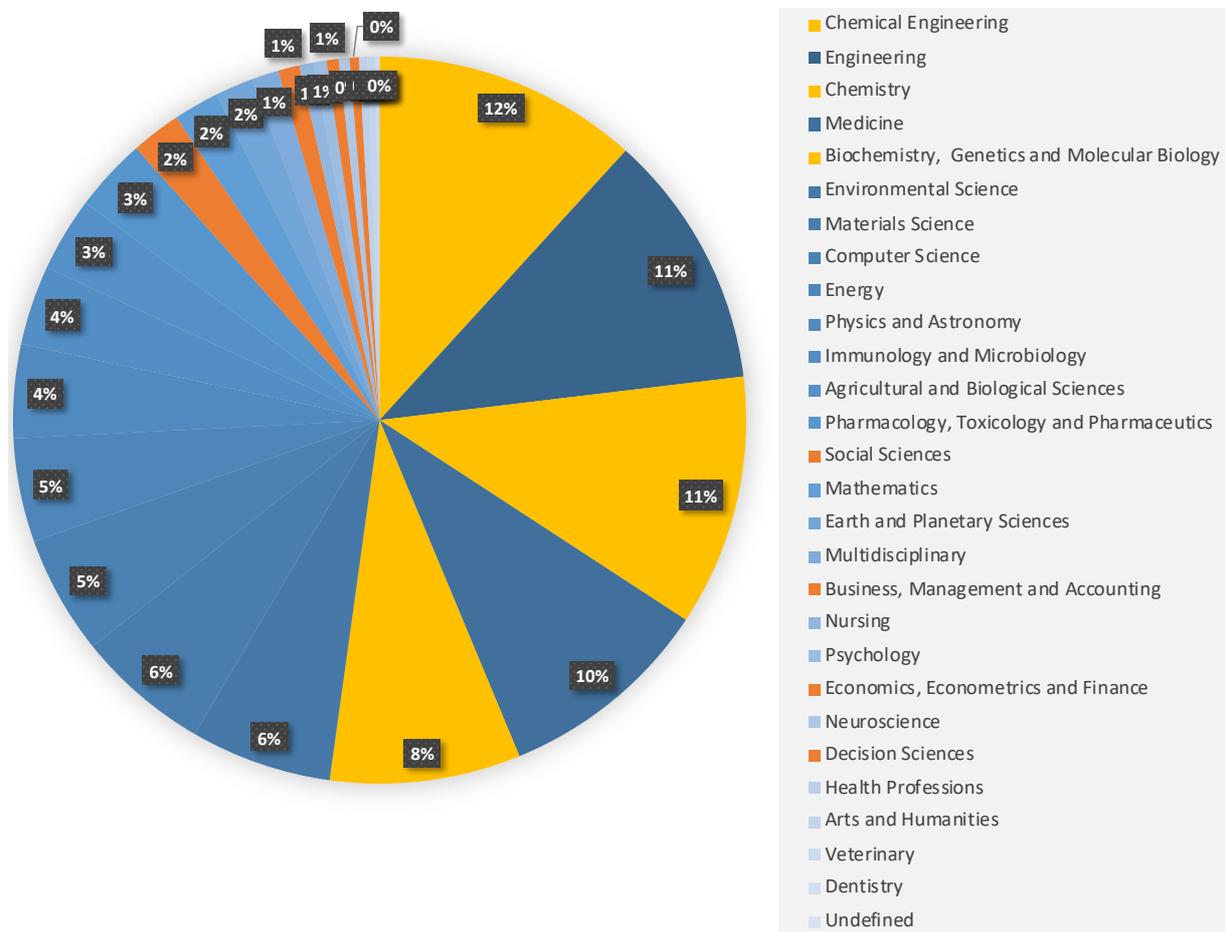


Figure 34. Représentation de la proportion des publications relatives au scale-up selon le domaine scientifique des revues auxquelles elles sont associées

⁴⁹ La recherche est réalisée en octobre 2023 dans les champs titre, résumé, mots-clefs pour le seul terme de "scale-up" qui renvoie 59161 résultats.

⁵⁰ La requête exacte dans les champs titre, résumé, mots-clefs, faite en octobre 2023, est : "scale-up" AND "batch".

2. Une recherche-intervention pour analyser le passage à l'échelle d'une solution de valorisation du biogaz à partir de la stratégie de prototypage

2.1. Choix et justification du cas

La mise en évidence des deux stratégies de gestion du rapport à l'écosystème soulève la question de leur pertinence dans le cas de startups deeptech. L'étude d'Agricool se positionne plutôt sur une stratégie d'élaboration progressive du rapport à l'écosystème à travers les MVP successifs. C'est pourquoi le cas d'une startup ayant choisi une stratégie de prototypage basée sur une hypothèse forte concernant la structure de l'écosystème peut être un bon complément dans notre recherche de la compréhension de ce que la startup construit au cours de la phase de scale-up. En particulier, c'est un moyen de saisir la gestion des évolutions potentielles de l'écosystème et de qualifier la stratégie de prototypage à l'aune de l'enjeu du maintien de la généricité de la technologie.

Une dernière recherche-intervention a été mise en œuvre en ce sens auprès d'une startup deeptech disposant d'un calendrier de maturation technologique détaillé, SUBLIME Énergie. La recherche-intervention débute après la première étape du calendrier de maturation technologique, c'est-à-dire au début du passage à l'échelle défini par la séquence des prototypes. Les données empiriques sont donc limitées et contingentes à la réalité des problématiques rencontrées par la startup ayant dû ralentir son développement.

En outre, les enjeux thermodynamiques auxquels la startup fait face justifient la pertinence du lien entre la stratégie de prototypage et l'étude du scale-up : il s'agit bien de passer d'un procédé fonctionnel en laboratoire à un procédé réalisé dans des conditions industrielles, pour répondre aux besoins d'un marché identifié. Au-delà des aspects techniques inhérents aux prototypes, nous nous intéressons aussi à la définition et à l'évolution des acteurs de l'écosystème et de leurs interactions, configurés par les prototypes.

2.2. Une recherche-intervention sous la forme d'une étude longitudinale

Les interactions avec SUBLIME Énergie se sont déroulées en suivant le développement de la startup sur une période de plus de deux ans. Elles ont eu lieu en très grande majorité dans le cadre d'entretiens réguliers avec le directeur général, Nicolas Bréziat.

La prise de contact a été réalisée le 19 janvier 2021 dans le cadre d'un webinaire sur les entreprises à mission organisé par la Direction Deeptech de Bpifrance ; le président de SUBLIME Énergie, Bruno Adhémar, témoignait de son expérience en tant que dirigeant d'une société à mission. L'étude longitudinale a débuté dès le 1^{er} février 2021 et s'est poursuivie jusqu'au 20 avril 2023. Les données récoltées pour l'étude du cas sont issues de sources secondaires, fournies par SUBLIME Énergie ou internes à Bpifrance, et surtout, de façon très majoritaire, des différentes interactions avec la startup dans le cadre d'entretiens réguliers.

Les modalités d'entretiens ont été variées et se sont adaptées aux contraintes liées aux restrictions dues à la pandémie de la Covid-19 (plusieurs entretiens au début de la recherche ont été réalisés à distance). La majorité d'entre eux ont été réalisés dans les locaux de SUBLIME Énergie et deux visites de l'installation dans le laboratoire partenaire ont été organisées. Cela a aussi été propice

à l'interaction avec d'autres collaborateurs de SUBLIME Énergie, à différents postes, bien que les échanges soient restés très ponctuels et informels. Les interactions sont résumées dans le Tableau 29 ci-après : elles ont eu lieu dans différents contextes et représentent 35 heures et 15 minutes d'échanges réparties sur 28 rencontres. Entre autres, deux rencontres ont eu lieu sous la forme de réunion avec Storengy, filiale d'Engie ayant investi dans SUBLIME Énergie (dans ces cas, la doctorante avait une position d'observatrice non participante).

Tableau 29. Interactions avec SUBLIME Énergie : interlocuteurs et format

<i>Date</i>	<i>Interlocuteurs</i>	<i>Fonctions</i>	<i>Format</i>	<i>Durée</i>
01/02/2021	Bruno Adhémar	Président et co-fondateur	entretien en visioconférence	1h30
19/02/2021	Bruno Adhémar ; Nicolas Bréziat ; Tristan Dollé	Président et co-fondateur ; directeur général et co-fondateur ; directeur financier	entretien en visioconférence	1h05
12/03/2021	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	entretien en visioconférence	1h
08/04/2021	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	entretien en visioconférence	55 min
16/04/2021	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	entretien en visioconférence	1h15
28/04/2021	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	entretien en visioconférence	1h05
05/05/2021	Émilie Razy ; Arnaud Demange ; Claudio Bucella ; Mathias Martin ; Bruno Adhémar ; Nicolas Bréziat	2 représentants de Storengy (investisseur) ; 1 représentant d'Azola (startup en lien avec Storengy sur le stockage du biogaz) ; mentor de SUBLIME Énergie ; président ; directeur général	réunion	1h30
25/05/2021	Bruno Adhémar ; Nicolas Bréziat	Président et co-fondateur ; directeur général et co-fondateur	entretien en visioconférence	55 min
28/05/2021	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	entretien	30 min
10/06/2021	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	réunion de travail sur le C-K	2h30
10/06/2021	Émilie Razy ; Arnaud Demange ; Bruno Adhémar ; Nicolas Bréziat	2 représentants de Storengy (investisseur) ; président ; directeur général	réunion	2h
23/06/2021	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	entretien	30 min
21/09/2021	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	entretien	1h30
12/10/2021	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	entretien	1h30
15/11/2021	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	entretien	1h30

30/11/2021	Nicolas Bréziat puis avec Bruno Adhémar et Pierre- Yves Bertin	Directeur général et co- fondateur ; président et co- fondateur ; entrepreneur en Guadeloupe	entretien et réunion	2h
05/01/2022	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	entretien	1h30
16/02/2022	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	entretien	30 min
24/02/2022	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	entretien	1h30
28/03/2022	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	entretien	1h30
25/04/2022	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	visite de l'installation	2h
27/07/2022	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	entretien	1h15
12/09/2022	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	dîner	2h
04/10/2022	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	déjeuner et visite de l'installation	2h
13/12/2022	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	déjeuner	30 min
07/02/2023	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	appel téléphonique	30 min
09/03/2023	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	déjeuner	30 min
20/04/2023	Nicolas Bréziat	Directeur général et co-fondateur	déjeuner	15 min

2.3. L'exploration des concepts alternatifs avec la théorie C-K

Si la théorie C-K a déjà été utile dans un but de formaliser des raisonnements de conception dans la section 2.3.2 du chapitre 5, nous y avons recours cette fois-ci pour explorer les concepts alternatifs à la solution initiée par SUBLIME Énergie. Nous rejoignons sur ce point les travaux de Le Masson et al. (2019) sur la conception de la décision dans l'inconnu et l'intérêt de l'exploration pour générer de nouveaux concepts.

Le référentiel C-K présenté dans la dernière partie de ce chapitre a été construit et validé avec le directeur général Nicolas Bréziat. Ce référentiel a plus particulièrement été au centre des échanges ayant eu lieu entre juin et octobre 2021. Dans un but d'actualisation de la base de connaissances, quelques modifications ont ensuite été apportées en juin 2022.

La réalisation d'un référentiel C-K est utile : d'une part pour positionner SUBLIME Énergie vis-à-vis des autres acteurs de l'écosystème (en particulier des startups concurrentes), et d'autre part pour mettre en évidence des voies de conception alternatives et évaluer leur pertinence vis-à-vis des interactions mises en jeu. C'est un premier moyen de vérification de la robustesse de la stratégie de prototypage.

2.4. L'étude des preuves fournies par les prototypes

De récents travaux sur les preuves de concept (PoC) ont montré la double preuve réalisée par les PoC (Jobin et al., 2021) : à savoir une preuve du connu, qui correspond à une expérimentation dans le but de valider des connaissances, et une preuve d'inconnu, pour laquelle

l'expérimentation conduit à formuler une nouvelle hypothèse qui porte sur des variables inconnues. Cette précision avait déjà été faite dans la section 3.2.2 du chapitre 2.

L'étude menée sur les prototypes de SUBLIME Énergie consiste à mettre en évidence ces deux types de preuve pour chacun d'entre eux. En sus des preuves de connu et d'inconnu, la conception des prototypes fait aussi apparaître ce qui ne pourra pas être testé à chaque stade de la maturation technologique. C'est ce que nous nommerons dans la suite « absence de preuve ». Nous comparerons ensuite ces preuves, leur nature et les évolutions entre les prototypes afin de mettre en évidence les effets du passage à l'échelle sur la conception de la stratégie de prototypage.

Les preuves de connu et d'inconnu détaillées sont également utiles pour mettre en évidence ce qui est relatif à l'écosystème. En particulier, nous traduirons ces différentes preuves sous la forme de fonctionnalités pour saisir la robustesse de la stratégie de prototypage vis-à-vis de l'écosystème à partir du formalisme de la conception axiomatique (matrices de Suh).

3. Une technologie de liquéfaction du biogaz au service du remplacement des énergies fossiles : la mission de SUBLIME Énergie

3.1. Motivations et objectifs à la création de SUBLIME Énergie

3.1.1. La valorisation des gisements de biomasse méthanisable comme promesse de l'impact

Créée en 2019 par Bruno Adhémar et Nicolas Bréziat, deux ingénieurs ayant fait leur première partie de carrière au sein de grands groupes, SUBLIME Énergie s'appuie sur une technologie de liquéfaction et de stockage du biogaz développée par le Centre Efficacité énergétique des Systèmes de Mines Paris – PSL (CES). C'est à l'issue du Mastère Spécialisé Second Life, porté et présenté par Denis-Rémis et Heully (2020) et qui a été suivi par les deux co-fondateurs, que la startup a vu le jour en partenariat avec le CES. Le premier brevet portant un procédé de stockage du biogaz appartient en effet au CES. Si plusieurs concepts pouvaient être définis dès les premiers résultats techniques, c'est vers le stockage du biogaz pour favoriser la décentralisation de la production que les co-fondateurs se sont tournés au moment de la création de l'entreprise. La rencontre avec un agriculteur plus particulièrement intéressé par l'opportunité technique en a été l'élément déclencheur. Ainsi, la société s'est donnée comme objectif de valoriser le biogaz issu des gisements de biomasse méthanisable non encore utilisés, ce qui correspond notamment à la valorisation du biogaz issu des petites installations agricoles éloignées des réseaux. Cette description du projet de SUBLIME Énergie donne déjà une première représentation de l'écosystème de la startup.

La promesse de l'impact prend une forme particulière au sein de SUBLIME Énergie. En effet, dès sa création, l'entreprise a décidé de se constituer sous la forme d'une société par actions simplifiée avec la qualité de société à mission. Cette innovation portée par les travaux en gestion de

Levillain (2015) et introduite dans le droit en France par la loi PACTE⁵¹ en mai 2019 permet à des entreprises volontaires d'adjoindre au but lucratif une finalité à but social ou environnemental dans ses statuts, appelée raison d'être. La loi PACTE va plus loin encore en proposant la qualité de société à mission qui introduit une obligation de contrôle du respect de son engagement. C'est le choix qu'ont fait les dirigeants de SUBLIME Énergie, qui ont ensuite mis en place un comité de mission et défini leur raison d'être comme suit : « Contribuer à limiter les effets du changement climatique en accélérant la transition énergétique vers des énergies à émission bas carbone, en œuvrant notamment à la promotion des gaz renouvelables en remplacement des énergies fossiles, afin de limiter les conséquences de l'effet de serre sur le climat. »⁵² La raison d'être est traduite en trois missions par SUBLIME Énergie, elles aussi introduites dans les statuts :

- 1) « Le développement de l'utilisation du biogaz pour substituer les gaz renouvelables aux énergies fossiles ;
- 2) Le développement de l'activité et de l'économie circulaire dans les territoires via l'utilisation du biogaz ;
- 3) La valorisation de la recherche dans ces domaines. »

On peut déjà noter que la mission de SUBLIME Énergie est suffisamment générative, comme le plaide Lévêque (2022) lorsqu'il s'agit de bien formuler une mission, pour ne pas restreindre la solution technique à une unique modalité de valorisation du biogaz. Par exemple, l'injection de biométhane issu du biogaz dans le réseau gazier et la transformation du biométhane en carburant sous la forme de bioGNL (gaz naturel liquéfié)⁵³ sont deux modes de valorisation du biogaz compatibles avec les engagements de la startup. C'est ce que nous détaillerons par la suite.

3.1.2. Une solution de liquéfaction et d'épuration du biogaz pour les petites installations de méthanisation à distance du réseau de gaz : la représentation initiale de l'écosystème de SUBLIME Énergie

SUBLIME Énergie développe une technologie de liquéfaction du biogaz en vue de sa collecte et de son transport, à laquelle s'ajoute une technologie d'épuration du biogaz liquéfié pour la récupération et la valorisation des composants du biogaz. Nous détaillons dans les paragraphes suivants les problématiques rencontrées dans le cadre de la valorisation du biogaz et indiquons le positionnement de la technologie de SUBLIME Énergie. Nous précisons enfin la représentation initiale de l'écosystème de la startup, sur laquelle cette dernière se base pour définir sa stratégie de prototypage.

Le biogaz est en effet un mélange composé en très large majorité de dioxyde de carbone (CO₂) et de méthane (CH₄). Le reste des composants du biogaz, ou co-produits, sont présents en très faibles quantités et sont considérés comme des impuretés, ce qui entraîne une étape de purification du biogaz. Par ailleurs, la présence parmi ces co-produits de sulfure d'hydrogène (H₂S), inflammable et très toxique, ainsi que la forte proportion de méthane, également inflammable,

⁵¹ Plan d'action pour la croissance et la transformation des entreprises

⁵² <https://sublime-energie.com/lentreprise/>

⁵³ On notera que l'abréviation GNV signifie bien « gaz naturel pour véhicules », et non « gaz naturel vert » ; ce qui justifie la précision ajoutée par l'emploi du préfixe « bio » pour signifier son origine, à savoir la production à partir de la méthanisation.

induisent des contraintes opérationnelles lors du traitement du biogaz : les dispositifs de traitement doivent être placés à l'extérieur et respecter la réglementation européenne ATEX (atmosphères explosives).

La production du biogaz est réalisée au sein de méthaniseurs, autrement nommés digesteurs, dans lesquels a lieu une décomposition de matières organiques en l'absence de dioxygène. C'est ce que l'on appelle un procédé de digestion anaérobie. Les matières organiques qui servent à la production de biogaz sont généralement des déchets issus de l'agriculture ou de l'industrie, ou bien elles proviennent des stations d'épuration pour le traitement des eaux (STEP). Soumise à une réglementation stricte, la production de biogaz peut aussi être réalisée à partir de matières organiques issues directement de l'agriculture et considérées comme de la culture alimentaire. Cette variabilité sur l'origine et la nature des intrants exerce une influence sur le taux de méthane du biogaz produit : par exemple, les intrants riches en sucre, en amidon ou en matière grasse ont un fort pouvoir méthanogène. Il existe par ailleurs un deuxième produit de la méthanisation, le digestat, qui correspond aux restes (solides et liquides) de la décomposition des matières organiques. Le digestat possède un pouvoir fertilisant, ce qui fait qu'il est régulièrement réutilisé pour l'épandage.

Les sources de production du biogaz sont diverses, par leur nature et par leur taille, et réparties sur le territoire français. En particulier de nombreuses petites installations sont très dispersées et éloignées des réseaux (gazier et routier notamment). La question de la valorisation de ce biogaz se pose. Dans ces situations, une partie du biogaz produit est souvent réutilisée en cogénération, c'est-à-dire qu'il sert à produire de l'électricité et de la chaleur simultanément. Une autre partie peut être injectée dans le réseau gazier lorsque cette manipulation est rendue possible, ce qui reste rare. La solution la plus répandue dans le cas de petites installations agricoles situées à distance de points d'injection dans le réseau gazier est le transport des intrants par la route vers une unité de méthanisation de taille plus importante. Les nuisances occasionnées par le transport en camions de grandes quantités de fumier sont bien réelles. Cette méthode est d'autant plus décriée qu'elle est fortement consommatrice en énergie pour réaliser le transport de cette charge alors que la densité énergétique du fumier est faible (le rapport entre le poids transporté et la quantité de biogaz produit est très défavorable)⁵⁴.

La principale difficulté pour le transport du biogaz réside dans l'impossibilité de l'obtenir sous une forme liquide, alors que c'est dans cet état que la densité énergétique transportée est optimisée (c'est-à-dire la quantité d'énergie contenue dans le biogaz par rapport au volume occupé). En effet, les deux composants principaux du biogaz ne présentent pas des diagrammes de changement de phase compatibles. Bien que le diagramme de changement de phase d'un mélange lui soit propre, les tentatives de liquéfaction du biogaz échouent, le CO₂ devenant solide avant que le CH₄ ne se soit liquéfié. Le comportement thermodynamique du biogaz ne permet donc pas d'obtenir un état liquide par une simple action sur les conditions de pression et de température. L'innovation technologique portée par SUBLIME Énergie à partir des travaux de recherche du CES

⁵⁴ Pour illustrer le propos avec quelques ordres de grandeur, le lecteur peut avoir en tête que la combustion d'un mètre cube de méthane dans les conditions normales de pression et de température (1 bar, 0°C) libère une énergie de 36 MJ, ce qui correspond à la combustion de 1,15 L d'essence. Le mètre cube de méthane initial est issu de la décomposition d'environ 32 kg de fumier.

repose sur l'ajout d'un troisième composant, de la famille des hydrocarbures, au mélange formé par le CO_2 et le CH_4 . Le comportement thermodynamique de l'ensemble constitue un mélange majoritairement liquide avec une partie gazeuse dans des conditions de pression et de température particulières (20 bar, -80°C), qui restent compatibles avec un transport dans un camion-citerne. Dans la suite du propos, on nommera « agent de portage » le nouveau composant ajouté au biogaz et « mélange ternaire » l'ensemble formé par le biogaz et l'agent de portage.

Rendre possible le transport de biogaz en dehors des gazoducs est une avancée majeure pour la valorisation du biogaz produit par des petites unités de méthanisation disposées à distance du réseau gazier. L'objectif de SUBLIME Énergie est donc de proposer une solution de liquéfaction du biogaz à destination des plus petites exploitations dont les quantités de biogaz fournies ne sont pas suffisantes pour déployer les infrastructures de raccordement au réseau de gaz. Le biogaz ainsi collecté doit être traité au niveau d'un hub regroupant la production d'une dizaine d'exploitations en vue d'une valorisation conjointe et selon plusieurs modalités comme le carburant ou le stockage. C'est également au niveau du hub que la deuxième étape de traitement du biogaz a lieu : l'épuration du biogaz liquéfié consiste à séparer les différents composants du mélange en vue de leur valorisation. Le biométhane récupéré peut notamment être injecté dans le réseau ou transformé en carburant ; SUBLIME Énergie soulève aussi la question de la valorisation du CO_2 récupéré, ce qui sera détaillé ultérieurement. L'agent de portage est lui aussi séparé et réutilisé, ce qui permet en outre de limiter la consommation énergétique pour son refroidissement : il est réinjecté déjà à basse température dans le camion-citerne, ce qui limite l'effort de refroidissement supplémentaire à fournir au niveau de l'exploitation. La Figure 35 fournit un schéma du projet abouti de SUBLIME Énergie, faisant apparaître plusieurs acteurs de son écosystème : les producteurs de biogaz (fermes et STEP) vus comme des sources éloignées des réseaux gaziers, les marchés atteignables compte-tenu des dispositifs de valorisation des gaz (biométhane injecté, GNL, bio CO_2) présents au niveau du hub et le dispositif de transport associé à ses contraintes réglementaires propres. Les grands principes de la représentation de l'écosystème contenue dans cette schématisation perdurent depuis l'élaboration du calendrier de maturation technologique, présenté ultérieurement.

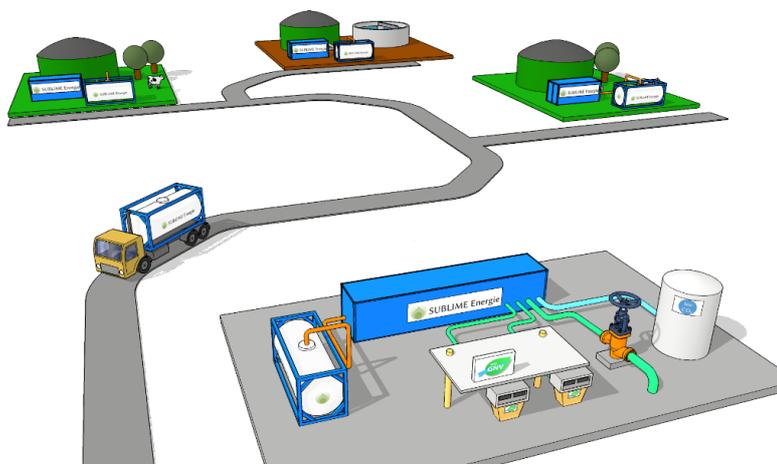


Figure 35. Schématisation de la chaîne de valorisation du biogaz transporté sous forme liquide entre les unités de méthanisation et le hub de traitement

Source : © SUBLIME Énergie

3.2. Une startup deeptech issue du transfert d'une technologie du monde académique

Issue du Mastère Spécialisé Second Life dispensé à Mines Paris – PSL dans le but de favoriser le transfert de technologie en mettant en relation des entrepreneurs potentiels avec des chercheurs, SUBLIME Énergie est par essence une startup deeptech. D'ailleurs, on retrouve bien SUBLIME Énergie parmi les startups de l'observatoire des startups deeptech de Bpifrance⁵⁵. Ces premiers éléments de preuve n'exemptent pas d'une investigation plus poussée concernant SUBLIME Énergie et son rapport aux caractéristiques des startups deeptech présentées dans le premier chapitre :

- S'il est encore un peu tôt pour considérer que la croissance de SUBLIME Énergie est limitée et que sa durée d'existence est plus élevée que la moyenne, on peut tout de même noter que l'entreprise est restée à une taille raisonnable (autour d'une dizaine d'employés) depuis sa création.
- En mars 2021, l'entreprise a levé un million d'euros et une deuxième levée de fonds a été planifiée pour 2023 en vue du lancement du troisième prototype.
- Dans un premier temps, les efforts de conception portent sur le déploiement de la solution dans un contexte réglementaire français, ce qui n'exclut pas un élargissement ultérieur puisque le marché de la valorisation du biogaz des petits gisements de biomasse méthanisable est international.
- Dans le cas de la valorisation du CO₂ issu de l'épuration du biogaz, le marché d'un « bioCO₂ » n'existe pas encore. Par ailleurs, la mise en place du hub où se retrouvent les différents acteurs de la valorisation du biogaz (de sa production à sa commercialisation) nécessite une longue préparation.
- Les difficultés techniques rencontrées au cours du développement soulignent l'incertitude intrinsèque au transfert de technologie.
- Débutés dès la création en 2019, les efforts de R&D se poursuivent et doivent être renforcés par la prochaine levée de fonds prévue.
- La technologie développée par SUBLIME Énergie est issue des travaux de recherche menés au CES au sein de Mines Paris – PSL : il s'agit bien d'un transfert de technologie entre le monde académique et le monde industriel. La présence du deuxième prototype sur le site du CES indique que les relations avec le centre de recherche sont durables.
- Le calendrier de maturation technologique, présenté dans la section suivante, ne suit pas un schéma de tests successifs d'hypothèses sur le produit final, mais présente plutôt une forme de passage à l'échelle des prototypes successifs ; ce qui, dans une situation où des connaissances techniques sont nécessaires, ne permet pas de conclure quant à la pertinence de la méthodologie du *Lean Startup*.
- La mission de SUBLIME Énergie, explicitée dans la section 3.1.1, met en évidence la volonté de substitution du biogaz aux énergies fossiles, dont l'impact sur le changement climatique est avéré.

⁵⁵ SUBLIME Énergie est intégrée à l'observatoire des startups deeptech de Bpifrance : https://observatoire.lesdeeptech.fr/companies/sublime_energy

- SUBLIME Énergie dispose d'une licence exclusive d'exploitation du brevet de liquéfaction de biogaz déposé par le CES. Un deuxième brevet portant sur la séparation des composés du biogaz a été déposé par SUBLIME Énergie.

La quasi-totalité des critères étant vérifiée, on en conclut légitimement qu'il s'agit d'une startup deeptech. Nous justifions ensuite la pertinence de ce cas pour l'étude de la phase de scale-up.

3.3. Un calendrier précis de maturation technologique pour passer à l'échelle

Le passage à l'échelle de SUBLIME Énergie correspond à une définition du scale-up plus proche de celle employée dans le monde de la chimie ou de la pharmaceutique que de celle en entrepreneuriat. La terminologie de scale-up peut en effet être utilisée pour décrire un changement de dimensions propre à un processus industriel : concrètement, il s'agit d'agrandir le réacteur, qui est le lieu des réactions chimiques. La technologie de SUBLIME Énergie reposant sur un système thermodynamique, on retrouve ces mêmes enjeux d'agrandissement du réacteur. Le calendrier de maturation technologique défini par SUBLIME Énergie prend d'abord en considération le changement d'échelle de l'architecture du système de liquéfaction et d'épuration, sans toutefois mettre de côté l'élaboration du modèle d'affaires. Les différents prototypes avec leurs objectifs détaillés sont récapitulés dans le Tableau 30 suivant. L'échelle TRL est également précisée pour qualifier le niveau de maturité atteint par chaque prototype. Les partenaires principaux, définissant les contours de l'écosystème de la startup, sont également explicités. Les objectifs prévisionnels des prototypes ont pu être précisés au cours du temps. Les éléments correspondant à la définition du calendrier de maturation technologique à la date du 1^{er} février 2021 (à l'occasion de l'entretien de lancement de l'étude) sont indiqués en italique lorsqu'ils diffèrent de la définition la plus actuelle (par rapport à l'étude, il s'agit d'avril 2023). On notera déjà que la grande précision initiale du calendrier de maturation technologique ne suffit pas à une anticipation complète des attentes envers chaque prototype : l'acquisition progressive des connaissances liée à la réalisation de la séquence des prototypes le fait évoluer.

La lecture de ce calendrier de maturation technologique laisse déjà apparaître des éléments de la structuration progressive du rapport de SUBLIME Énergie à son écosystème. Sur le plan technique, les augmentations progressives des débits de biogaz définissent les plages de validité de la solution technologique développée. À partir de ces plages de fonctionnement, plusieurs cas d'usage peuvent être définis. Par exemple, le prototype CHARLIE valide la compatibilité de la solution avec les unités de méthanisation à la ferme : dans son rapport à l'écosystème, SUBLIME Énergie cible donc les exploitations agricoles disposant d'un méthanisateur comme sources de production du biogaz, à commencer par l'exploitation GAZEA située à Plélo dans les Côtes-d'Armor. De même, dans la conception du prototype DELTA, la précision sur les tonnages de bioGNL et de bioCO₂ produits par an fournit des indications quant aux usages et aux acteurs à engager pour les mettre en œuvre (comme la vente de bioGNL dans une station-service au niveau du hub pour des poids-lourds). Il faut par ailleurs noter que la définition des différents prototypes s'appuie systématiquement sur un travail de simulation numérique, précédant leur conception.

Tableau 30. Calendrier de maturation technologique de SUBLIME Énergie

<i>Nom</i>	<i>Objectif</i>	<i>Détails</i>	<i>Partenaires de l'écosystème</i>	<i>Date</i>
ALPHA (TRL 3)	Réaliser une preuve de concept de la liquéfaction	Faibles débits de biogaz de synthèse	Centre Efficacité énergétique des Systèmes, Mines Paris – PSL (CES)	2020
<i>BRAVO (TRL 5)</i>		<i>Échelle 1/10^e par rapport à une unité de méthanisation à la ferme (soit ~10 Nm³/h pour le débit de biogaz de synthèse)⁵⁶</i>		2021
BRAVO (TRL 5)	Démontrer la liquéfaction et l'épuration du biogaz à l'échelle d'un méthaniseur	Débit de biogaz de synthèse correspondant à une petite unité de méthanisation (30 à 50 Nm ³ /h) dans un contexte de laboratoire	CES et acteurs industriels (réseau de fournisseurs)	2021 - 2022
<i>CHARLIE (TRL 7)</i>				2022
CHARLIE (TRL 7)	Réaliser le procédé industriel (avec simulation du transport) en conditions réelles dans une installation agricole	Débit de biogaz issu d'une unité de méthanisation à la ferme (110 à 120 Nm ³ /h)	Exploitation agricole GAZEA (Plélo, Côtes-d'Armor)	2024
<i>DELTA (TRL 9)</i>		<i>Vente de bioGNC (en plus du bioGNL) Vente du bioCO₂ pour les serres agricoles</i>		2023
DELTA (TRL 9)	Créer le premier hub de traitement du biogaz collecté au sein d'une dizaine d'exploitations	Débit de biogaz ~10 fois plus importants que le prototype CHARLIE pour une production au niveau du hub de 3000 tonnes de bioGNL et 5500 tonnes de bioCO ₂ par an	Exploitations agricoles, agglomération, syndicat départemental de l'énergie, station-service	2026

SUBLIME Énergie présente dans une moindre mesure quelques caractéristiques conformes aux indices du démarrage d'une phase de scale-up présentés dans le Tableau 7 au chapitre 2 : la présence d'investisseurs au sein de la gouvernance ainsi que le codéveloppement des prototypes avec le CES (pour ALPHA et BRAVO) puis avec des exploitations agricoles dotées de méthaniseurs

⁵⁶ Les débits sont exprimés en normo mètre cube par heure (Nm³/h), ce qui correspond à la quantité de gaz contenue dans 1 m³ dans les conditions normales de pression et de température (1 bar, 0°C) produit en une heure.

(pour CHARLIE et DELTA) sont déjà une justification de ce début de scale-up. Le fait d'avoir remporté dès 2020 le concours i-Nov⁵⁷ est aussi un indice du potentiel de cette solution technologique. Les structures d'accompagnement par lesquelles SUBLIME Énergie est passée sont aussi gages de la confiance dans le projet proposé : qu'il s'agisse d'Agoranov, incubateur public fort de 20 années d'expérience dans l'accompagnement des startups technologiques de la place parisienne, ou de l'incubateur WAI porté par BNP Paribas, ce sont deux structures sélectives qui ont aussi fait le pari du modèle d'affaires proposé par la startup.

Ainsi, dans toute la suite, nous nous attacherons à étudier la phase de scale-up de SUBLIME Énergie à partir de la séquence des prototypes. Le prototype BRAVO est présenté dans la Figure 36 suivante pour fournir au lecteur une visualisation de l'installation et des problématiques de changement d'échelle liées à la taille importante du système thermodynamique conçu.



Figure 36. Illustration du prototype BRAVO
Source : © SUBLIME Énergie

⁵⁷ Les détails sur le concours sont renseignés sur le site du ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche : <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/le-concours-i-nov-49817>

4. Évaluation et contrôle de la robustesse de la stratégie de prototypage pour l'élaboration du rapport à l'écosystème

La robustesse de la stratégie de prototypage s'évalue à partir de la gestion des situations inconnues modifiant le rapport à l'écosystème, qui apparaissent au cours du développement, comme l'arrivée d'un nouveau client. L'enjeu est alors de savoir si la séquence des prototypes doit être modifiée pour répondre au nouveau besoin exprimé ou si elle permet déjà d'y répondre (ou au moins à moindre frais) ; autrement dit, si le rapport à l'écosystème élaboré à partir de la stratégie de prototypage doit évoluer ou non. Pour cela, nous nous appuyons sur l'étude des prototypes et des preuves associées à chaque étape de la maturation technologique de SUBLIME Énergie.

4.1. Validité de la stratégie de prototypage pour un ensemble de concepts

La stratégie de prototypage mise en place par SUBLIME Énergie fournit une première représentation de l'écosystème à partir du modèle d'affaires défini. Les partenaires-clefs pour la mise en œuvre de ce modèle d'affaires ont été identifiés très tôt dans le développement et plusieurs investisseurs se sont impliqués dans le projet : ce sont déjà des parties prenantes de l'écosystème construit par la startup. L'enjeu est alors de réussir le déploiement de la technologie conformément au calendrier de maturation technologique. Néanmoins, au cours de cette période, plusieurs variantes du modèle d'affaires peuvent apparaître, induisant des modifications de la représentation du rapport à l'écosystème. Il s'agit dès lors de savoir si la stratégie de prototypage retenue est adaptée à ces variantes, c'est-à-dire si elle est robuste.

Conformément au modèle d'affaires initialement proposé, une trajectoire classique pour un passage à l'échelle consisterait en une reproduction du dispositif intégré de liquéfaction, d'épuration et de valorisation sur le territoire le plus vaste possible. Il va de soi que des adaptations locales seraient mises en œuvre en particulier vis-à-vis du nombre et de la taille des exploitations fournissant le biogaz, mais aussi des modalités de valorisation du biométhane récupéré voire jusqu'au système logistique, les quantités pouvant significativement varier. La recherche-intervention et plus particulièrement le travail d'exploration mené, ont aussi mis en évidence la pertinence d'une commercialisation séparée des technologies de liquéfaction et d'épuration, l'une ou l'autre pouvant être utilisée préférentiellement selon les contextes (selon les débits des méthaniseurs et les systèmes de traitement du biogaz existants par exemple) ; ou encore celle de la valorisation de chacun des produits, à savoir le biométhane et le bioCO₂. Ce sont bien deux exemples de variantes du modèle d'affaires entraînant une évolution du rapport à l'écosystème. Dès lors, la stratégie de scale-up ne consisterait pas à reproduire un unique modèle d'affaires mais plutôt à concevoir progressivement une gamme de produits destinés à des marchés différents, et donc des écosystèmes différents, capitalisant ainsi sur la généricité de la technologie. Une telle stratégie de déploiement d'une gamme de produits rendrait la startup plus résiliente face à des changements de contexte forts, réglementaires ou économiques. C'est la question de la compatibilité de cette gamme de produits avec la stratégie de prototypage initiale qui se pose.

Cette interrogation est soulevée à un certain nombre de reprises. On réalise un travail d'exploration en mobilisant la théorie C-K pour générer de nouveaux concepts, puis évaluer leur

compatibilité avec la stratégie de prototypage de SUBLIME Énergie. La définition de la séquence des prototypes et du concept premier sur lequel SUBLIME Énergie se positionne ainsi que la réalisation des deux premiers prototypes ont permis de constituer une base de connaissances consistante. Ce travail exploratoire a été fait avec le directeur général, Nicolas Bréziat, en élaborant un référentiel C-K, à partir d'un concept initial formulé comme suit : « Valoriser le biogaz pour maximiser le remplacement des énergies fossiles ». Le référentiel C-K, détaillé dans la Figure 37, fait apparaître une analyse du paysage concurrentiel de la startup (les acteurs concurrents sont indiqués au niveau de l'espace des concepts par les logos des entreprises concernées) ainsi que plusieurs concepts alternatifs potentiellement atteignables par SUBLIME Énergie (explicités en vert dans l'espace des concepts)⁵⁸. Ayant défini le positionnement de SUBLIME Énergie par rapport à sa représentation de l'écosystème (producteurs de biogaz éloignés des réseaux, dans la voie de gauche de l'espace des concepts), le référentiel C-K permet d'évaluer l'évolution nécessaire de cet écosystème pour atteindre les voies de conception alternatives mises en évidence en considérant l'écart entre les concepts alternatifs et le positionnement de SUBLIME Énergie. En effet, plus les concepts alternatifs se situent à distance de la proposition de SUBLIME Énergie, plus les modifications du rapport à l'écosystème sont importantes. Si la robustesse de la stratégie de prototypage peut être évaluée par rapport à l'acquisition de connaissances qu'elle engendre et donc de nouvelles voies de conception qu'elle ouvre, on peut aussi la qualifier à partir de la proximité avec des concepts alternatifs potentiels qui minimisent une restructuration du rapport à l'écosystème.

Enfin, face à l'apparition de concepts alternatifs, d'autres critères de choix permettent de justifier le positionnement sur l'une ou l'autre des voies de conception dans une dynamique de déploiement d'une gamme de produits. Nous soulignons deux mécanismes de sélection observables au sein de SUBLIME Énergie et qui font également intervenir l'écosystème :

- Une action de contrôle à travers la vérification de la pertinence de la voie de conception évaluée à l'aune de la mission de SUBLIME Énergie⁵⁹ : l'expression de la volonté d'implanter la technologie « dans les territoires » est clairement affichée et se traduit par l'atteinte de sources de biogaz éloignées des réseaux faisant partie intégrante de la formulation de la mission ; une restructuration de l'écosystème qui ne prendrait plus en compte ces parties prenantes n'est pas envisageable ; en revanche, la mission favorise le déploiement d'une gamme de produits à travers la combinaison de voies de conception.
- Un effet limitant de l'écosystème, déjà prédit par Demil et al. (2018), rendu visible dans la communication de SUBLIME Énergie à destination des structures d'investissement et d'accompagnement et plus généralement des parties prenantes : alors que l'apparition de concepts alternatifs est avérée (l'élaboration du référentiel en témoigne), l'analyse de quinze présentations de la solution technologique réalisées entre novembre 2018 et juin 2021 à des

⁵⁸ Les deux concepts alternatifs évoquant le « cas Guadeloupe » font appel à une base de connaissance explicitée ultérieurement dans le propos, au niveau de la section 4.3.2.

⁵⁹ On rappelle les trois éléments constitutifs de la mission de SUBLIME Énergie :

- « 1) Le développement de l'utilisation du biogaz pour substituer les gaz renouvelables aux énergies fossiles ;
- 2) Le développement de l'activité et de l'économie circulaire dans les territoires via l'utilisation du biogaz ;
- 3) La valorisation de la recherche dans ces domaines. »

publics variés (comme des mentors, des investisseurs, des structures d'accompagnement, le syndicat départemental de l'énergie des Côtes-d'Armor, ou encore la chambre d'agriculture du Nord) met en évidence la sélection d'un concept unique, très tôt dans la vie de l'entreprise (quelques mois après la création en 2019), qui correspond au positionnement choisi par SUBLIME Énergie et qui est renforcé au cours des rencontres avec les parties prenantes.

Ces mécanismes peuvent être considérés comme des moyens de gérer l'exploration.

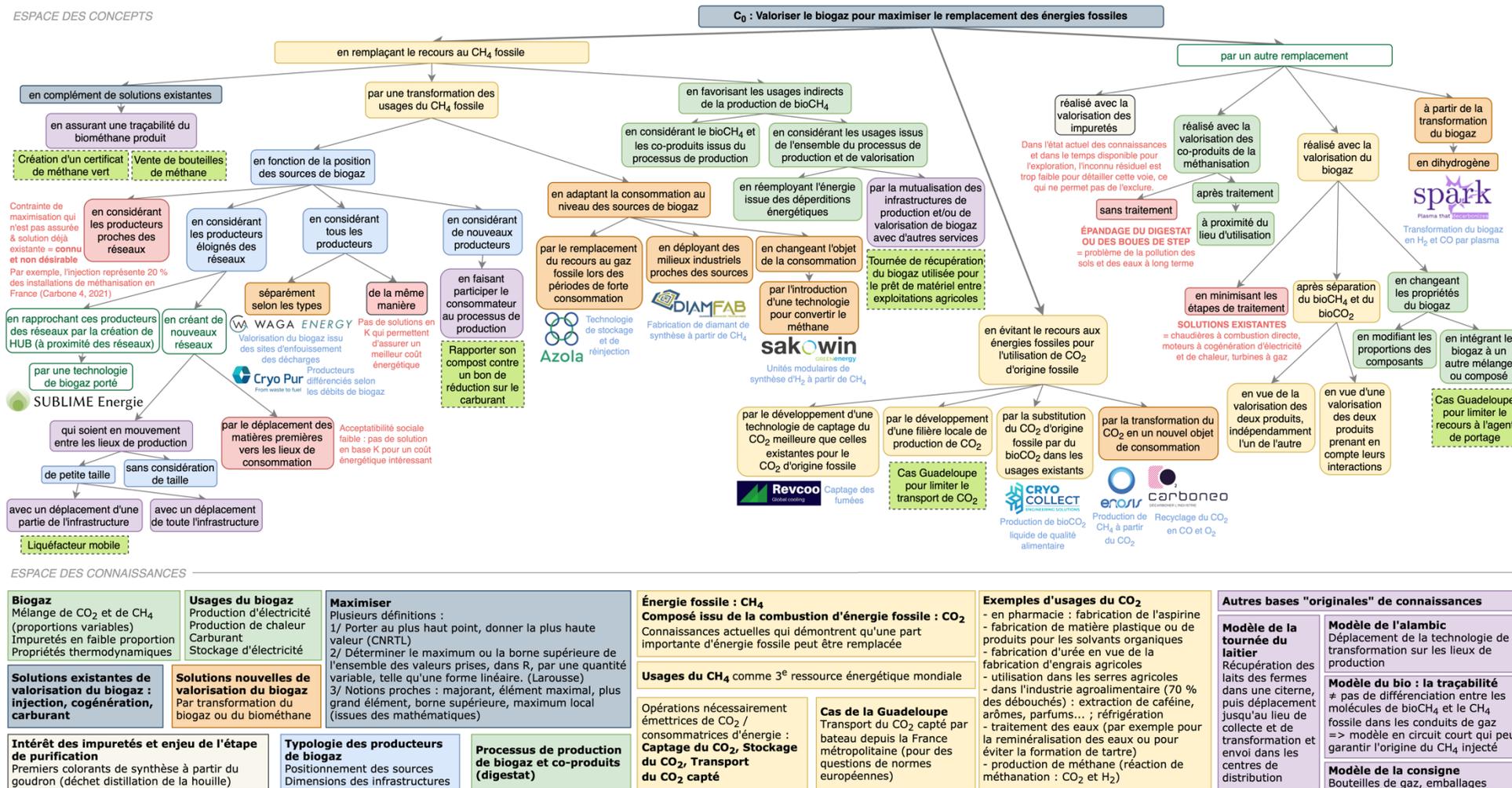


Figure 37. Référentiel C-K sur la valorisation du biogaz et positionnement des acteurs de l'écosystème

Lecture de la figure : la correspondance entre l'espace des concepts et l'espace des connaissances est réalisée par un jeu de couleurs. Les partitions dans l'espace des concepts qui correspondent aux éléments écrits en vert sur fond blanc sont relatives à une exploration (on raffine le concept précédent). Par ailleurs, pour une meilleure clarté, on a directement positionné les startups concurrentes dans l'espace des concepts et indiqué les concepts originaux sur lesquels SUBLIME Énergie pourrait se positionner (éléments en vert avec une bordure hachurée) et les impasses (éléments en rouge avec leurs explications).

4.2. Une pré-structuration du rapport à l'écosystème à partir de la définition de la stratégie de prototypage

Nous nous référons dans toute la suite aux prototypes définis dans le Tableau 30 de la section 3.3.

4.2.1. L'accumulation des apprentissages pour faire apparaître la multiplicité des rapports à l'écosystème

Tout d'abord, il faut noter l'intérêt des prototypes vis-à-vis de l'accumulation des apprentissages de la startup. Dans la mesure où la maturation technologique a été définie pour répondre aux besoins d'un écosystème donné (dont la représentation a été fournie dans la Figure 35 de la section 3.1.2), les interactions au sein de cet écosystème se précisent au fur et à mesure des prototypes réalisés. On peut voir dans cette séquence des prototypes une forme de pré-structuration de l'écosystème, qui passe par la définition des relations entre les acteurs mais aussi par la validation de la solution sur des plages de fonctionnement d'ordre technique, définissant elles-mêmes d'autres interactions avec des acteurs de l'écosystème.

Par exemple, l'intérêt du prototype BRAVO peut être souligné, notamment vis-à-vis de son utilité future dans la poursuite des efforts de R&D. C'est un des rôles des MVP déjà mis en évidence par Duc et Abrahamsson (2016), à savoir un artefact réutilisable. A priori cette réutilisation ne va pas à l'encontre d'une stabilisation de l'écosystème, voire au contraire, elle la favorise. Par ailleurs, la capacité du prototype BRAVO à être modulaire sur un certain nombre de paramètres peut constituer une sorte de réserve de genericité pour les développements futurs. Cette modularité a pu par exemple être observée au niveau de la composition du biogaz de synthèse, c'est-à-dire en faisant varier les proportions de CO₂ et de CH₄, sans compromettre l'utilisation du système. On retrouve cet enjeu d'une conception modulaire également au niveau de l'architecture même de l'installation, pour laquelle deux modes d'introduction des gaz dans le réservoir principal où se déroule le mélange avec l'agent de portage ont été testés. Le choix d'une conception modulaire permet déjà une définition des espaces de conception atteignables, et donc des acteurs potentiels qui y sont liés.

À l'inverse du choix de la modularité, les couplages peuvent être un moyen de gérer l'apparition d'inconnus. Si l'on reprend l'exemple du prototype BRAVO, on remarque un couplage fort au niveau de la colonne de distillation qui sert à la fois à la liquéfaction et à l'épuration, les deux opérations devant se dérouler successivement. La séparation du procédé en deux étapes indépendantes mettant en jeu le même matériel crée certes un couplage au niveau de la colonne de distillation (que l'on traduit dans le langage des matrices de Suh comme un DP réalisant deux FR), mais elle permet de dissocier l'apparition des inconnus ainsi que la validation des deux étapes. En effet, il est nécessaire d'avoir réalisé la liquéfaction, et donc d'avoir validé cette première étape, avant de pouvoir valider l'épuration à son tour. SUBLIME Énergie doit donc déjà avoir levé les inconnus de la liquéfaction avant ceux de l'épuration. Compte-tenu de la structure de l'écosystème définie par SUBLIME Énergie initialement, à savoir la récupération du biogaz à la ferme avec le processus de liquéfaction au même moment, puis dans un deuxième temps une épuration réalisée au niveau du hub avec d'autres acteurs, la conception couplée de BRAVO rappelle le couplage entre les deux étapes réalisées par SUBLIME Énergie, qui plus est dans deux contextes différents. En outre, les

apprentissages réalisés sur les inconnus de la liquéfaction pourront être réutilisés lorsqu'il s'agira de réaliser la deuxième étape du procédé, l'épuration. Cette accumulation des savoirs et cette forme de générativité permises par la maîtrise des couplages du système permettent également de valider plusieurs rapports à l'écosystème (celui lié à la liquéfaction et celui lié à l'épuration dans l'exemple précédent).

4.2.2. L'enrichissement progressif des connaissances du rapport à l'écosystème à travers l'analyse des preuves apportées par la séquence des prototypes

L'évaluation de la robustesse de la stratégie de prototypage passe déjà par la maîtrise des inconnus qui se révèlent au cours de la phase de scale-up. Ces inconnus peuvent en effet conduire la startup à redéfinir son rapport à l'écosystème (par exemple dans le cas où un inconnu technique important invaliderait une partie de la solution technologique). La capacité de SUBLIME Énergie à maîtriser l'apparition des inconnus peut être démontrée plus systématiquement : en s'appuyant sur les caractéristiques détaillées des prototypes, nous mettons en évidence dans les Tableau 31, Tableau 32, Tableau 33 et Tableau 34 suivants les éléments de preuve apportés par chacun d'entre eux. Trois catégories de preuve sont recensées, comme précisé auparavant dans la section 2.4 : les preuves du connu pour valider des connaissances ; les preuves d'inconnu pour formuler une nouvelle hypothèse ; et les absences de preuve qui portent sur des éléments qui ne seront volontairement pas testés à cette étape de la maturation technologique. En outre, nous mettons en évidence, avec un fond orange dans les tableaux, les éléments de preuve relatifs à la construction de l'écosystème. Alors que les deux premiers prototypes ont surtout vocation à réaliser des validations techniques, les preuves portant sur la structuration de l'écosystème se font plus nombreuses, jusqu'à devenir prépondérantes dans les deux derniers prototypes. Si les preuves relatives à l'écosystème se précisent au cours du développement, la planification initiale de la maturation technologique prenait bien en compte une augmentation progressive du nombre de preuves associées à l'écosystème au fil de la séquence des prototypes.

Afin d'illustrer le propos, prenons l'exemple du premier prototype ALPHA réalisé en laboratoire et dont l'objectif initial était de fournir une preuve concrète de la liquéfaction d'un biogaz de synthèse par ajout de l'agent de portage sélectionné. Les connaissances théoriques doivent donc être validées expérimentalement, il s'agit bien d'une preuve de connu. La réalisation d'un premier prototype est aussi l'occasion de communiquer les résultats expérimentaux et d'éveiller l'intérêt d'investisseurs potentiels : il s'agit de preuves de connu, qui portent sur des parties prenantes de l'écosystème. En revanche, les recherches antérieures n'ont pas permis d'anticiper avec certitude la présence d'éléments solides dans le mélange entre le biogaz et l'agent de portage et encore moins de démontrer l'existence du phénomène dans le cas d'un biogaz naturel (non pur). Ce sont deux éléments qui peuvent être considérés comme des preuves d'inconnu : on ne connaît pas le résultat a priori de l'expérience sur ces éléments et selon les résultats, ils permettent de formuler de nouvelles hypothèses sur le système, qui pourront être vérifiées ultérieurement. Sur ce dernier point, on remarquera que le prototype BRAVO fait apparaître une preuve de connu intitulée « Optimisation de la part d'agent de portage » : c'est la proportion d'agent de portage dans le mélange ternaire qui influe directement sur la présence de particules solides de CO₂. Elle est à mettre en lien avec la preuve d'inconnu « Formation de solides lors du processus » du prototype

ALPHA. On se trouve bien dans une situation où le premier prototype fait apparaître une nouvelle hypothèse relative à des particules solides, qui sera plus précisément testée par le deuxième prototype. Ce passage d'une preuve d'inconnu à une preuve de connu se retrouve à maintes reprises entre les prototypes. De même, ce qui pouvait faire l'objet d'une absence de preuve, peut être précisé pour formuler une nouvelle hypothèse, sous la forme d'une preuve d'inconnu.

Pour la bonne compréhension du lecteur, une précision se doit d'être apportée au sujet de l'objet dénommé « SPV » dans les Tableau 33 et Tableau 34 relatifs aux prototypes CHARLIE et DELTA respectivement. L'abréviation SPV correspond à *Special Purpose Vehicle*, ou en français véhicule à usage spécifique. Cette entité financière a pour objectif, dans ce cas précis, de partager les risques du projet entre plusieurs acteurs (vus comme des investisseurs). C'est aussi un moyen de transférer des actifs : c'est l'entité SPV qui serait par exemple propriétaire ou locataire des équipements fournis par SUBLIME Énergie. Si cette solution a plus particulièrement été envisagée pour le prototype DELTA, compte-tenu de la multiplicité d'acteurs à fédérer, la question se pose de valider cette solution en créant un SPV pour le prototype CHARLIE, et qui serait alors très simple, SUBLIME Énergie pouvant être seule dans l'opération. Nous nous pencherons sur l'originalité et l'intérêt de cette option dans la section 4.3.2.

À partir de cette étude détaillée de ce qui est prouvé par chacun des prototypes, on dresse plusieurs constats :

- Les types de preuve, détaillés dans la colonne « Classification », se diversifient au cours du temps et prennent de plus en plus en compte des considérations écosystémiques (comme les questions relatives à la réglementation).
- On note une accumulation dans la base de connaissances grâce aux preuves du connu, signe d'une stabilisation qui influe sur le rapport à l'écosystème (lui aussi stabilisé).
- Certaines preuves d'inconnu pour un prototype donné deviennent des preuves de connu dans un prototype suivant : les choix des preuves d'inconnu peuvent être vus comme des moyens de renforcer des choix écosystémiques.
- Certains éléments non déterminés faisant l'objet d'une potentielle validation peuvent être précisés, jusqu'à formuler une nouvelle hypothèse (et être ensuite considérés comme des preuves d'inconnu).

Ainsi, ces constats amènent à considérer les apprentissages faits pendant le scale-up tout en soulignant qu'il reste, encore au cours de cette phase du développement, des preuves d'inconnus à réaliser. Ces dernières peuvent déterminer des preuves de connu futures, ce qui amène à faire attention à l'influence du choix des inconnus à traiter pour les générations suivantes des prototypes vis-à-vis de l'évolution de la structure de l'écosystème. Finalement, ce cas témoigne de l'intégration de nouveaux inconnus tout au long du passage à l'échelle et *a fortiori* d'une évolution du rapport à l'écosystème, la stratégie de prototypage n'étant en mesure de fournir qu'une pré-structuration de ce rapport.

Il faut néanmoins noter que cette étude présente une limite importante dans le cas du prototype DELTA : si la définition du modèle d'affaires est plus précise, l'anticipation des inconnus techniques reste difficile sans tenir compte de ceux apparus lors du développement du prototype CHARLIE. La liste des preuves à réaliser reste donc incomplète.

Tableau 31. Preuves réalisées avec le prototype ALPHA

ALPHA		<i>Petite échelle au laboratoire pour la preuve de concept de la liquéfaction</i>		
Classification	Preuve de connu	Preuve d'inconnu	Absence de preuve	
Parties prenantes	Éveiller l'intérêt des investisseurs et les convaincre			
Marketing	Communiquer sur l'entreprise			
Technique	Valider expérimentalement un point de fonctionnement du modèle théorique de liquéfaction			
Technique	Réaliser la liquéfaction d'une petite quantité de biogaz de synthèse			
Technique		Formation de solides lors du processus		
Technique		Vérification du phénomène avec de l'agent de portage non pur		
Technique			Cas de biogaz avec impuretés	
Technique			Diagramme de phase du mélange ternaire	
Technique			Dépressurisation du mélange ternaire et séparation des gaz	

Tableau 32. Preuves réalisées avec le prototype BRAVO

BRAVO		<i>Échelle d'une petite unité de méthanisation, en laboratoire pour la preuve de concept de la liquéfaction et de l'épuration</i>		
Classification	Preuve de connu	Preuve d'inconnu	Absence de preuve	
Marketing	Convaincre de l'intérêt d'un déploiement de la technologie			
Parties prenantes	Valider la R&D réalisée en laboratoire			
Modèle d'affaires	Déterminer les montants d'investissement nécessaires pour la fabrication du prototype dans le but de fournir des ordres de grandeurs pour les investissements futurs			
Technique	Fabriquer du biogaz			
Technique	Démontrer la validité du processus de traitement du biogaz : liquéfaction			
Technique	Démontrer la validité du processus de traitement du biogaz : épuration			
Technique	Optimisation de la part d'agent de portage			
Technique	Architecture pour le mode d'introduction des gaz dans le réservoir			
Technique	Vérifier la capacité à récupérer l'agent de portage (recyclage)			
Technique	Fonctionnement de la colonne pour l'ensemble du procédé			
Technique	Choix de l'échangeur			
Technique	Détection et réparation des fuites			

Brevet	Valider expérimentalement l'intérêt de l'injection de l'agent de portage à un certain moment du procédé	
Règlementation	Cahier des charges : maximum 20 bar pour le transport ; maximum 95 % de liquide dans la citerne	
Règlementation		Assurer la conformité à la réglementation ATEX (atmosphère explosive)
Chaîne de valeur		Qualifier le matériel des fournisseurs
Chaîne de valeur		Intégrer des solutions techniques proposées par les fournisseurs
Modèle d'affaires		Tester la solution technique pour le traitement de petites quantités de biogaz (fosses à lisier et autres petites structures de méthanisation)
Technique		(sur la partie épuration) Tester le degré de liberté au niveau de la température pour réaliser le compromis pureté / dépense énergétique
Technique		Déterminer les limites de fonctionnement en balayant le diagramme de phases
Technique		Appréhender la cinétique du processus
Technique		Simulation du transport : pression constante ou cycles successifs ?
Technique		Concevoir le prototype pour des tests futurs (utilisation sur le temps long)
Technique		Formation de CO ₂ solide : comment ? À quels endroits ? Quelle proportion ?

Technique	Ergonomie, positionnement des connexions (fuites) et autres détails pratiques	
Technique	Cas de biogaz avec impuretés (2 ^e utilisation)	Cas de biogaz avec impuretés (1 ^{ère} utilisation)
Technique		Récupération du bioCH ₄ et du bioCO ₂
Technique		Quantité d'agent de portage selon les sources de production du biogaz
Modèle d'affaires		Usages du biométhane et du bioCO ₂ après épuration

Tableau 33. Preuves réalisées avec le prototype CHARLIE

CHARLIE		<i>Échelle d'une unité de méthanisation à la ferme</i>	
Classification	Preuve de connu	Preuve d'inconnu	Absence de preuve
Logistique	Temps de remplissage et de vidange des citernes selon la taille		
Marketing	Voir la valeur ajoutée de SUBLIME Énergie		
Parties prenantes	Engager les différentes parties prenantes et les prospects		
Parties prenantes	Impact de l'expérimentation et communication vers les parties prenantes locales		
Modèle d'affaires	Assurer l'adéquation de la solution avec les utilisateurs (agriculteurs)		
Règlementation	Conditions pour réaliser le transport en camion-citerne		
Chaîne de valeur	Implantation chez un agriculteur		
Technique	Vérifier la fiabilité des équipements		
Technique	Assurer le fonctionnement du méthaniseur		
Technique	Valider les performances		
Technique	Faire fonctionner en conditions réelles sur une durée d'utilisation suffisamment longue		
Technique	Démonstration étendue à l'utilisation de vrai biogaz		
Technique	Capacité à réaliser le transport		
Technique	Capacité à produire / conditionner du bioGNV		

Technique	Capacité à produire / conditionner du bioCO ₂ liquide		
Technique	Niveau de pureté des produits (ex : qualité alimentaire pour le CO ₂)		
Technique		Type de méthaniseur pour lequel la solution fonctionne	
Technique		Adaptabilité des équipements pour des débits différents	
Technique		Pertes de l'agent de portage au fur et à mesure des cycles	
Règlementation		Décret sur le biométhane non injecté (problème de garantie d'origine) et modèles de récupération des garanties d'origine (État)	
Technique		Exploration de champs de connaissances non couverts par BRAVO	
Modèle d'affaires		Acceptabilité sociale de la solution (citoyens et entre agriculteurs)	
Modèle d'affaires		Revenus des gaz produits	
Modèle d'affaires		Autres sources de revenus	
Modèle d'affaires		Implantation du prototype (achat biogaz, vente des produits)	
Modèle d'affaires		(en discussion) Cas d'un SPV qui minimise les parties prenantes [seulement SUBLIME Énergie pour que le prototype lui appartienne entièrement] avec reconduction du SPV dans le prototype DELTA	Forme juridique de la structure pour fédérer les parties prenantes et alléger SUBLIME Énergie
Modèle d'affaires			Pas de recherche de la rentabilité

Tableau 34. Preuves réalisées avec le prototype DELTA

DELTA		<i>Premier de série regroupant une dizaine d'unités de méthanisation à la ferme et un hub pour centraliser le traitement</i>	
Classification	Preuve de connu	Preuve d'inconnu	Absence de preuve
Logistique	Nombre de tournées, temps des tournées, consommation...		
Modèle d'affaires	SPV : facturation d'un leasing de la technologie (SUBLIME Énergie facturerait au SPV) OU SPV comme propriétaire de la technologie		
Modèle d'affaires	Répartition des gains entre le futur exploitant (SPV) et les autres acteurs		
Modèle d'affaires	Critères d'implantation		
Modèle d'affaires	Contribution des syndicats départementaux de l'énergie par des sociétés d'économie mixte		
Modèle d'affaires	(en discussion si SPV comme preuve d'inconnu dans CHARLIE) Validation de plusieurs hypothèses formulées à partir du test avec CHARLIE	Parties prenantes du SPV	
Modèle d'affaires		Forme de la participation des agriculteurs	
Modèle d'affaires		Modification des acteurs du SPV par rapport à CHARLIE	
Modèle d'affaires		Paramètres pour la création du SPV et membres	
Parties prenantes		Parties prenantes intéressées	
Modèle d'affaires		Marchés pour la vente de bioCO ₂	

4.3. Robustesse de la stratégie de prototypage pour une stabilisation du rapport à l'écosystème en phase de scale-up

Alors que la séquence des prototypes définie par SUBLIME Énergie au début de son développement pose des choix structurants concernant les parties prenantes et les relations entre elles, notre étude longitudinale a été l'occasion d'observer et d'analyser les questionnements réguliers relatifs au rapport à l'écosystème de SUBLIME Énergie. Nous revenons sur quatre exemples d'ouverture à des prototypes alternatifs redessinant les contours de l'écosystème structuré par la startup. En nous appuyant sur le formalisme de la conception axiomatique, nous cherchons à comprendre les modifications du rapport à l'écosystème engendrées par chacun de ces concepts et à qualifier la robustesse de la stratégie de prototypage.

4.3.1. Caractérisation de la stratégie de prototypage par la conception axiomatique pour la constitution du patrimoine de création

Il est possible de traduire les différentes preuves de connu et d'inconnu, détaillées dans la section précédente, sous la forme de fonctionnalités à réaliser par chacun des prototypes, notamment vis-à-vis de la construction du rapport à l'écosystème. Afin de maintenir le lien entre la technologie et le marché, nous avons une nouvelle fois recours au formalisme proposé par la conception axiomatique, à savoir les matrices de Suh. Il ne s'agit pas de construire les matrices de Suh de chacun des prototypes, mais plutôt de comprendre la forme générale de ces matrices pour garantir la constitution d'un bon patrimoine de création durant cette phase de scale-up.

Comme mis en évidence dans les Tableau 31, Tableau 32, Tableau 33 et Tableau 34, les preuves relatives à l'élaboration du rapport à l'écosystème se font de plus en plus prépondérantes au fil des prototypes. Lorsque l'on traduit ces preuves en fonctionnalités pour enrichir progressivement la matrice de Suh de la solution technologique, on cherche à vérifier que ces nouvelles fonctions, qui définissent des interactions entre les acteurs de l'écosystème, n'interfèrent pas avec les autres fonctionnalités. Cela se vérifie à chaque étape de la séquence des prototypes, mais également en cas d'une variation du modèle d'affaires. L'objectif est d'assurer que les paramètres de conception utiles à la réponse aux nouvelles fonctions propres au rapport à l'écosystème n'introduisent pas de couplages avec les fonctionnalités précédemment définies. Concrètement, cela signifie qu'il n'y a pas besoin de reconcevoir l'ensemble de la solution lorsque l'entreprise fait varier son rapport à l'écosystème. Garantir cette indépendance revient à disposer d'une matrice de Suh triangulaire tout au long de la séquence de prototypage (les DP relatifs aux FR de l'écosystème ne devant pas interférer avec les autres FR). Pour illustrer notre propos, nous nous intéressons à la matrice de Suh du prototype ALPHA, présentée dans le Tableau 35 ci-après. Les FR relatives à l'écosystème, ainsi que le DP qui leur est associé sont mises en évidence (en orange).

Tableau 35. Description du prototype ALPHA par une matrice de Suh et mise en évidence des fonctions relatives à la structuration de l'écosystème (en orange)

<i>ALPHA</i> <i>Liquéfaction d'une petite quantité de biogaz de synthèse en laboratoire</i>	Vérifier le phénomène avec l'agent de portage non pur	Préparer l'enceinte pour la liquéfaction du biogaz dans l'agent de portage	Assurer les conditions (P,T) adéquates pour la liquéfaction telles que prévues par la simulation	Tester la dépressurisation du mélange ternaire et la séparation des gaz	Tester une composition de biogaz et un point du diagramme de phase	Introduire le réactif (biogaz) dans l'enceinte	Rendre visible la formation de solides lors de la liquéfaction	Convaincre les parties prenantes	Communiquer sur l'entreprise
Agent de portage (non pur)	x	x							
Pompe à vide		x							
Échangeur de chaleur		x	x						
Petite enceinte (<1 L)		x	x			x			
Dispositif de variation et de mesure de pression			x	x	x				
Dispositif de variation et de mesure de température			x	x	x				
Biogaz de synthèse (20 bar, 50 % CH ₄ et 50 % CO ₂)					x	x			
Dispositif d'alimentation						x			
Hublot et caméra							x	x	x

S'il est vrai que le DP relatif aux dispositifs de visualisation (hublot et caméra) peut paraître anecdotique, il s'agit seulement de rendre visible l'introduction de FR portant sur l'écosystème. La matrice de Suh obtenue se trouve être approximativement diagonale (par blocs), et indique un couplage très limité au niveau des fonctions mettant en jeu les acteurs de l'écosystème. Cela laisse présager, dès le prototype ALPHA, de bonnes bases pour concevoir un patrimoine de création, l'enjeu étant de maintenir la structure globale (triangulaire) de la matrice de Suh lorsque l'on ajoute des FR propres à l'écosystème

4.3.2. Mise à l'épreuve de la robustesse de la stratégie de prototypage

Au cours de la recherche-intervention, quatre situations induisant une potentielle modification de la stratégie de prototypage ont été rencontrées. Nous revenons sur chacune d'entre elles en explicitant les conséquences sur la représentation de la matrice de Suh de la séquence des prototypes.

La crise gazière européenne : augmenter les capacités d'injection de biométhane à partir de la récupération du biogaz issu de sources éloignées du réseau gazier

La guerre entre l'Ukraine et la Russie a contribué à une mise en tension des approvisionnements en gaz naturel (méthane) en Europe dès 2021. Cela a immédiatement rebattu les cartes concernant les solutions alternatives d'approvisionnement en gaz naturel : alors que le gaz naturel liquéfié connaît un fort engouement, les solutions de la valorisation du biogaz ne sont pas en reste. Ainsi, en France, sur le plan règlementaire, des initiatives ont pu être lancées pour soutenir une des voies de valorisation du biométhane, à savoir l'injection, comme celle de l'appel d'offres⁶⁰ de la Commission de régulation de l'énergie (CRE) pour l'augmentation des capacités d'injection de biométhane. Trois options s'ouvrent pour SUBLIME Énergie. Premièrement, la startup n'est pas obligée de faire évoluer son modèle d'affaires. Deuxièmement, afin de profiter de cet élan, caractérisé par la mise en place de nouveaux financements dédiés, une stratégie de diversification des voies de valorisation, intégrant l'injection, peut être raisonnablement considérée par SUBLIME Énergie. Troisièmement, on peut envisager le cas où SUBLIME Énergie changerait de position pour considérer uniquement cette nouvelle voie dans sa stratégie de prototypage. Dans ce dernier cas, il ne s'agirait plus d'un enrichissement de la matrice de Suh par les fonctions relatives à l'écosystème, mais d'une limitation de ces fonctions et des paramètres de conception associés. Dans l'hypothèse où la séquence initiale des prototypes garantit bien l'indépendance entre les fonctions de l'écosystème et les autres, la restriction des modes de valorisation du biogaz à l'injection ne crée pas de nouveaux couplages, ce qui continue de garantir la robustesse de la stratégie de prototypage. En revanche, celle-ci a perdu en généralité.

L'acquisition de nouvelles connaissances par SUBLIME Énergie : un écosystème élargi par la preuve apportée par le deuxième brevet

⁶⁰ Le communiqué de presse daté du 25/04/2022 et disponible sur le site de la CRE (<https://www.cre.fr/actualites/la-cre-accompagne-l-essor-du-biomethane-en-france>) fait expressément mention de la crise gazière de cette période.

Le deuxième brevet protégeant la technologie développée par SUBLIME Énergie porte sur la séparation des composants du biogaz selon une double distillation. Le CH₄ est récupéré en premier, et le CO₂ en second ; dans les deux cas, la technique brevetée permet d'atteindre des taux de pureté établis à 99,9 %. Le résidu contient l'agent de portage, qu'il est ensuite possible de réutiliser pour les futurs cycles de liquéfaction. L'indication portant sur la très bonne pureté des composants séparés est particulièrement importante dans le cas où le biométhane récupéré est ensuite transformé en bioGNL. L'acquisition de cette connaissance d'ordre technique permet d'explorer un nouvel espace conceptuel, à savoir la commercialisation de la seule technique d'épuration du biogaz, ce qui est une révision assez profonde de l'écosystème de la startup. Compte-tenu de la réalisation prévue de l'épuration dans la séquence de prototypage existante, la modification apportée par un prototype pour réaliser la seule épuration ne consiste qu'en l'ajout de FR et de DP relatifs à la conception de l'écosystème propre à l'épuration, donc a priori découplés du reste. La stratégie de prototypage est donc robuste à l'intégration de cette nouvelle voie de conception, ce qui démontre sa généricité intrinsèque.

L'apport d'une nouvelle base de connaissances par un tiers : développer un nouveau prototype pour le projet de transport de biogaz liquéfié en Guadeloupe

Ce projet a été soumis à SUBLIME Énergie par l'intermédiaire d'un entrepreneur ayant pour projet de transporter le biogaz produit par une distillerie en Guadeloupe vers une unité surdimensionnée de cogénération située sur un site de production de sucre de canne sur l'île. Les deux structures sont distantes d'environ 70 km et reliables par voie terrestre. La technologie de liquéfaction de SUBLIME Énergie est a priori pertinente pour réaliser le transport. L'entrepreneur apporte donc à SUBLIME Énergie une nouvelle base de connaissance, relative à la situation de la Guadeloupe, qui permet d'envisager un concept alternatif : la seule liquéfaction du biogaz et son transport. On voit dans ce projet également la possibilité de mettre au point une nouvelle étape dans la séquence des prototypes en scindant les étapes de liquéfaction et d'épuration. Il est aussi possible à partir de cette nouvelle base de connaissance de raffiner des concepts existants, par exemple en proposant de réaliser un prototype dédié à la liquéfaction et au transport sur le territoire métropolitain. On se retrouve dans une situation proche de l'exemple décrit précédemment à propos de la seule épuration : l'ajout des FR liées au nouvel écosystème à développer ne remettent pas en question la structuration précédente de la matrice de Suh de la séquence des prototypes, voire au contraire contribuent à un découplage entre les éléments en lien avec la liquéfaction d'une part et ceux avec l'épuration d'autre part. Cela va dans le sens d'une bonne évaluation de la robustesse de la stratégie de prototypage : le prototype correspondant à cette situation n'est donc pas nécessaire.

La gestion des inconnus sur les marchés : adapter les prototypes pour intégrer la solution du SPV

Ce dernier cas est vraisemblablement le plus intéressant car l'introduction du SPV, vu comme un paramètre de conception dans la matrice de Suh, a été décidée dans un deuxième temps de la construction de la séquence des prototypes. En effet, la proposition de valeur initiale de SUBLIME Énergie, à savoir le développement d'une solution intégrée de l'achat du biogaz à l'agriculteur à la vente de biométhane voire de bioCO₂, semblait trop ambitieuse pour les acteurs de

l'accompagnement et les investisseurs potentiels face aux importants inconnus sur les marchés visés. La répartition du risque entre plusieurs acteurs de l'écosystème regroupés dans une même entité est apparue comme un moyen de garantir un revenu à SUBLIME Énergie, en devenant un équipementier de la nouvelle structure chargée de l'exploitation de la technologie et de la vente des produits. Pour cela, le choix s'est tourné vers un SPV. La Figure 38 fournit une représentation du SPV par l'intermédiaire du disque jaune tout en indiquant les équipements fournis par SUBLIME Énergie qui appartiennent au SPV et qui sont opérés par cette structure. Le disque orange et les disques verts rendent visibles les dispositifs propres à l'unité de vente des produits finis (qui peut prendre la forme d'une station-service) et aux exploitations agricoles ou aux STEP disposant de méthaniseurs, respectivement.

La mise en place d'un véhicule financier *ad hoc* peut être considérée comme un nouveau paramètre de conception qui permet de découpler les activités de développement de la solution technologique avec celles de sa commercialisation. En intégrant le SPV dans le prototype DELTA, SUBLIME Énergie rend plus robuste encore sa stratégie de prototypage et garantit ainsi une plus grande indépendance de son rapport à l'écosystème vis-à-vis de la conception technique de la solution.

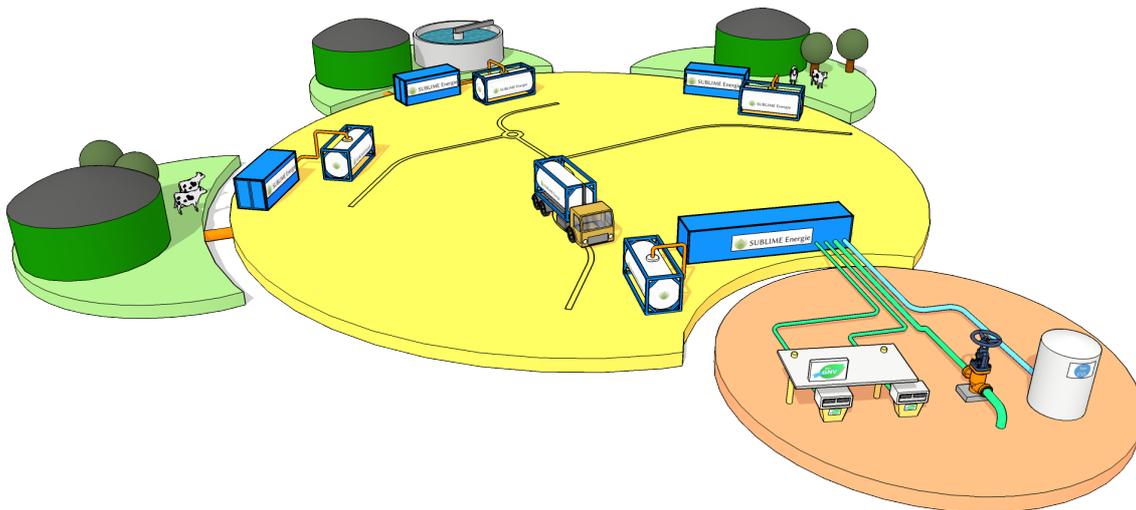


Figure 38. Représentation des interactions entre les acteurs de l'écosystème de SUBLIME Énergie et mise en évidence du SPV (en jaune)

Source : © SUBLIME Énergie

Ces diverses situations de mise à l'épreuve de la stratégie de prototypage illustrent dans un premier temps les nécessaires apprentissages à conduire sur l'écosystème au cours de la phase de scale-up. Le maintien voire le développement de la capacité de la startup à s'insérer sur plusieurs marchés est une propriété de générativité qui justifie que ces apprentissages sur l'écosystème constituent une partie intégrante du patrimoine de création de la startup. Dans un second temps, les mises à l'épreuve de la stratégie de prototypage sont aussi le moyen d'en tester la robustesse par rapport à la structuration du rapport à l'écosystème. Celui-ci se stabilise d'autant mieux que la startup le rend indépendant du développement de la solution technologique. La pré-structuration du rapport à l'écosystème gagne en efficacité si elle permet déjà ce découplage, qui assure le maintien de la généricité. Ainsi, la séquence des prototypes participe à la définition du patrimoine de création à travers le rapport à l'écosystème entretenu par la startup.

Synthèse du chapitre 6

Après avoir justifié théoriquement la pertinence d'une analyse du rapport à l'écosystème à partir de la stratégie de prototypage, nous avons pu étudier la planification du passage à l'échelle d'une startup deeptech et la suivre au début de la mise en œuvre de la séquence des prototypes. La pré-structuration du rapport à l'écosystème induite par les prototypes transparait dans la distinction entre les preuves relatives au développement de la technologie et celles réalisées en vue de la définition des interactions entre les acteurs de l'écosystème. Plusieurs événements viennent interroger cette pré-structuration, ce qui nous conduit à en vérifier la robustesse. Pour cela, le recours au formalisme de la conception axiomatique contribue à mettre en évidence l'intérêt d'un découplage dans la conception de la séquence des prototypes entre les éléments relatifs au développement technologique et ceux propres aux écosystèmes associés aux marchés potentiellement accessibles. Une stratégie de prototypage robuste consiste donc à maintenir une indépendance entre les paramètres de conception liés à la définition de l'écosystème et les fonctions propres à la solution technologique. En rendant indépendante la conception de la solution technologique de la structuration du rapport à l'écosystème, la startup est en mesure de positionner son innovation sur un plus grand nombre de marchés en minimisant les efforts de reconception : elle garantit donc sa généricité. Dans la mesure où le patrimoine de création prend en considération le rapport à l'écosystème, une stratégie de prototypage robuste est garante d'une bonne constitution du patrimoine de création.

Conclusion générale

Conclusion générale

1. Synthèse des principaux résultats.....	263
1.1. La singularité des startups deeptech.....	263
1.2. L'apport de la conception à la compréhension de la phase de scale-up.....	264
2. Recommandations à l'égard des entrepreneurs dans les startups deeptech et de Bpifrance..	266
2.1. Contributions managériales à destination des entrepreneurs dans les startups deeptech.....	266
2.2. Enrichir l'observatoire des startups deeptech avec de nouveaux descripteurs de la phase de scale-up	267
2.3. Intégrer les résultats de la recherche aux dispositifs de financement et d'accompagnement de Bpifrance	268
3. Discussion et limites du travail de recherche.....	269
3.1. La critique de l'engouement autour des startups deeptech	269
3.2. Questionner l'impératif du passage à l'échelle	270
3.3. Quelques limites de la recherche	270
4. Perspectives ouvertes par la recherche	271
4.1. Prendre en compte la constitution du patrimoine de création dans les évaluations de <i>due diligence</i> réalisées par les investisseurs	272
4.2. Faire émerger des écosystèmes à mission	272

La contextualisation des travaux de recherche et la revue de la littérature ont conduit à l'issue des deux premiers chapitres à soulever la problématique générale suivante : dans quelle mesure pouvons-nous considérer que le scale-up d'une startup deeptech est une phase de constitution d'un patrimoine de création ? À travers trois études du scale-up de startups deeptech, nous avons mis en évidence que cette étape-clef de leur développement est le lieu de la construction d'une capacité d'innovation à la fois préservatrice et génératrice, qui correspond à un patrimoine de création. La constitution de ce patrimoine de création appelle à redéfinir les descripteurs classiques de la phase de scale-up afin de mieux saisir les efforts relatifs à la conception du rapport entre la technologie et les marchés potentiels.

Dans une première partie, nous synthétisons les principaux résultats de la thèse, en distinguant les apports théoriques relatifs à la caractérisation des startups deeptech et ceux propres à la compréhension des efforts de conception en phase de scale-up. Puis nous indiquons les principales contributions managériales à destination des entrepreneurs dans les startups deeptech et de Bpifrance, dans le but d'améliorer et de compléter les dispositifs d'aide aux startups deeptech déjà existants (partie 2). La troisième partie de cette conclusion discute les résultats et présente quelques limites de nos travaux de recherche. Enfin, nous ouvrons la réflexion à des perspectives de recherche futures (partie 4).

1. Synthèse des principaux résultats

1.1. La singularité des startups deeptech

L'engouement autour du récent concept de deeptech ne doit pas cacher la difficulté des chercheurs comme des praticiens à s'accorder sur une définition. À partir d'une revue de la littérature et d'une étude comparative vis-à-vis d'autres cas de startups à caractère technologique, nous avons montré dans le premier chapitre que les caractéristiques des startups deeptech reprenaient l'ensemble des caractéristiques d'objets de recherche proches, à savoir les entreprises technologiques et *high-tech*, les NTBF ou encore les startups *hard tech*. À celles-ci s'ajoutent des caractéristiques propres, déjà soulignées par la littérature : la présence d'acteurs du monde de la recherche dans l'écosystème de la startup, une promesse de l'impact de la startup vis-à-vis des grands défis et la gestion d'une stratégie de propriété intellectuelle.

Par ailleurs, en exprimant les risques élevés portant sur le marché et la technologie, les travaux de Schuh et al. (2022) soulignent la situation de double inconnu rencontrée par les startups deeptech : « *First, deep tech innovations are always subject to a comparably high risk of technological feasibility, since innovations in the respective context are completely new and have not yet been tested. Second, deep tech startups usually face an extraordinarily high market risk due to their high degree of novelty.* » (p.3). L'inconnu portant sur le marché se matérialise généralement par d'importants enjeux réglementaires.

Les trois startups deeptech étudiées et présentées dans les chapitres 4, 5 et 6, ont permis de corroborer ces caractéristiques et de mettre en lumière un autre critère : celui de la généricité de la

technologie, c'est-à-dire de la capacité de la startup à déployer une solution technologique sur plusieurs marchés lors de la phase de scale-up. Tout en diluant les risques grâce à un déploiement simultané sur plusieurs marchés, le caractère générique de la technologie démultiplie les efforts à mener vis-à-vis de la gestion des inconnus et de la construction des rapports multiples à l'écosystème.

Ainsi, pour récapituler notre caractérisation des startups deeptech dans l'écosystème entrepreneurial français, nous sommes en mesure de considérer qu'elles remplissent au moins les critères suivants :

- Les startups deeptech développent une technologie nécessitant des efforts de R&D significatifs, qui sont menés en collaboration avec des acteurs du monde de la recherche.
- Elles rencontrent une situation de double inconnu, sur le plan technologique et au niveau de l'implantation sur un marché pour lequel les acteurs et leurs interactions sont indéfinis.
- Elles construisent un potentiel de généricité important, qui se traduit par la capacité à déployer largement et simultanément la technologie sur plusieurs marchés lors de la phase de scale-up.
- Elles se donnent pour objectif de répondre aux grands défis contemporains, ce qui se traduit par des choix de positionnement alignés avec leur promesse de l'impact.

Cet ensemble de critères est déjà un premier résultat de notre recherche, qui contribue à enrichir les travaux, encore peu nombreux, sur les startups deeptech. La définition ainsi complétée des startups deeptech corrobore leur singularité et met en évidence les défis managériaux auxquels elles sont confrontées :

- Un effort d'exploration conduisant à définir et à mettre en place des partenariats pertinents vis-à-vis des bases de connaissances nécessaires au développement futur ;
- La définition d'une stratégie de construction du rapport à l'écosystème prenant en considération les aspects technologiques et ceux relatifs aux marchés ;
- La gouvernance du potentiel de généricité au cours de la phase de scale-up ;
- Le contrôle des orientations stratégiques vis-à-vis des objectifs poursuivis en termes d'impact.

1.2. L'apport de la conception à la compréhension de la phase de scale-up

L'approche par la conception permet deux apports théoriques majeurs vis-à-vis des travaux issus de la littérature en entrepreneuriat. D'une part, nous avons montré que la phase de scale-up d'une startup deeptech allait bien au-delà d'une reproduction d'un modèle d'affaires validé, en mettant en évidence les efforts de conception à fournir au cours de cette étape du développement. Issue des travaux en conception, la notion de patrimoine de création est un des principaux apports de la discussion de cette littérature avec celle en entrepreneuriat et celle sur les modèles d'affaires, comme souligné dans le chapitre 2. Vu comme l'ensemble des règles de conception à préserver qui ont un caractère génératif, le patrimoine de création d'une startup deeptech se constitue au cours

de la phase de scale-up, ce qui permet d'enrichir les travaux existants sur le passage à l'échelle en explicitant l'effort de conception à fournir. Autrement dit et d'après les résultats issus du chapitre 4, le patrimoine de création correspond à la stabilisation d'une architecture de conception qui garantit un développement futur à la startup. Dans le chapitre 5, nous avons plus particulièrement mis en évidence l'effort de conception à fournir pour stabiliser progressivement le patrimoine de création sur l'une des startups deeptech étudiées. Enfin, le chapitre 6 a permis de prouver comment la stratégie de prototypage, vue comme une représentation du passage à l'échelle, contribue à la construction du rapport à l'écosystème qui est un élément du patrimoine de création.

Alors que les startups deeptech sont dans un régime de conception innovante fortement marqué, la notion de patrimoine de création apporte un ensemble de règles à stabiliser. C'est ce qui leur permet de mettre en place, à terme, des lignées de produits, auxquelles il s'agit d'associer des compétences. Les startups deeptech qui connaissent cette phase de scale-up sont donc amenées à passer par un changement majeur de régime de conception : si la conception du premier produit, réalisée dans un mode d'innovation intensive, a été couronnée de succès et a attiré les investisseurs, le deuxième produit repose sur la stabilisation des règles de conception, caractéristique d'un régime de conception réglée. C'est le chemin inverse que connaissent les bureaux d'études bien établis, comme cela a pu être montré par Le Masson et Weil (2010). Alors que les grandes entreprises ont historiquement introduit un régime de conception innovante dans une situation où le régime de conception réglée prépondérerait, une startup deeptech a tendance à compléter son régime de conception innovante par un régime de conception réglée pour mettre en place un ensemble de règles adaptées au développement de plusieurs produits. C'est ce en quoi consiste la constitution de son patrimoine de création, que l'on peut voir comme un moyen de réconcilier les régimes de conception réglée et de conception innovante. Dès lors, la phase de scale-up peut être comprise non plus comme le passage d'un régime de conception à un autre, mais plutôt comme le lieu d'une superposition de régimes de conception. En cela, le vocable de « phase » pour désigner le scale-up peut être questionné.

D'autre part, le deuxième apport théorique de l'approche par la conception porte sur l'intérêt de la généricité de la technologie. L'acquisition d'un potentiel de généricité durant la phase de scale-up permet à la startup deeptech de répondre à la promesse de l'impact et d'assurer la soutenabilité de son modèle de développement à travers un déploiement multi-applicatif. Cela met à mal l'idée d'un *product-market fit* unique et suffisant pour réussir le passage à l'échelle. L'enjeu est de pouvoir saisir le rapport entre le développement technologique et le développement du marché tout en faisant face à la situation de double inconnu que connaissent les startups deeptech. Pour cela, la littérature en conception apporte également des outils opérationnels, comme les matrices de Suh issues de la conception axiomatique. Des travaux antérieurs (Girgenti et al., 2016) avaient déjà mis en évidence la complémentarité de cette approche avec la méthodologie du *Lean Startup* lorsqu'il s'agit de construire les MVP. Nous proposons, dans le chapitre 4, un nouvel usage des matrices de Suh, à savoir une évaluation *ex post* des MVP dans le but d'analyser l'architecture de conception mise en place. Nous avons ainsi pu distinguer la validation des éléments du modèle d'affaires de la préservation des règles de conception.

Afin de faire usage de son potentiel de généricité, une startup deeptech en phase de scale-up poursuit l'exploration, qui porte à la fois sur des aspects techniques et sur l'élaboration des

écosystèmes propres aux applications développées. À nouveau, le recours à la conception axiomatique dans le chapitre 6 permet de justifier l'importance de la maîtrise du découplage entre les activités liées au développement technologique et celles relatives aux écosystèmes. En effet, la gestion de la généricité de la technologie soulève la question du rapport à l'écosystème que la startup construit. La stratégie de prototypage mise en œuvre donne déjà une idée de la représentation de l'écosystème. Il convient alors de garantir la robustesse de la stratégie de prototypage face aux évolutions liées à l'acquisition de nouvelles connaissances ou à l'émergence de nouveaux concepts, pour garantir la généricité de la technologie, qui est une preuve d'une bonne conception du patrimoine de création.

En s'appuyant sur les outils et les méthodologies issues des littératures en entrepreneuriat, sur les modèles d'affaires ou encore sur les plateformes, la notion de patrimoine de création, apportée par la littérature en conception, récapitule les différentes conditions qui dessinent les stratégies d'atteinte de la phase de scale-up dans ces différents champs de recherche. Enfin, en soulignant l'apport de la littérature en conception vis-à-vis de la littérature en entrepreneuriat notamment, cette thèse contribue à considérer l'entrepreneuriat comme une science de la conception. Ces travaux de recherche s'intègrent donc pleinement aux réflexions portées par le champ de l'*entrepreneurship as design*, qui exprime la volonté d'introduire le *design* aux recherches en entrepreneuriat (Berglund et al., 2018).

2. Recommandations à l'égard des entrepreneurs dans les startups deeptech et de Bpifrance

Ce sont les questionnements de Bpifrance et plus particulièrement de la Direction Deeptech en charge de l'opérationnalisation du plan Deeptech depuis 2019 qui sont à l'origine de ces travaux de recherche. Afin de soutenir le rôle de la puissance publique dans l'accompagnement à la croissance des startups deeptech et au développement d'un écosystème favorable à l'émergence de ce type de startups, nous formulons plusieurs recommandations. Les recherches-interventions s'étant déroulées au sein de startups deeptech, nos premières contributions managériales sont formulées à destination des entrepreneurs au sein de ces startups.

2.1. Contributions managériales à destination des entrepreneurs dans les startups deeptech

Les trois recherches-interventions mises en place donnent l'occasion d'élaborer plusieurs suggestions à destination des dirigeants de startups deeptech. Il nous apparaît ainsi que les startups deeptech ont tout à gagner à mettre en œuvre une exploration formelle des voies de conception potentielles pour mettre en évidence plusieurs couples produit-marché, pour lesquels la technologie développée est fonctionnelle. Ainsi, les startups deeptech sont en mesure de capitaliser sur la généricité de leurs technologies pour évaluer et construire une gamme de produits. L'élaboration d'une stratégie de prototypage robuste permet de s'assurer de la validité des développements sur un ensemble de marchés potentiels. En somme, le déploiement d'une gamme

de produits peut être vu comme un moyen pour les entrepreneurs de répondre à la promesse de l'impact grâce à une diffusion de leurs technologies auprès de plusieurs acteurs.

Le recours aux méthodes et aux théories issus des travaux en conception dans le cadre des recherches-interventions réalisées amène à formuler plusieurs conséquences organisationnelles pour les dirigeants de startups deeptech.

Concrètement, les outils mobilisés et présentés dans les chapitres 4, 5 et 6 peuvent être saisis par les entrepreneurs, afin de :

- Mettre en évidence les préservations réalisées au cours de la conception des MVP successifs, comme nous l'avons vu dans le cas d'Agricool à travers l'usage des matrices de Suh ;
- Maîtriser les indépendances dans la conception de la stratégie de déploiement d'une technologie générique, à l'instar de la modélisation du raisonnement de conception de Poietis grâce à la théorie C-K ;
- Contrôler la robustesse de la stratégie de prototypage à partir des indépendances entre la conception de la solution technologique et la structuration du rapport à l'écosystème, grâce aux résultats de l'étude conduite avec SUBLIME Énergie.

En outre, on en déduit des conséquences sur l'évaluation des performances :

- Prendre en compte les préservations dans les développements futurs de l'entreprise (chapitre 4, Agricool) ;
- Structurer les dépendances et les indépendances pour la conception d'une lignée de produits (chapitre 5, Poietis) ;
- Organiser la mise à l'épreuve de la stratégie de prototypage (chapitre 6, SUBLIME Énergie).

Enfin, nos résultats peuvent se traduire en termes de compétences à acquérir pour les entrepreneurs des startups deeptech :

- Élaborer des référentiels C-K pour définir des concepts alternatifs dans le cadre des explorations à mener pendant la phase de scale-up ;
- Modéliser les activités de conception à partir de matrices de Suh pour gérer les indépendances et déterminer les voies de conception à soutenir.

2.2. Enrichir l'observatoire des startups deeptech avec de nouveaux descripteurs de la phase de scale-up

Mis en place au sein de la Direction Deeptech dans le but de suivre l'évolution de l'écosystème des startups deeptech, cet observatoire recense les startups deeptech sur le territoire national et permet de les caractériser à partir d'un certain nombre d'indicateurs, qui portent notamment sur les levées de fonds. Nous proposons d'enrichir cette cartographie en prenant en compte de nouveaux descripteurs de la phase de scale-up.

Il s'agirait en effet de pouvoir mesurer la capacité des startups à aborder plusieurs marchés grâce à la technologie développée. Au lieu de ne faire apparaître qu'un secteur d'application par startup, la base de données pourrait comprendre plusieurs secteurs par startup, quitte à fournir une

sectorisation plus fine. L'objectif serait de faire apparaître le nombre de couples produit-marché que la startup développe. Ainsi, le nombre de secteurs d'application et le nombre de couples produit-marché visés fourniraient des éléments pour quantifier la généralité de la technologie, ce qui peut fournir une indication de la prise de risque pour un investisseur potentiel.

Ayant mis en évidence que la phase de scale-up était encore le lieu d'expérimentations et d'explorations, la base de données de l'observatoire pourrait être complétée par des indicateurs relatifs à l'atteinte de cette phase par les startups à partir de critères basés sur la poursuite des efforts de R&D. Concrètement, cela pourrait se traduire par un suivi des demandes de brevets et à partir d'elles d'une étude des partenariats mis en place par la startup dans le cadre de la construction du rapport à l'écosystème. Les explorations menées pendant la phase de scale-up se traduisent généralement par un renforcement de la R&D : des données concernant la part de la R&D dans les dépenses ou le nombre d'employés dédiés à la R&D, et leurs évolutions au cours du temps, seraient un moyen d'évaluer l'effort d'exploration mené. À distinguer des couples produit-marché, des données relatives à la mise en place de projets de recherche très en amont de la conception du produit donneraient un signal de la capacité de la startup à déployer son innovation.

2.3. Intégrer les résultats de la recherche aux dispositifs de financement et d'accompagnement de Bpifrance

Les activités de financement et d'accompagnement de Bpifrance peuvent également bénéficier des résultats de cette recherche, à différents niveaux. La mise en évidence du double rôle des produits de financement pour le passage à l'échelle, qui sont aussi utilisés pour soutenir les activités de R&D, va déjà dans le sens des résultats de ces travaux. Le déploiement de financements dédiés simultanément à l'industrialisation et à la R&D prend bien en considération la superposition des régimes de conception mise en évidence dès le chapitre 1 et contribue à gérer l'apparition des inconnus, en particulier au niveau de la technologie, en phase de scale-up.

Par ailleurs, l'exploration des concepts alternatifs lors des phases avancées du développement des startups gagnerait à être accompagnée par des méthodologies garantissant la rigueur des raisonnements de conception. Ce pourrait être un rôle spécifique des dispositifs d'accompagnement, qui favoriseraient non plus la restriction de l'activité à un produit déployé sur un marché (pour limiter les coûts de déploiement), mais bien l'ouverture de voies de conception pour capitaliser sur la généralité de la technologie. Si le dispositif d'accompagnement n'a pas vocation à enrichir directement les bases de connaissances nécessaires, la compréhension des aspects techniques dans le cas de l'accompagnement au développement des startups deeptech apparaît nécessaire, en particulier lorsqu'il s'agit de participer à la construction des matrices de Suh. C'est en effet un moyen d'aider la startup à contrôler les rapports possibles à l'écosystème, dessinant sa lignée de produits.

Enfin, comme cela a pu être récemment fait vis-à-vis de la pré-maturation avec le lancement de la Bourse French Tech Lab⁶¹, l'élargissement du continuum de financement de Bpifrance

⁶¹ <https://presse.bpifrance.fr/la-bourse-french-tech-lab-un-nouveau-dispositif-de-financement-deploie-par-bpifrance-pour-demultiplier-le-potentiel-marche-des-projets-deeptech-issus-des-29-poles-universitaires-dinnovation-nouvellem/>

pourrait aller jusqu'à proposer des dispositifs de subvention relatifs au développement du deuxième produit lorsqu'il s'agit de se positionner, en sus du premier produit, sur un nouveau marché. Cela passerait par une étape de mise au jour du patrimoine de création de la startup en vue de définir les règles de conception à stabiliser pour le deuxième produit. Ce type de dispositifs d'accompagnement ne doit pas être confondu avec une aide à la décision concernant un pivot, mais doit bien contribuer à aider la startup à élargir sa gamme de produits, pour gagner en résilience.

3. Discussion et limites du travail de recherche

3.1. La critique de l'engouement autour des startups deeptech

Face à la dynamique mise en œuvre pour soutenir l'émergence de startups deeptech et développer l'écosystème d'accompagnement, un regard critique n'est pas à exclure. Le risque d'un effet de mode cyclique peut être souligné : l'éclatement de la bulle internet formée à la fin des années 1990 puis la crise financière de 2008 n'ont pas suffi à limiter la recherche de placements lucratifs, Menet et Zimmer (2018) montrent que les startups contemporaines sont considérées comme un nouveau véhicule financier. Sans cibler les startups à dimension technologique, ils vont jusqu'à qualifier les startups de « nouvelle utopie économique et sociale » (p.65) et appellent à « arrê[er] la mascarade ». Ainsi, après les entreprises technologiques, les startups *high-tech*, celles de l'économie sociale et solidaire, les startups du numérique, c'est au tour des startups deeptech de faire la une et d'attirer des investissements massifs. Cela est d'autant plus étonnant que l'on peut aller jusqu'à interroger leur caractère novateur : les exemples de technologies issues de travaux de recherche fondamentale qui se sont massivement déployées ne manquent pas. Le cas des Bell Labs, dont l'histoire a été rapportée par Gertner (2012), est très célèbre ; l'exemple de l'invention du transistor suffit à en apprécier la mesure.

C'est en s'intéressant au contexte général d'apparition des startups deeptech que l'on comprend l'entraînement autour des innovations qu'elles développent. Il s'agit en effet de considérer la promesse de l'impact que les startups deeptech apportent face à des défis contemporains qui appellent à des réponses mondialisées, comme la pandémie de la Covid-19 ou l'accélération du changement climatique peuvent l'illustrer. C'est aussi dans un contexte de raréfaction des ressources et d'anticipation de la limitation des dépenses énergétiques que ces startups voient le jour, ce qui les rend d'autant plus singulières.

Par ailleurs, les mesures de politique publique en soutien à l'émergence et au développement de ce type de startups peuvent être interrogées. Le plan d'investissement France 2030 qui mobilise 54 milliards d'euros depuis 2021 en est un bon exemple. Il poursuit plusieurs ambitions : soutenir le développement de l'industrie française entre autres par la création de nouvelles filières industrielles, investir dans des innovations comme celles portées par les startups deeptech, et contribuer à la transition écologique. Cependant, Aggeri (2022) met en garde contre l'illusion de la compatibilité entre la transition écologique et l'accélération de l'innovation technologique qui va

de pair avec la tension sur les ressources naturelles. Cette interrogation est d'autant plus légitime que l'on cherche à déployer ces nouvelles technologies à grande échelle.

3.2. Questionner l'impératif du passage à l'échelle

La recherche systématique du passage à l'échelle ne s'observe pas qu'au niveau des startups et à travers les montants de leurs levées de fonds, mais par exemple aussi lors expérimentations menées dans le cadre de programmes européens, soumises ensuite aux volontés politiques de reproduire des modes de fonctionnement testés localement sur de grandes échelles. C'est du moins ce que montrent Pfothenhauer et al. (2022), qui ont ainsi entrepris une critique de cette culture de l'atteinte de la phase de scale-up en toutes circonstances. Les auteurs vont jusqu'à évoquer un « *a desire for 'blitzscaling', which considers the speed of extension as an objective in itself, necessary to conquer markets or solve global problems* » (Pfothenhauer et al., 2022, p.20)

Pourtant, l'histoire industrielle met déjà en garde contre la tentation de voir dans la réussite du scale-up un absolu. Par exemple, les transformations multiples qu'a connues l'industrie automobile après l'avènement du fordisme, analysées par Midler et al., (2012), peuvent être vues comme des mesures en réponse aux effets pervers induits par le passage à l'échelle de la production, qui est un cas archétypal de ce que peut être une phase de scale-up. Les mythes industriels restent suffisamment ancrés dans l'imaginaire collectif pour que l'engouement autour des startups deeptech puisse se justifier à partir du potentiel dont elles disposent pour passer à l'échelle. Souligner ce paradoxe revient à réinterroger les motivations du passage à l'échelle des startups deeptech.

Dès le premier chapitre de cette thèse, nous avons ouvert la voie à d'autres formes du passage à l'échelle en nous intéressant au cas des *social ventures*. Ces jeunes entreprises contribuent en effet à redéfinir la phase de scale-up, non plus à partir des critères propres au développement de la startup, mais plutôt à partir de son impact (Blundel & Lyon, 2015). En questionnant l'impératif de la phase de scale-up, on cherche d'abord à vérifier que les défis contemporains soient traités, indépendamment de l'existence de leaders ou de géants technologiques.

Enfin, ayant montré l'intérêt des technologies génériques comme une forme alternative de passage à l'échelle, qui peut permettre de garantir un usage modéré des ressources, questionner le passage à l'échelle revient à s'interroger aussi sur la gouvernance de la stratégie de déploiement des technologies génériques. Dans la mesure où la généricité engendre des enjeux importants sur le plan de la responsabilité, il s'agit aussi de savoir comment s'assurer de sa responsabilité lors de la conception de technologies génériques encore inconnues et dont l'impact peut être démultiplié par le levier de la généricité.

3.3. Quelques limites de la recherche

La principale limite de ce travail de recherche concerne sa généralisation puisque nos résultats les plus importants sont issus de trois études de cas. Si nous avons cherché à être les plus représentatifs possibles de la variété des domaines et des contextes de développement de ces startups, cela ne suffit pas pour garantir la validité de tous les résultats sur l'ensemble des startups

deeptech. On s'est d'ailleurs limité à un seul type de startups deeptech, alors qu'il existe d'autres formes d'entrepreneuriat deeptech. Par exemple, dans le cas de programmes d'intrapreneuriat sur des innovations considérées comme deeptech, les responsables des projets continuent de bénéficier du patrimoine de la structure à laquelle ils sont rattachés. On peut aussi retrouver cette forme de soutien à l'entrepreneuriat deeptech dans le cas de grands groupes. Dans ces deux cas, le patrimoine de création que se constitue la startup deeptech prend naturellement en compte des éléments du patrimoine de la structure-mère, ce qui pourrait faire l'objet d'une étude à part entière. Par exemple, il serait pertinent d'étudier comment ces interactions partenariales particulièrement fortes influencent les choix des espaces de conception explorés et les trajectoires de conception choisies *in fine*.

Le choix des trois startups deeptech ayant fait l'objet d'une étude particulière sur la phase de scale-up est également questionnable, étant donné le stade encore peu avancé de cette phase pour chacune des startups. Aucune d'entre elles n'est en effet considérée comme une licorne ou ni même encore intégrée aux programmes FT120 ou Next40, qui sont révélateurs des archétypes d'entreprises en phase de scale-up. Dans la mesure où les critères d'évaluation du scale-up sont basés (au moins dans ces deux exemples des licornes ou du FT120 et Next40) sur des aspects financiers, et plus particulièrement sur les levées de fonds, nous nous émancipons de ce biais en nous intéressant à des passages à l'échelle vraisemblablement plus longs mais aussi plus représentatifs de la majorité des cas.

Mise à part la littérature mobilisée, notre étude porte exclusivement sur l'écosystème entrepreneurial français. Un élargissement de l'origine des startups deeptech étudiées serait déjà un moyen de limiter les biais, dans la gestion de la phase de scale-up, induits par les difficultés de financement des phases avancées du développement, auxquelles les écosystèmes français et européen sont plus particulièrement soumis (Aernoudt, 2017 ; Tibi, 2019).

Le contexte dans lequel cette recherche à caractère exploratoire a été menée est également propice à l'apparition de biais sur la question de l'accès aux financements pour les startups. En effet, en France, l'écosystème autour des startups deeptech a connu d'importantes évolutions entre le début et la fin de la thèse. Si cela est notamment dû à l'opérationnalisation du plan Deeptech par Bpifrance, lancé en 2019 et qui a connu une accélération objective dans sa mise en œuvre ces dernières années, les mesures prises dans le cadre de la pandémie de la Covid-19 ont également interféré sur les investissements et les dispositifs de financement des entreprises. Cela a limité la possibilité de se référer aux données financières pendant la période de la recherche dans le cadre des analyses réalisées.

4. Perspectives ouvertes par la recherche

Pour conclure, ce travail de recherche ouvre de nouvelles perspectives de recherche, notamment vis-à-vis des pratiques du monde de l'investissement lorsqu'il s'agit de startups deeptech, ainsi que du soutien à la structuration d'écosystèmes autour d'une mission par la puissance publique.

4.1. Prendre en compte la constitution du patrimoine de création dans les évaluations de *due diligence* réalisées par les investisseurs

Alors que les recommandations émises à Bpifrance dans la partie 2 portent sur les structures d'accompagnement et de financement des startups deeptech, l'autre activité phare de la banque publique française est l'investissement. Le temps imparti pour la recherche n'a pas permis de réaliser une étude approfondie des thèses d'investissement et des méthodes dont se saisissent les investisseurs pour réaliser les évaluations des startups deeptech en recherche de fonds. En revanche, les échanges qui ont pu avoir lieu avec des investisseurs de Bpifrance au cours du travail de recherche, et qui n'ont pas fait l'objet d'une étude particulière, ont déjà mis en évidence l'intérêt des investisseurs vis-à-vis du développement de ces nouvelles connaissances sur la réalité de la phase de scale-up des startups deeptech.

Une étude de l'évolution des thèses d'investissement pour prendre en compte le déploiement d'une technologie générique pourrait ainsi être menée, afin de s'émanciper de la position classique du « produit unique sur un marché unique », issue de la définition du scale-up comme la reproduction d'un modèle d'affaires validé. Il s'agirait de démontrer comment une stratégie de déploiement multi-marchés, qui est le propre d'une technologie générique, garantit la soutenabilité du modèle d'affaires ainsi défini.

En outre, les investisseurs ont un rôle à jouer dans l'exploration de ces marchés potentiels. L'un des enjeux du financement des startups deeptech est bien l'adaptation des raisonnements de détermination des risques au cas des technologies génériques (Kokshagina, 2014). Par ailleurs, on peut aussi s'interroger sur le rôle des investisseurs dans les choix des concepts alternatifs : sur quelles preuves d'inconnus l'investisseur peut-il agir lorsque l'écosystème est en cours de construction ?

Enfin, les évaluations de *due diligence* conduites par les investisseurs pourraient intégrer une mise à l'épreuve des interdépendances dans la conception vis-à-vis du rapport à l'écosystème. Quand bien même le métier de l'investissement ne permet pas de disposer de toutes les compétences nécessaires à la définition des couplages dans la conception (c'est-à-dire concrètement à l'élaboration des matrices de Suh), les investisseurs restent en mesure d'évaluer la robustesse de la stratégie de conception en vérifiant les relations de couplages et d'indépendances qui transparaissent à partir des matrices de Suh construites au sein des startups. Une expérimentation au sein d'une structure d'investissement pourrait poursuivre ce travail d'évaluation des risques du déploiement des technologies génériques.

4.2. Faire émerger des écosystèmes à mission

En s'emparant des *grand challenges*, au sens de Ferraro et al. (2015), les startups deeptech amènent à se questionner sur le pilotage et la structuration des écosystèmes pour garantir une réponse adaptée à ces défis. Si les startups deeptech sont en mesure d'y contribuer, le caractère global de ces défis induit la mobilisation d'un ensemble d'acteurs, et en particulier des puissances publiques, comme l'appelle de ses vœux l'économiste Mariana Mazzucato. En effet, elle s'est déjà attachée à démontrer comment les investissements gouvernementaux font diminuer les risques entrepreneuriaux et concourent ainsi à l'émergence de nouvelles technologies de rupture

(Mazzucato, 2013). Dans des travaux plus récents, elle propose aux gouvernements de mettre en place des missions trans-sectorielles pour répondre à ces *grand challenges*, à partir de ce qu'elle nomme des politiques publiques orientées vers ces missions : « *Mission-oriented policies can be defined as systemic public policies that draw on frontier knowledge to attain specific goals, or “big science deployed to meet big problems” (Ergas, 1987).* » (Mazzucato, 2018, p.804).

En outre, elle précise que les missions ont tendance à créer de nouveaux marchés et « *in most cases also require changes in regulation and tax policies* » (Mazzucato, 2018, p.804). Cela rejoint les observations faites dans le cadre de ces travaux de recherche : les évolutions nécessaires des réglementations, voire la mise en place de nouvelles réglementations sur les marchés encore inexistants, peuvent nécessiter la création de réseaux de lobbying entre plusieurs acteurs de l'écosystème associé à une mission. On peut dès lors se demander : quel serait le rôle de la puissance publique dans la structuration et le soutien de ces écosystèmes naissants ?

En France, un exemple d'écosystème structuré autour d'une mission est celui des instituts de recherche technologique (IRT), qui sont des structures de recherche thématiques interdisciplinaires mises en place à partir de financements publics. À partir du cas de l'IRT SystemX, Gilain et al. (2022) montrent comment cet IRT organise l'action des acteurs d'un écosystème autour d'inconnus communs. C'est la détermination de ces inconnus communs à partir de la combinaison originale de plusieurs modèles d'action qui permet de mener des projets à double impact, c'est-à-dire à la fois sur le plan scientifique et sur le plan industriel. Les travaux de Gilain et al. (2022) font apparaître les enjeux autour de l'exploration des inconnus communs entre plusieurs parties prenantes. Ce cas rejoint les recherches récentes en théorie de la conception et en gestion de l'innovation qui ont montré que les capacités d'innovation collectives reposent de plus en plus sur l'établissement de communautés (Cohendet et al., 2014 ; Hooge et Le Du, 2016) et de collègues (Le Masson & Weil, 2014) capables de régénérer les imaginaires (Agogué, 2013) et de soutenir les apprentissages collectifs (Le Masson et al., 2012) et la régénération des expertises (Cabanes, 2017).

Les startups deeptech introduisent de nouvelles questions autour de la gestion de ces écosystèmes configurés autour d'une mission : face aux importants inconnus qu'elles rencontrent, l'émergence de tels écosystèmes suppose des synergies et des solidarités poussées. Cela nous conduit à nous demander : quels seraient les schémas de gouvernance adaptés à l'émergence d'écosystèmes à mission ? À première vue, les structures en charge du transfert de technologie et plus généralement la gestion des partenariats entre les startups deeptech et les organismes de recherche, desquels elles sont issues, fournissent une indication quant à l'existence de systèmes de gouvernance adaptés à l'émergence de solutions technologiques en rupture. De plus, des exemples antérieurs ont également démontré l'efficacité du soutien d'une filière à une jeune entreprise, comme les travaux de Darrieulat (1993) sur le cas de l'équipementier aéronautique Intertechnique en France dans les années 1950. Finalement, l'introduction de la notion de politiques publiques orientées vers une mission associée aux *grand challenges* va plus loin et permet de penser l'organisation des écosystèmes non plus à partir des filières existantes, mais bien autour de l'exploration d'inconnus communs. Dès lors, l'enjeu du passage à l'échelle motivé par la réponse aux défis contemporains n'est plus relatif qu'à la seule startup deeptech, mais porte sur les écosystèmes d'exploration à mission.

Annexe – Codes des ACP présentées dans le chapitre 1

Les trois analyses en composantes principales présentées dans le chapitre 1 ont été codées dans le langage MATLAB. Les codes commentés sont fournis ci-après.

ACP 1 – Caractérisation des startups deeptech à partir des données du concours i-Lab

```
%% Analyse en composantes principales des données issues du concours i-Lab
% (version du site data.gouv.fr du 22 décembre 2022)

clear all
close all

% Explications : on réalise une ACP pour caractériser les entreprises
% lauréates du concours i-Lab considérées comme étant des startups
% deeptech. Pour mieux prendre en compte la proximité entre les lauréats du
% concours i-Lab et les startups deeptech selon Bpifrance, seules les
% éditions entre 2010 et 2022 sont sélectionnées.

%% Récupération des données
data_ilab = readtable("data_pca_ilab.xlsx", 'Sheet', 'data_pca');
data_ilab_cr = readtable("data_pca_ilab.xlsx", 'Sheet', 'data_pca_cr');

ilab_year = table2array(data_ilab(:,2));
matrix_data_ilab = table2array(data_ilab(:,3:end));
matrix_data_ilab_cr = table2array(data_ilab_cr(:,2:end));
[nb_nom,nb_criteres] = size(matrix_data_ilab_cr);

liste_criteres = data_ilab.Properties.VariableNames;

%% Analyse en composantes principales
[coeff, score, latent, tsquared, explained, mu] = pca(matrix_data_ilab_cr);

% Explications
% Les colonnes de coeff correspondent aux coefficients des combinaisons
% linéaires définissant les composantes principales.
% Chacune des colonnes de score correspond à une composante principale.
% Pour retrouver le jeu de données initial : score*coeff'+mu
% Le vecteur latent stocke la variance des composantes principales.
% Le vecteur explained permet de connaître la part de chacune des
% composantes dans la variabilité.
% Le vecteur mu contient les moyennes estimées de chacune des variables.

% Pour s'affranchir du problème de l'apparition de lettres en indice dans
% les légendes à cause de l'utilisation de _ :
varlabels = strrep(liste_criteres(1,3:end), '_', '\_');

% Projection sur les composantes principales 1 et 2
figure,
plot12 = biplot(coeff(:,1:2), 'scores', score(:,1:2), 'VarLabels', varlabels);
plot12_id = get(plot12, 'tag');
plot12_obs = plot12(strcmp(plot12_id, 'obsmarker'));

% Ajout d'une colormap pour faire apparaître les différentes éditions
```

```

% du concours i-Lab
liste_annees = 2010:1:2022;
annees = findgroups(ilab_year);
annees(isnan(annees)) = max(annees(~isnan(annees)))+1;
map = parula(length(liste_annees));
for an = 1:length(liste_annees)
    set(plot12_obs(annees==an), 'Color', map(an,:), 'DisplayName',
sprintf('Édition %d', liste_annees(an)))
end

% Gestion de la légende
[~, index] = unique(annees);
legend(plot12_obs(index), 'Location', 'northeastoutside', 'FontSize', 12)
xlabel('1^{ère} composante principale')
ylabel('2^{e} composante principale')
title({'Projection sur les composantes principales 1 et 2';'ACP réalisée à
partir des données data.gouv des lauréats i-Lab de 2010 à
2022'}, 'FontSize', 14)
savefig('acp_data_ilab_12')

% Projection sur les composantes principales 2 et 3
figure,
plot23 = biplot(coeff(:,2:3), 'scores', score(:,2:3), 'VarLabels', varlabels);
plot23_id = get(plot23, 'tag');
plot23_obs = plot23(strcmp(plot23_id, 'obsmarker'));

% Ajout d'une colormap pour faire apparaître les différentes éditions
% du concours i-Lab
liste_annees = 2010:1:2022;
annees = findgroups(ilab_year);
annees(isnan(annees)) = max(annees(~isnan(annees)))+1;
map = parula(length(liste_annees));
for an = 1:length(liste_annees)
    set(plot23_obs(annees==an), 'Color', map(an,:), 'DisplayName',
sprintf('Édition %d', liste_annees(an)))
end

% Gestion de la légende
[~, index] = unique(annees);
legend(plot23_obs(index), 'Location', 'northeastoutside', 'FontSize', 12)
xlabel('2^{e} composante principale')
ylabel('3^{e} composante principale')
title({'Projection sur les composantes principales 2 et 3';'ACP réalisée à
partir des données data.gouv des lauréats i-Lab de 2010 à
2022'}, 'FontSize', 14)
savefig('acp_data_ilab_23')

% Projection sur les composantes principales 1 et 3
figure,
plot13 = biplot(coeff(:,[1 3]), 'scores', score(:,[1
3]), 'VarLabels', varlabels);
plot13_id = get(plot13, 'tag');
plot13_obs = plot13(strcmp(plot13_id, 'obsmarker'));

```

```
% Ajout d'une colormap pour faire apparaître les différentes éditions
% du concours i-Lab
liste_annees = 2010:1:2022;
annees = findgroups(ilab_year);
annees(isnan(annees)) = max(annees(~isnan(annees)))+1;
map = parula(length(liste_annees));
for an = 1:length(liste_annees)
    set(plot13_obs(annees==an), 'Color', map(an,:), 'DisplayName',
    sprintf('Édition %d', liste_annees(an)))
end

% Gestion de la légende
[~, index] = unique(annees);
legend(plot13_obs(index), 'Location', 'northeastoutside', 'FontSize', 12)
xlabel('1ère composante principale')
ylabel('3e composante principale')
title({'Projection sur les composantes principales 1 et 3'; 'ACP réalisée à
partir des données data.gouv des lauréats i-Lab de 2010 à
2022'}, 'FontSize', 14)
savefig('acp_data_ilab_13')
```

ACP 2 – Caractérisation des startups deeptech et de leur phase de scale-up à partir des données de l'observatoire de Bpifrance

```
%% Analyse en composantes principales des données issues de l'observatoire  
% des startups deeptech de Bpifrance (version interne d'août 2022)
```

```
clear all  
close all
```

```
% Explications : on réalise une ACP pour déterminer le profil des startups  
% présentes dans l'observatoire de Bpifrance.
```

```
%% Récupération des données
```

```
data_obs = readtable("data_pca_obs.xlsx", 'Sheet', 'data_pca_obs');  
data_obs_cr = readtable("data_pca_obs.xlsx", 'Sheet', 'data_pca_obs_cr');
```

```
creation_year = table2array(data_obs(:,2));  
matrix_data_obs = table2array(data_obs(:,3:end));  
matrix_data_obs_cr = table2array(data_obs_cr(:,2:end));  
[nb_nom,nb_criteres] = size(matrix_data_obs_cr);
```

```
liste_criteres = data_obs.Properties.VariableNames;
```

```
%% Analyse en composantes principales
```

```
[coeff, score, latent, tsquared, explained, mu] = pca(matrix_data_obs_cr);
```

```
% Explications
```

```
% Les colonnes de coeff correspondent aux coefficients des combinaisons  
% linéaires définissant les composantes principales.  
% Chacune des colonnes de score correspond à une composante principale.  
% Pour retrouver le jeu de données initial : score*coeff'+mu  
% Le vecteur latent stocke la variance des composantes principales.  
% Le vecteur explained permet de connaître la part de chacune des  
% composantes dans la variabilité.  
% Le vecteur mu contient les moyennes estimées de chacune des variables.
```

```
% Pour s'affranchir du problème de l'apparition de lettres en indice dans  
% les légendes à cause de l'utilisation de _ :
```

```
varlabels = strrep(liste_criteres(1,3:end),'_','\_');
```

```
% Projection sur les composantes principales 1 et 2
```

```
figure,  
plot12 = biplot(coeff(:,1:2), 'scores', score(:,1:2), 'VarLabels', varlabels);  
plot12_id = get(plot12, 'tag');  
plot12_obs = plot12(strcmp(plot12_id, 'obsmarker'));
```

```
% Ajout d'une colormap pour faire apparaître les différentes années de  
% création
```

```
liste_annees = 2010:1:2022;  
annees = findgroups(creation_year);  
annees(isnan(annees)) = max(annees(~isnan(annees)))+1;  
map = parula(length(liste_annees));  
for an = 1:length(liste_annees)
```

```
    set(plot12_obs(annees==an), 'Color', map(an,:), 'DisplayName',  
    sprintf('Création en %d', liste_annees(an)))  
end  
  
% Gestion de la légende  
[~, index] = unique(annees);  
legend(plot12_obs(index), 'Location', 'northeastoutside', 'FontSize', 12)  
xlabel('1^{ère} composante principale')  
ylabel('2^{e} composante principale')  
title({'Projection sur les composantes principales 1 et 2'; 'ACP réalisée à  
partir des données de l'observatoire des startups deeptech de  
Bpifrance'}, 'FontSize', 14)  
savefig('acp_data_obs_12')
```

ACP 3 – Différenciation des startups deeptech et des entreprises innovantes à partir des données des programmes FT120 et Next40 de la promotion 2022

```
%% Analyse en composantes principales des données des programmes FT120 et
% Next40 promotion 2022

clear all
close all

% Explications : on réalise une ACP sur la base de données des entreprises
% du FT120 dans le but de trouver des critères de différenciation des
% startups deeptech avec les entreprises non deeptech. Le critère deeptech
% est défini par l'appartenance à l'observatoire des startups deeptech de
% Bpifrance (version interne d'aov³t 2022).

%% Récupération des données
data_ftn = readtable("data_pca_FT120_Next40_2022.xlsx", 'Sheet',
'data_pca');
data_ftn_cr = readtable("data_pca_FT120_Next40_2022.xlsx", 'Sheet',
'data_pca_cr');

%ilab_year = table2array(data_ftn(:,2));
matrix_data_ftn = table2array(data_ftn(:,2:end));
matrix_data_ftn_cr = table2array(data_ftn_cr(:,2:end));
[nb_nom,nb_criteres] = size(matrix_data_ftn_cr);

liste_criteres = data_ftn.Properties.VariableNames;

%% Analyse en composantes principales
[coeff, score, latent, tsquared, explained, mu] = pca(matrix_data_ftn_cr);

% Explications
% Les colonnes de coeff correspondent aux coefficients des combinaisons
% linéaires définissant les composantes principales.
% Chacune des colonnes de score correspond à un composant principal.
% Pour retrouver le jeu de données initial : score*coeff'+mu
% Le vecteur latent stocke la variance des principaux composants.
% Le vecteur explained permet de connaître la part de chacun des composants
% dans la variabilité.
% Le vecteur mu contient les moyennes estimées de chacune des variables.

% Pour s'affranchir du problème de l'apparition de lettres en indice dans
% les légendes à cause de l'utilisation de _ :
varlabels = strrep(liste_criteres(1,2:end),'_','\_');

% Projection sur les composantes principales 1 et 2
figure,
plot12 = biplot(coeff(:,1:2),'scores',score(:,1:2),'VarLabels',varlabels);
plot12_id = get(plot12, 'tag');
plot12_obs = plot12(strcmp(plot12_id,'obsmarker'));

% Gestion de la légende
xlabel('1^{ère} composante principale')
```

```

ylabel('2^{e} composante principale')
title({'Projection sur les composantes principales 1 et 2';'ACP réalisée à
partir des données des programmes FT120 et Next40 de la promotion
2022'}, 'FontSize', 14)
savefig('acp_data_FT120_Next40_12')

% Projection sur les composantes principales 2 et 3
figure,
plot23 = biplot(coeff(:,2:3), 'scores', score(:,2:3), 'VarLabels', varlabels);
plot23_id = get(plot23, 'tag');
plot23_obs = plot23(strcmp(plot23_id, 'obsmarker'));

% Gestion de la légende
xlabel('2^{e} composante principale')
ylabel('3^{e} composante principale')
title({'Projection sur les composantes principales 2 et 3';'ACP réalisée à
partir des données des programmes FT120 et Next40 de la promotion
2022'}, 'FontSize', 14)
savefig('acp_data_FT120_Next40_23')

% Projection sur les composantes principales 1 et 3
figure,
plot13 = biplot(coeff(:, [1 3]), 'scores', score(:, [1
3]), 'VarLabels', varlabels);
plot13_id = get(plot13, 'tag');
plot13_obs = plot13(strcmp(plot13_id, 'obsmarker'));

% Gestion de la légende
xlabel('1^{ère} composante principale')
ylabel('3^{e} composante principale')
title({'Projection sur les composantes principales 1 et 3';'ACP réalisée à
partir des données des programmes FT120 et Next40 de la promotion
2022'}, 'FontSize', 14)
savefig('acp_data_FT120_Next40_13')

%% Détermination des critères de l'ACP ayant le plus de poids par rapport
% à la composante principale 1
vect_norm_cp1 = table('Size', [nb_criteres 2], 'VariableTypes', ["string",
"double"], 'VariableNames', ["criteres", "normes"]);
for k = 1:nb_criteres
    vect_norm_cp1(k,:) = {liste_criteres(k+1), norm(coeff(k,1))};
end
vect_norm_cp1_sorted = sortrows(vect_norm_cp1, 2, 'descend');

```

BIBLIOGRAPHIE

- Adner, R. (2017). Ecosystem as Structure : An Actionable Construct for Strategy. *Journal of Management*, 43(1), 39-58. <https://doi.org/10.1177/0149206316678451>
- Aernoudt, R. (2017). Executive Forum : The scale-up gap: and how to address it. *Venture Capital*, 19(4), 361-372. <https://doi.org/10.1080/13691066.2017.1348724>
- Aggeri, F. (2016). La recherche-intervention : Fondements et pratiques. In J. Barthélemy & N. Mottis, *A la pointe du management. Ce que la recherche apporte au manager* (Dunod).
- Aggeri, F. (2022). France 2030 : Le retour du colbertisme high-tech: *Esprit*, N° 481-482(1), 16-20. <https://doi.org/10.3917/espri.2201.0016>
- Aggeri, F. (2023). L'innovation mais pour quoi faire ? Essai sur un mythe économique, social et managérial (Seuil).
- Agogué, M. (2013). *L'innovation orpheline. Lutter contre les biais cognitifs dans les dynamiques industrielles*. Presses des Mines.
- Anderson, E., Lim, S. Y., & Joglekar, N. (2017). Are More Frequent Releases Always Better? Dynamics of Pivoting, Scaling, and the Minimum Viable Product. Hawaii International Conference on System Sciences. <https://doi.org/10.24251/HICSS.2017.705>
- Arantes, F. P., Caetano, M., de Paula, V. A. F., & Freitag, M. S. B. (2019). New independent technology-based firms : Differences from other NTBFs and future research agenda for technology innovation management. *International Journal of Entrepreneurship and Innovation Management*, 23(1), 46-71.
- Asadullah, A., Faik, I., & Kankanhalli, A. (2018). *Digital Platforms : A Review and Future Directions*.
- Aspara, J., Hietanen, J., & Tikkanen, H. (2010). Business model innovation vs replication : Financial performance implications of strategic emphases. *Journal of Strategic Marketing*, 18(1), 39-56. <https://doi.org/10.1080/09652540903511290>
- Aversa, P., & Haefliger, S. (2015). *Business Model Portfolio Diversification*.
- Ayerbe, C., & Chanal, V. (2011). Quel management des DPI dans les business models ouverts ? *Revue française de gestion*, 37(210), 99-115. <https://doi.org/10.3166/rfg.210.99-115>
- Baden-Fuller, C., & Winter, S. G. (2008). Replicating Organizational Knowledge : Principles or Templates? *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1118013>
- Bajwa, S. S., Wang, X., Nguyen Duc, A., & Abrahamsson, P. (2017). “Failures” to be celebrated : An analysis of major pivots of software startups. *Empirical Software Engineering*, 22(5), 2373-2408. <https://doi.org/10.1007/s10664-016-9458-0>
- Baldwin, C., & Clark, K. (2000). *Design Rules Volume I: The Power of Modularity* (Vol. 1). *The Academy of Management Review*. <https://doi.org/10.2307/259400>

- Baldwin, C. Y., & Woodard, C. J. (2008). The Architecture of Platforms : A Unified View. SSRN Electronic Journal. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1265155>
- Barney, J. (1991). Firm Resources and Sustained Competitive Advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99-120. <https://doi.org/10.1177/014920639101700108>
- Basilio Ruiz de Apodaca, O., Frolund, L., & Murray, F. (2023). What is « Deep Tech » and what are Deep Tech Ventures? *MIT Management*.
- Becker, M. C. (2004). Organizational routines : A review of the literature. *Industrial and Corporate Change*, 13(4), 643-678. <https://doi.org/10.1093/icc/dth026>
- Ben Mahmoud Jouini, S., Paris, T., & Bureau, S. (2010). La recherche-accompagnement : Entre accompagnement et recherche-intervention: *Revue de l'Entrepreneuriat*, Vol. 9(2), 56-75. <https://doi.org/10.3917/entre.092.0004>
- Ben Mahmoud-Jouini, S., & Lenfle, S. (2010). Platform re-use lessons from the automotive industry. *International Journal of Operations & Production Management*, 30(1), 98-124. <https://doi.org/10.1108/01443571011012398>
- Berglund, H. (2021). Entrepreneurship as Design and Design Science. *Journal of Business Venturing Design*, 1(1-2), 100012. <https://doi.org/10.1016/j.jbvd.2022.100012>
- Berglund, H., Dimov, D., & Wennberg, K. (2018). Beyond bridging rigor and relevance : The three-body problem in entrepreneurship. *Journal of Business Venturing Insights*.
- Bernasconi, M., & Monsted, M. (2000). *Les start-up high tech : Création et développement des entreprises technologiques*. Dunod.
- Bertucci Ramos, P. H., & Pedroso, M. C. (2022). Main elements involved in the startup scalability process : A study on Brazilian agtechs. *Revista de Gestão*, 29(3), 220-237. <https://doi.org/10.1108/REG-04-2021-0070>
- Bigdeli, A. Z., Li, F., & Shi, X. (2016). Sustainability and scalability of university spinouts : A business model perspective: Sustainability and scalability of university spinouts. *R&D Management*, 46(3), 504-518. <https://doi.org/10.1111/radm.12167>
- Blank, S. G., & Dorf, B. (2012). *The Startup Owner's Manual : The Step-By-Step Guide for Building a Great Company*. K & S Ranch. <https://books.google.fr/books?id=OurBywEACAAJ>
- Blundel, R. K., & Lyon, F. (2015). Towards a 'Long View' : Historical Perspectives on the Scaling and Replication of Social Ventures. *Journal of Social Entrepreneurship*, 6(1), 80-102. <https://doi.org/10.1080/19420676.2014.954258>
- Bocquet, R., & Mothe, C. (2015). Le rôle de la gouvernance des clusters dans les capacités dynamiques d'absorption des PME. *Management international*, 19(2), 171-188. <https://doi.org/10.7202/1030394ar>
- Boissin, J.-P., Grazzini, F., & Tarillon, C. (2019). Une caractérisation des trajectoires de croissance des start-up au travers de leur taille et de leur mode de financement : Le cas des entreprises soutenues par le ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation. *Revue de l'Entrepreneuriat*, Vol. 18(2), 21. <https://doi.org/10.3917/entre.182.0021>

- Bonet Faus, J., Le Masson, P., Pelissier, U., Jibet, N., Bordas, A., & Pajot, S. (2023). Design methods for diagnosing and locating entangled technical debt in devops frameworks. *Proceedings of the Design Society*, 3, 1267-1276. <https://doi.org/10.1017/pds.2023.127>
- Bortolini, R. F., Nogueira Cortimiglia, M., Danilevicz, A. D. M. F., & Ghezzi, A. (2021). Lean Startup : A comprehensive historical review. *Management Decision*, 59(8), 1765-1783. <https://doi.org/10.1108/MD-07-2017-0663>
- Bpifrance. (2018). Génération Deeptech.
- Bpifrance. (2020). Investir dans la deeptech, paroles de VCs.
- Bresnahan, T., & Trajtenberg, M. (1995). General purpose technologies « Engines of growth »? *Journal of Econometrics*, 65(1), 83-108.
- Breuillot, A., Bocquet, R., & Favre-Bonté, V. (2022). Navigating the internationalization process : Strategic resources for early internationalizing firms. *Journal of International Entrepreneurship*, 20(2), 282-315. <https://doi.org/10.1007/s10843-022-00308-z>
- Cabanes, B. (2017). Modéliser l'émergence de l'expertise et sa gouvernance dans les entreprises innovantes : Des communautés aux sociétés proto-épistémiques d'experts. Université PSL.
- Cabanes, B., Masson, P. L., Weil, B., Kokshagina, O., & Cogez, P. (2015). Innovation et compétition entre plateformes technologiques : Vers une stratégie basée sur la pervasivité des technologies. XXIVe Conférence de l'Association Internationale de Management Stratégique (AIMS). Association Internationale de Management Stratégique (AIMS), Paris.
- Carvajal-Perez, D. (2018). Gérer le patrimoine de création Dom Pérignon : Modéliser et organiser la transmission de connaissances pour la générativité. Université PSL.
- Cavallo, A., Ghezzi, A., Dell'Era, C., & Pellizzoni, E. (2019). Fostering digital entrepreneurship from startup to scaleup : The role of venture capital funds and angel groups. *Technological Forecasting and Social Change*, 145, 24-35. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.04.022>
- Chapel, V. (1997). La croissance par l'innovation intensive : De la dynamique d'apprentissage à la révélation d'un modèle industriel. Le cas Tefal. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Chaturvedi, S. (2015, juillet 28). So What Exactly is 'Deep Technology'? [LinkedIn]. <https://www.linkedin.com/pulse/so-what-exactly-deep-technology-swati-chaturvedi>
- Christensen, C. M., Raynor, M., & McDonald, R. (2015). What Is Disruptive Innovation? 11.
- Cogez, P., Kokshagina, O., Le Masson, P., & Weil, B. (2013). Industry-wide technology roadmapping in double unknown—The case of the semiconductor industry. 2013 International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE) & IEEE International Technology Management Conference, 1-13. <https://doi.org/10.1109/ITMC.2013.7352611>
- Cogez, P., Lécuyer, C., Le Masson, P., & Weil, B. (2020). Organiser la rupture continue dans un écosystème industriel : La loi de Moore comme patrimoine de création collective dans l'industrie des semi-conducteurs. *Entreprises et histoire*, n°98(1), 152. <https://doi.org/10.3917/eh.098.0152>
- Cohen, W. M., & Levinthal, D. A. (1989). Innovation and Learning : The Two Faces of R & D. *The Economic Journal*, 99(397), 569. <https://doi.org/10.2307/2233763>

Cohen, W. M., & Levinthal, D. A. (1990). Absorptive Capacity : A New Perspective on Learning and Innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 128-152. JSTOR.
<https://doi.org/10.2307/2393553>

Cohendet, P., Grandadam, D., Simon, L., & Capdevila, I. (2014). Epistemic communities, localization and the dynamics of knowledge creation. *Journal of Economic Geography*, 14(5), 929-954. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbu018>

Cohendet, P., Llerena, P., & Simon, L. (2010). The innovative firm : Nexus of communities and creativity. *Revue d'économie Industrielle*, 129-130, 139-170. <https://doi.org/10.4000/rei.4149>

Crilly, N. (2017). 'Fixation' and 'the pivot' : Balancing persistence with flexibility in design and entrepreneurship. *International Journal of Design Creativity and Innovation*, 6(1-2), 52-65.
<https://doi.org/10.1080/21650349.2017.1362359>

Cubero, J. N., & Segura, C. C. (2020). Key activities for successful ventures' scaling up. *Academy of Entrepreneurship Journal*, 26(4).

Darriulat, O. (1993). Intertechnique : Un sous-traitant indépendant. *Histoire, économie et société*. <https://doi.org/10.3406/hes.1993.1666>

David, A. (2000). La recherche intervention, un cadre général pour les sciences de gestion ? IXe Conférence de l'Association Internationale de Management Stratégique (AIMS), 22.

David, A., Hatchuel, A., & Laufer, R. (2012). *Les nouvelles fondations des sciences de gestion* (Presses des Mines).

Davila, A., Foster, G., & Gupta, M. (2003). Venture capital financing and the growth of startup firms. *Journal of Business Venturing*, 18(6), 689-708. [https://doi.org/10.1016/S0883-9026\(02\)00127-1](https://doi.org/10.1016/S0883-9026(02)00127-1)

de la Tour, A., Portincaso, M., Blank, K., Goedel, N., Aré, L., Tallec, C., Gourévitch, A., & Pedroza, S. (2019). The Dawn of the Deep Tech Ecosystem (p. 44). The Boston Consulting Group & Hello Tomorrow.

de la Tour, A., Portincaso, M., Goedel, N., Chaudhry, U., Tallec, C., & Gourévitch, A. (2021). *Deeptech : The Great Wave of Innovation*. The Boston Consulting Group & Hello Tomorrow.

de la Tour, A., Soussan, P., Harlé, N., Chevalier, R., & Duportet, X. (2017). From Tech to Deeptech (p. 52). The Boston Consulting Group & Hello Tomorrow.

De Reuver, M., Sørensen, C., & Basole, R. C. (2018). The Digital Platform : A Research Agenda. *Journal of Information Technology*, 33(2), 124-135. <https://doi.org/10.1057/s41265-016-0033-3>

Dealroom, & Sifted. (2021). 2021 : The year of Deep Tech (European Startups). European Commission and European Parliament.

Demil, B., Lecocq, X., & Warnier, V. (2018). Business model thinking, business ecosystems and platforms : The new perspective on the environment of the organization. *M@n@gement*, 21(4), 1213. <https://doi.org/10.3917/mana.214.1213>

Denis-Rémis, C., & Heully, A. (2020). Entreprendre dans les Deep Tech à plus de 40 ans : Le pari du mastère spécialisé Second Life. *Le journal de l'école de Paris du management*, N°145(5), 15.

<https://doi.org/10.3917/jepam.145.0015>

Deval, M.-A., Hooge, S., & Weil, B. (2020). Identification and exploitation of new design paths by breakthrough innovation experts in a generative design partnership. *Proceedings of the Design Society: Design Conference*, 1, 1-10. <https://doi.org/10.1017/dsd.2020.117>

Duc, A. N., & Abrahamsson, P. (2016). Minimum Viable Product or Multiple Facet Product? The Role of MVP in Software Startups. In H. Sharp & T. Hall (Éds.), *Agile Processes, in Software Engineering, and Extreme Programming* (Vol. 251, p. 118-130). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33515-5_10

Dufourcq, N. (2022). *La désindustrialisation de la France (1995-2015)* (Odile Jacob).

Dumez, H. (2016). *Méthodologie de la recherche qualitative : Les questions clés de la démarche compréhensive*. Vuibert.

Dunford, R., Palmer, I., & Benveniste, J. (2010). Business Model Replication for Early and Rapid Internationalisation. *Long Range Planning*, 43(5-6), 655-674. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2010.06.004>

Durufié, G., Hellmann, T. F., & Wilson, K. E. (2017). From Start-Up to Scale-Up : Examining Public Policies for the Financing of High-Growth Ventures. CEPR Discussion Paper No. DP12004. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2913512>

Eisenhardt, K. M., & Graebner, M. E. (2007). Theory Building From Cases : Opportunities And Challenges. *Academy of Management Journal*, 50(1), 25-32. <https://doi.org/10.5465/amj.2007.24160888>

Eisenhardt, K. M., & Martin, J. A. (2000). Dynamic capabilities : What are they? *Strategic Management Journal*, 21(10-11), 1105-1121. [https://doi.org/10.1002/1097-0266\(200010/11\)21:10/11<1105::AID-SMJ133>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1097-0266(200010/11)21:10/11<1105::AID-SMJ133>3.0.CO;2-E)

Eisenmann, T. (2012). *Business Model Analysis for Entrepreneurs*. Harvard Business School Entrepreneurial Management. <https://ssrn.com/abstract=2053342>

Eisenmann, T., Ries, E., & Dillard, S. (2013). Hypothesis-Driven Entrepreneurship : The Lean Startup. Harvard Business School Entrepreneurial Management. Case No. 812-095, 26.

El Qaoumi, K. (2016). *L'expansion fonctionnelle, nouvelle mesure de l'innovation. Analyse empirique et modélisation post-lancastérienne de la transformation des biens de consommation*. Université PSL.

Elmqvist, M., & Segrestin, B. (2009). Sustainable Development through Innovative Design : Lessons from the KCP Method Experimented with an Automotive Firm. *International Journal of Automotive Technology and Management - Int J Automot Tech Manag*, 9. <https://doi.org/10.1504/IJATM.2009.026399>

Eppinger, S. D., & Browning, T. R. (2012). *Design Structure Matrix Methods and Applications*. MIT Press. <https://books.google.fr/books?id=MPQoumoGXHYC>

Ferraro, F., Etzion, D., & Gehman, J. (2015). Tackling Grand Challenges Pragmatically : Robust Action Revisited. *Organization Studies*, 36(3), 363-390.

<https://doi.org/10.1177/0170840614563742>

Ferrary, M., & Granovetter, M. (2009). The role of venture capital firms in Silicon Valley's complex innovation network. *Economy and Society*, 38(2), 326-359.
<https://doi.org/10.1080/03085140902786827>

Fombrun, C. J., & Wally, S. (1989). Structuring small firms for rapid growth. *Journal of Business Venturing*, 4(2), 107-122. [https://doi.org/10.1016/0883-9026\(89\)90025-6](https://doi.org/10.1016/0883-9026(89)90025-6)

Fridenson, P. (1972). Pour une histoire de l'Automobile en France. *Le Mouvement social*, 81, 3.
<https://doi.org/10.2307/3807351>

Gandia, R., & Parmentier, G. (2021). La gestion stratégique d'un portefeuille de business models connectés : Une application aux secteurs du numérique*. *Management international*, 24(5), 186-204. <https://doi.org/10.7202/1075489ar>

Garel, G., & Mock, E. (2012). *La fabrique de l'innovation. Embarquez pour la conception innovante*. Dunod.

Garza Ramos, A., Daim, T., Gaats, L., Hutmacher, D. W., & Hackenberger, D. (2022). Technology roadmap for the development of a 3D cell culture workstation for a biomedical industry startup. *Technological Forecasting and Social Change*, 174, 121213.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121213>

Gawer, A., & Cusumano, M. A. (2014). Industry Platforms and Ecosystem Innovation : Platforms and Innovation. *Journal of Product Innovation Management*, 31(3), 417-433.
<https://doi.org/10.1111/jpim.12105>

Gawer, A., & Henderson, R. (2007). Platform Owner Entry and Innovation in Complementary Markets : Evidence from Intel. *Journal of Economics*.

Gbadegeshin, S. A., & Heinonen, L. (2016). Application of the Lean Start-Up Technique in Commercialisation of Business Ideas and Innovations.

Gbadegeshin, S. A., Natsheh, A. A., Ghafel, K., Mohammed, O., Koskela, A., Rimpiläinen, A., Tikkanen, J., & Kuoppala, A. (2022). Overcoming the Valley of Death : A New Model for High Technology Startups. *Sustainable Futures*, 4, 100077. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2022.100077>

George, G., Howard-Grenville, J., Joshi, A., & Tihanyi, L. (2016). Understanding and Tackling Societal Grand Challenges through Management Research. *Academy of Management Journal*, 59(6), 1880-1895. <https://doi.org/10.5465/amj.2016.4007>

Gertner, J. (2012). *The idea factory : Bell Labs and the great age of American innovation*. Penguin Press.

Ghezzi, A. (2019). Digital startups and the adoption and implementation of Lean Startup Approaches : Effectuation, Bricolage and Opportunity Creation in practice. *Technological Forecasting and Social Change*, 146, 945-960. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.09.017>

Gilain, A., Le Masson, P., & Weil, B. (2019). The Hidden Feat Behind Development Cost Escalation—How Engineering Design Enables Functional Expansion in the Aerospace Industry. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1),

3011-3020. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.308>

Gilain, A., Masson, P. L., Weil, B., Jibet, N., Bekhradi, A., Labrogere, P., & Jibet, N. (2022). Strengthening the generative power of a scientific and industrial ecosystem : The case of the SystemX Institute for Technological Research (IRT), a « “double impact Research and Technology Organization (RTO)” »? 22.

Giones, F., & Brem, A. (2017). Digital Technology Entrepreneurship : A Definition and Research Agenda. *Technology Innovation Management Review*, 7(5).

Girgenti, A., Pacifici, B., Ciappi, A., & Giorgetti, A. (2016). An Axiomatic Design Approach for Customer Satisfaction through a Lean Start-up Framework. *Procedia CIRP*, 53, 151-157. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.101>

Grimes, M. G. (2018). The Pivot : How Founders Respond to Feedback through Idea and Identity Work. *Academy of Management Journal*, 61(5), 1692-1717. <https://doi.org/10.5465/amj.2015.0823>

Hampel, C. E., Tracey, P., & Weber, K. (2020). The Art of the Pivot : How New Ventures Manage Identification Relationships with Stakeholders as They Change Direction. *Academy of Management Journal*, 63(2), 440-471. <https://doi.org/10.5465/amj.2017.0460>

Harlé, H., Le Masson, P., & Weil, B. (2021). A model of creative heritage for industry : Designing new rules while preserving the present system of rules. *Proceedings of the Design Society*, 1, 141-150. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.15>

Harlé, N., Soussan, P., & de la Tour, A. (2017a). A Framework for Deep-Tech Collaboration (p. 9). The Boston Consulting Group & Hello Tomorrow.

Harlé, N., Soussan, P., & de la Tour, A. (2017b). What Deep-Tech Startups Want from Corporate Partners (p. 7). The Boston Consulting Group & Hello Tomorrow.

Hatchuel, A. (1994). Les savoirs de l'intervention en entreprise. *Entreprises et histoire*, 7(3), 59. <https://doi.org/10.3917/eh.007.0059>

Hatchuel, A., Le Masson, P., Weil, B., & Carvajal-Perez, D. (2019). Innovative Design Within Tradition—Injecting Topos Structures in C-K Theory to Model Culinary Creation Heritage. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1), 1543-1552. Cambridge Core. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.160>

Hatchuel, A., & Weil, B. (2002). La théorie C-K : fondements et usages d'une théorie unifiée de la conception. *Colloque Sciences de la conception*.

Hatchuel, A., & Weil, B. (2003). A new approach of innovative design; an introduction to C-K theory. *Proceedings of the International Conference on Engineering Design*, 15.

Haugh, H. (2007). Community–Led Social Venture Creation. *Entrepreneurship Theory and Practice*, 31(2), 161-182. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6520.2007.00168.x>

Hill, M. D. (1990). What is Scalability? *ACM SIGARCH Computer Architecture News*, 18(4), 18-21. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-3604-8_5

Hooge, S., Kokshagina, O., Le Masson, P., Levillain, K., Weil, B., Fabreguettes, V., & Popiolek, N.

(2016). Gambling versus Designing : Organizing for the Design of the Probability Space in the Energy Sector: Gambling versus Designing. *Creativity and Innovation Management*, 25(4), 464-483. <https://doi.org/10.1111/caim.12178>

Hooge, S., & Le Du, L. (2016). Collaborative Organizations for Innovation : A Focus on the Management of Sociotechnical Imaginaries to Stimulate Industrial Ecosystems. *Creativity and Innovation Management*, 25(3), 311-330. <https://doi.org/10.1111/caim.12179>

Huang, J., Henfridsson, O., Liu, M. J., & Newell, S. (2017). Growing on steroids : Rapidly scaling the user base of digital ventures through digital innovation. *MIS Quarterly*, 41(1), 301-314. <https://doi.org/10.25300/MISQ/2017/41.1.16>

Hughes, T. P. (1983). L'électrification de l'Amérique. *Centre de recherche sur la culture technique*, 10, 20-41.

In, S. Y., & Monk, A. (2020). Recipes for a Successful Exit for Clean- and Hard-tech Startups. <https://ssrn.com/abstract=3726781>

Jarrige, F. (2015). Révolutions industrielles : Histoire d'un mythe. *Projet*, 349(6), 14. <https://doi.org/10.3917/pro.349.0014>

Jiao, J. (Roger), Simpson, T. W., & Siddique, Z. (2007). Product family design and platform-based product development : A state-of-the-art review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18(1), 5-29. <https://doi.org/10.1007/s10845-007-0003-2>

Jobin, C. (2022). La preuve de concept comme outil de développement des capacités de générativité collective : Modélisation, expérimentation et conditions de performance. Université PSL.

Jobin, C., Hooge, S., & Le Masson, P. (2021). The logics of double proof in proof of concept : A design theory-based model of experimentation in the unknown. *Proceedings of the Design Society*, 1, 3051-3060. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.566>

Jobin, C., Hooge, S., & Masson, P. L. (2020). What does the proof-of-concept (POC) really prove ? A historical perspective and a cross-domain analytical study. 31.

Kask, J., & Linton, G. (2023). Editorial : Five principles for overcoming obstacles in deep-tech startup journeys. *Journal of Small Business and Enterprise Development*, 30(1), 1-3. <https://doi.org/10.1108/JSBED-02-2023-477>

Kazanjian, R. K., & Drazin, R. (1990). A stage-contingent model of design and growth for technology based new ventures. *Journal of Business Venturing*, 5(3), 137-150. [https://doi.org/10.1016/0883-9026\(90\)90028-R](https://doi.org/10.1016/0883-9026(90)90028-R)

Kokshagina, O. (2014). Risk management in double unknown : Theory, model and organization for the design of generic technologies. *Business administration*.

Kokshagina, O., Le Masson, P., Weil, B., & Cogez, P. (2016). Portfolio Management in Double Unknown Situations : Technological Platforms and the Role of Cross-Application Managers: Portfolio Management in Double Unknown Situations. *Creativity and Innovation Management*, 25(2), 270-291. <https://doi.org/10.1111/caim.12121>

- Kollmann, T., Stöckmann, C., Niemand, T., Hensellek, S., & de Cruppe, K. (2021). A configurational approach to entrepreneurial orientation and cooperation explaining product/service innovation in digital vs. Non-digital startups. *Journal of Business Research*, 125, 508-519. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.09.041>
- König, M., Ungerer, C., Baltes, G., & Terzidis, O. (2019). Different patterns in the evolution of digital and non-digital ventures' business models. *Technological Forecasting and Social Change*, 146, 844-852. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.05.006>
- Kornel, A. (2021). *Naviguer à vue. Vers la startup improvisée* (Presses des Mines).
- Lane, P. J., Koka, B. R., & Pathak, S. (2006). The Reification of Absorptive Capacity : A Critical Review and Rejuvenation of the Construct. *Academy of Management Review*, 31(4), 833-863. <https://doi.org/10.5465/amr.2006.22527456>
- Lasch, F., Roy, F. L., & Yami, S. (2005). Les déterminants de la survie et de la croissance des start-up TIC. *Revue française de gestion*, 155, 37-56. <https://doi.org/10.3166/rfg.155.37-56>
- Le Masson, P., Caron, P., Barbier, M., & Aggeri, F. (2012). The sustainable fibres of generative expectation management : The “building with hemp” case study. In M. Barbier & B. Elzen, *System Innovations, Knowledge Regimes, and Design Practices towards Transitions for Sustainable Agriculture* (p. 263). Inra.
- Le Masson, P., Cogez, P., Felk, Y., & Weil, B. (2012). Revisiting absorptive capacity from a design perspective. *International Journal of Knowledge Management Studies*, 5(1/2), 10. <https://doi.org/10.1504/IJKMS.2012.051939>
- Le Masson, P., El Qaoumi, K., Hatchuel, A., & Weil, B. (2019). A Law of Functional Expansion—Eliciting the Dynamics of Consumer Goods Innovation with Design Theory. *Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design*, 1(1), 1015-1024. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.107>
- Le Masson, P., Hatchuel, A., Kokshagina, O., & Weil, B. (2016). Designing techniques for systemic impact : Lessons from C-K theory and matroid structures. *Research in Engineering Design*. <https://doi.org/10.1007/s00163-016-0241-4>
- Le Masson, P., Hatchuel, A., Le Glatin, M., & Weil, B. (2019). *Designing Decisions in the Unknown : A Generative Model*. *European Management Review*.
- Le Masson, P., & Weil, B. (2010). La conception innovante comme mode d'extension et de régénération de la conception réglée : Les expériences oubliées aux origines des Bureaux d'études. *Entreprises et histoire*.
- Le Masson, P., & Weil, B. (2014). Réinventer l'entreprise : La gestion collégiale des inconnus communs non appropriables. In B. Segrestin, B. Roger, & S. Vernac, *L'entreprise* (p. 238-253). Editions Sciences Humaines. <https://doi.org/10.3917/sh.segre.2014.01.0238>
- Le Masson, P., & Weil, B. (2020). L'expertise de l'inconnu : Les chemins d'une création non destructrice. *Entreprises et histoire*, n°98(1), 5. <https://doi.org/10.3917/eh.098.0005>
- Le Masson, P., Weil, B., & Hatchuel, A. (2006). Les processus d'innovation, conception innovante et croissance des entreprises (Hermès Lavoisier).

- Lecocq, X., Demil, B., & Warnier, V. (2006). Le business model, un outil d'analyse stratégique. *L'Expansion Management Review*, N° 123(4), 96. <https://doi.org/10.3917/emr.123.0096>
- Legrand, J., Masson, P. L., Thomas, M., & Weil, B. (2017, août). Rise and fall of platforms : Systematic analysis of platform dynamics thanks to axiomatic design. 21st International Conference On Engineering Design, Vancouver.
- Lévêque, J. (2022). Concevoir la mission comme un engagement génératif : Enjeux, écueils et principes de formulation pour les sociétés à mission. Université PSL.
- Levillain, K. (2015). Les entreprises à mission : Formes, modèle et implications d'un engagement collectif. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Levitt, B., & March, J. G. (1988). *Organizational Learning*. 22.
- Liao, J. (Jon), & Welsch, H. (2008). Patterns of venture gestation process : Exploring the differences between tech and non-tech nascent entrepreneurs. *The Journal of High Technology Management Research*.
- Lund, M., & Nielsen, C. (2018). The Concept of Business Model Scalability. *SSRN Electronic Journal*, 6(1), 18. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2575962>
- Maghsoudnia, R., Moulin, M., & Stoupy, L. (2017). Europe is Deeptech. France is thriving as a key hub. (p. 21). Wavestone.
- Magistretti, S., Sanasi, S., Dell'Era, C., & Ghezzi, A. (2023). Entrepreneurship as design : A design process for the emergence and development of entrepreneurial opportunities. *Creativity and Innovation Management*, 32(1), 5-21. <https://doi.org/10.1111/caim.12529>
- Maidique, M. A., & Hayes, R. H. (1984). The art of high-technology management. *Sloan Management Review*, 25(2), 17-31.
- Mankins, J. C. (1995). *Technology Readiness Levels, A White Paper*. NASA.
- Massa, L., Tucci, C. L., & Afuah, A. (2017). A Critical Assessment of Business Model Research. *Academy of Management Annals*, 11(1), 73-104. <https://doi.org/10.5465/annals.2014.0072>
- Math, A. (2022). Quoi qu'il en coûte. Des mesures incomparables pour faire face aux conséquences économiques de la pandémie ? : *Chronique Internationale de l'IRES*, N° 176(4), 8-31. <https://doi.org/10.3917/chii.176.0008>
- Mazzucato, M. (2013). *The Entrepreneurial State. Debunking public vs. Private sector myths*.
- Mazzucato, M. (2018a). Mission-oriented innovation policies : Challenges and opportunities. *Industrial and Corporate Change*, 27(5), 803-815. <https://doi.org/10.1093/icc/dty034>
- Mazzucato, M. (2018b). *Mission-oriented research & innovation in the European Union : A problem-solving approach to fuel innovation-led growth*. Publications Office of the European Union.
- McDonald, R., & Gao, C. (2019). Pivoting Isn't Enough? Managing Strategic Reorientation in New Ventures. *Organization Science*, 30(6), 1289-1318. <https://doi.org/10.1287/orsc.2019.1287>

- Menet, N., & Zimmer, B. (2018). Start-up, arrêtons la mascarade. Contribuer vraiment à l'économie de demain. Dunod; Cairn.info. <https://www.cairn.info/start-up-arretons-la-mascarade--9782100773299.htm>
- Midler, C., Maniak, R., & Beaume, R. (2012). Les métamorphoses de l'industrie automobile : Du fordisme à l'innovation intensive. In Réenchanter l'industrie par l'innovation (p. 15-32). Dunod; Cairn.info. <https://www.cairn.info/reenchanter-l-industrie-par-l-innovation--9782100583041-p-15.htm>
- Moisdon, J.-C. (1984). Recherche en gestion et intervention. *Revue Française de Gestion*, 47-48. <http://rfg.revuesonline.com/10.3166/RFG.253.21-39>
- Monteiro, G. F. A. (2018). High-growth firms and scale-ups : A review and research agenda. *RAUSP Management Journal*, 54(1), 96-111. <https://doi.org/10.1108/RAUSP-03-2018-0004>
- Moore, J. F. (2006). Business Ecosystems and the View from the Firm. *The Antitrust Bulletin*, 51(1), 31-75. <https://doi.org/10.1177/0003603X0605100103>
- Murray, G. C., & Marriott, R. (1998). Why has the investment performance of technology-specialist, European venture capital funds been so poor? *Research Policy*.
- Mustar, P. (2020). *L'entrepreneuriat en action. Ou comment de jeunes ingénieurs créent des entreprises innovantes* (Presses des Mines).
- Myers, S., & Marquis, D. G. (1969). Successful Industrial Innovations. A study of factors underlying innovation in selected firms (National Science Foundation).
- NASSCOM. (2021). India's Deeptech Start-ups. The next big opportunity. National Association of Software and Service Companies (NASSCOM).
- Navis, C., & Glynn, M. A. (2011). Legitimate distinctiveness and the entrepreneurial identity : Influence on investor judgments of new venture plausibility. *Academy of Management Review*, 36(3), 479-499. <https://doi.org/10.5465/amr.2008.0361>
- Nedayvoda, A., Delavelle, F., So, H. Y., Graf, L., & Taupin, L. (2021). Financing Deep Tech (Special Note 1; EMCompass). World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/36566>
- Nedayvoda, A., Mockel, P., & Graf, L. (2020). Deep Tech Solutions for Emerging Markets (Note 94; EMCompass). World Bank.
- Nelson, R. R., & Winter, S. G. (2002). Evolutionary Theorizing in Economics. *Journal of Economic Perspectives*, 16(2), 23-46. <https://doi.org/10.1257/0895330027247>
- Nemessany, V. (2012). Le devenir des jeunes pousses après acquisition.
- Osterwalder, A., & Pigneur, Y. (2010). *Business Model Generation : A Handbook for Visionaries, Game Changers, and Challengers*. Wiley. <https://books.google.fr/books?id=UzuTAAwAAQBAJ>
- Owen, R., Stilgoe, J., Macnaghten, P., Gorman, M., Fisher, E., & Guston, D. (2013). A Framework for Responsible Innovation. In R. Owen, J. Bessant, & M. Heintz (Éds.), *Responsible Innovation*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118551424.ch2>

Ozalp, H., Ozcan, P., Dinckol, D., Zachariadis, M., & Gawer, A. (2022). “Digital Colonization” of Highly Regulated Industries : An Analysis of Big Tech Platforms’ Entry into Health Care and Education. *California Management Review*, 64(4), 78-107.
<https://doi.org/10.1177/00081256221094307>

Padmanabhan, J., & Subramaniam, R. (2020). The Relationship Between Architectural Modularity and Platform Scale Up Performance : The Moderating Effects of Strategic Flexibility and Technology Turbulence. *International Journal of Innovation and Technology Management*, 17. <https://doi.org/10.1142/S021987702050056X>

Panorama des fonds de capital-risque deep tech—Financement des start-up à forte intensité technologique. (2021). [Enquête de la Direction générale des Entreprises]. Direction générale des Entreprises, Ministère de l’économie, des finances et de la relance.

Parpaleix, L.-A. (2019). Le capital-investissement peut-il soutenir durablement la croissance des entreprises ? Etude, modèle et conditions d’un capital-régénération. Université PSL.

Parpaleix, L.-A., Levillain, K., & Segrestin, B. (2018). Financing innovation : Two models of private equity investment.

Passaro, R., Quinto, I., & Rippa, P. (2016). The start-up lifecycle : An interpretative framework proposal. 1-25.

Passy, P.-L. (2021). Les conditions de succès des startups. Université Paris I Panthéon-Sorbonne.

Peltoniemi, M., & Vuori, E. (2004). Business ecosystem as the new approach to complex adaptive business environments. *Proceedings of eBusiness Research Forum*.

Penrose, E. (1955). Limits to the Growth and Size of Firms. *The American Economic Review*, 45(2), 531-543.

Penrose, E. (1959). *The Theory of the Growth of the Firm*. John Wiley & Sons.

Pfotenhauer, S., Laurent, B., Papageorgiou, K., & Stilgoe, and J. (2022). The politics of scaling. *Social Studies of Science*, 52(1), 3-34. <https://doi.org/10.1177/03063127211048945>

Pfotenhauer, S. M., Juhl, J., & Aarden, E. (2019). Challenging the “deficit model” of innovation : Framing policy issues under the innovation imperative. *Research Policy*, 48(4), 895-904.
<https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.10.015>

Picken, J. C. (2017). From startup to scalable enterprise : Laying the foundation. *Business Horizons*, 60(5), 587-595. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.002>

Pilorget, L. (2019). Technologie émergente et intelligence économique : Comment répondre aux problématiques spécifiques d’innovation de la start-up Poietis [Économies et finances]. Université de Bordeaux.

Plantec, Q., Cabanes, B., Masson, P. L., & Weil, B. (2023). Caractérisation et performances des thèses Cifre. ANRT - Association Nationale Recherche Technologie.

Popiolek, N., Hooge, S., Kokshagina, O., Masson, P. L., Levillain, K., Weil, B., & Fabreguettes, V. (2014). Pourquoi et comment développer des technologies génériques au CEA – apports d’une approche par les théories et méthodes de la conception contemporaines. *Lettre de l’I-Tese*.

- Portincaso, M., Gourévitch, A., de la Tour, A., Legris, A., Salzgeber, T., & Hammoud, T. (2021). The Deep Tech Investment Paradox : A call to redesign the investor model. The Boston Consulting Group & Hello Tomorrow.
- Priem, R. L., & Butler, J. E. (2001). Is the Resource-Based « View » a Useful Perspective for Strategic Management Research? *The Academy of Management Review*, 26(1), 22. <https://doi.org/10.2307/259392>
- Puntigam, W., Zehetner, J., Lappano, E., & Krems, D. (2020). Integrated and Open Development Platform for the Automotive Industry. In H. Hick, K. Küpper, & H. Sorger (Éds.), *Systems Engineering for Automotive Powertrain Development* (p. 1-27). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68847-3_28-1
- Randhawa, K., Wilden, R., & Gudergan, S. (2021). How to innovate toward an ambidextrous business model? The role of dynamic capabilities and market orientation. *Journal of Business Research*, 130, 618-634. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.05.046>
- Rannikko, H., Tornikoski, E. T., Isaksson, A., & Löfsten, H. (2019). Survival and Growth Patterns among New Technology-Based Firms : Empirical Study of Cohort 2006 in Sweden. *Journal of Small Business Management*, 57(2), 640-657. <https://doi.org/10.1111/jsbm.12428>
- Rasolofo-Distler, F., & Zawadzki, C. (2013). Epistémologie et méthodologie des CIFRE : Illustration par des thèses soutenues en Finance Contrôle Stratégie. *Finance Contrôle Stratégie*, 16-4. <https://doi.org/10.4000/fcs.1406>
- Rheinberger, H.-J. (2001). Putting isotopes to work : Liquid scintillation counters, 1950-1970. In B. Joerges & T. Shinn, *Instrumentation between Science, State and Industry* (Kluwer Academic Publishers).
- Ries, E. (2011). *The lean startup : How constant innovation creates radically successful businesses*. Portfolio Penguin.
- Romasanta, A., Ahmadova, G., Wareham, J. D., & Pujol Priego, L. (2021). Deep Tech : Unveiling the Foundations. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4009164>
- Romme, A. G. L. (2022). Against All Odds : How Eindhoven Emerged as a Deeptech Ecosystem. *Systems*, 10(4), 119. <https://doi.org/10.3390/systems10040119>
- Romme, A. G. L., & Reymen, I. M. M. J. (2018). Entrepreneurship at the interface of design and science : Toward an inclusive framework. *Journal of Business Venturing Insights*.
- Rotolo, D., Hicks, D., & Martin, B. R. (2015). What is an emerging technology? *Research Policy*, 44(10), 1827-1843. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2015.06.006>
- Sanasi, S. (2022). *Business Model Experimentation. A scientific approach to Strategy and Entrepreneurship*. Politecnico di Milano.
- Sanasi, S. (2023). Entrepreneurial experimentation in business model dynamics : Current understanding and future opportunities. *International Entrepreneurship and Management Journal*. <https://doi.org/10.1007/s11365-023-00836-7>
- Sarasvathy, S. D. (2001). Causation and effectuation : Toward a theoretical shift from economic

inevitability to entrepreneurial contingency. *Academy of Management Review*.

Schuh, G., Latz, T., & Lorenz, J. (2022). Governmental Support Options for the Technology Transfer of Deep Tech Innovations. *Information Technology and Management Science*, 25, 24-36. <https://doi.org/10.7250/itms-2022-0004>

Schuh, G., Studerus, B., & Hämmerle, C. (2022). Development of a Life Cycle Model for Deep Tech Startups. <https://doi.org/10.15488/11730>

Schumpeter, J. A. (1911). *The Theory of Economic Development. An inquiry of Profits, Capital, Credit, Interest, and the Business Cycle*. Harvard University Press.

Schumpeter, J. A. (1942). *Capitalism, Socialism, and Democracy*. Harper & Brothers.

Seckler, C., Mauer, R., & Vom Brocke, J. (2021). Design science in entrepreneurship : Conceptual foundations and guiding principles. *Journal of Business Venturing Design*, 1(1-2), 100004. <https://doi.org/10.1016/j.jbvd.2022.100004>

Segrestin, B., & Hatchuel, A. (2012). *Refonder l'entreprise*.

Shepherd, D. A., & Patzelt, H. (2021). *Entrepreneurial Strategy : Starting, Managing, and Scaling New Ventures*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-78935-0>

Siegel, J., & Krishnan, S. (2020). Cultivating Invisible Impact with Deep Technology and Creative Destruction. *Journal of Innovation Management*, 8(3), 6-19. https://doi.org/10.24840/2183-0606_008.003_0002

Siggelkow, N. (2007). Persuasion with case studies. *Academy of Management Journal*, 5.

Simpson, T. W., Maier, J. R., & Mistree, F. (2001). Product platform design : Method and application. *Research in Engineering Design*, 13(1), 2-22. <https://doi.org/10.1007/s001630100002>

Sinclair-Desgagné, B. (2022). Measuring innovation and innovativeness : A data-mining approach. *Quality & Quantity*, 56(4), 2415-2434. <https://doi.org/10.1007/s11135-021-01231-6>

Stampfl, G., Prügl, R., & Osterloh, V. (2013). An explorative model of business model scalability. *International Journal of Product Development*, 18, 24. <https://doi.org/10.1504/IJPD.2013.055014>

Steinberg, M. (2022). From Automobile Capitalism to Platform Capitalism : Toyotism as a prehistory of digital platforms. *Organization Studies*, 43(7), 1069-1090. <https://doi.org/10.1177/01708406211030681>

Storey, D. J., & Tether, B. S. (1998). New technology-based firms in the European union : An introduction. *Research Policy*. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(97\)00052-8](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(97)00052-8)

Stringham, E. P., Miller, J. K., & Clark, J. R. (2015). Overcoming Barriers to Entry in an Established Industry : Tesla Motors. *California Management Review*, 57(4), 85-103. <https://doi.org/10.1525/cm.2015.57.4.85>

Suh, N. P. (1990). *The principles of design*. Oxford University Press on Demand.

Suh, N. P. (1998). Axiomatic Design Theory for Systems. *Research in Engineering Design*, 10(4), 189-209. <https://doi.org/10.1007/s001639870001>

- Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal*, 18(7), 509-533. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199708\)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199708)18:7<509::AID-SMJ882>3.0.CO;2-Z)
- Testa, G., Szkuta, K., & Cunningham, P. N. (2019). Improving access to finance for young innovative enterprises with growth potential : Evidence of impact of R&D grant schemes on firms' outputs. *Research Evaluation*, 28(4), 355-369. <https://doi.org/10.1093/reseval/rvz016>
- Thomas, E. F. (2014). Platform-based product design and environmental turbulence : The mediating role of strategic flexibility. *European Journal of Innovation Management*, 17(1), 107-124. <https://doi.org/10.1108/EJIM-06-2013-0055>
- Thomas, M. (2021). Que reste-t-il à concevoir lors de la commercialisation d'une innovation ? Théorie et méthode de la conception de milieu pour la gestion de membranes de l'inconnu. Université PSL.
- Thomas, M., Le Masson, P., Weil, B., & Legrand, J. (2021). The future of digital platforms : Conditions of platform overthrow. *Creativity and Innovation Management*, 30(1), 80-95. <https://doi.org/10.1111/caim.12422>
- Tibi, P. (2019). Financer la quatrième révolution industrielle : Lever le verrou du financement des entreprises technologiques. Rapport remis au ministre de l'Économie et des Finances.
- Tippmann, E., Monaghan, S., & Reuber, R. A. (2022). Navigating the paradox of global scaling. *Global Strategy Journal*. <https://doi.org/10.1002/gsj.1435>
- Tura, N., Kutvonen, A., & Ritala, P. (2018). Platform design framework : Conceptualisation and application. *Technology Analysis & Strategic Management*, 30(8), 881-894. <https://doi.org/10.1080/09537325.2017.1390220>
- Van Werven, R., Bouwmeester, O., & Cornelissen, J. P. (2015). The power of arguments : How entrepreneurs convince stakeholders of the legitimate distinctiveness of their ventures. *Journal of Business Venturing*, 30(4), 616-631. <https://doi.org/10.1016/j.jbusvent.2014.08.001>
- Varga, S., Cholakova, M., Jansen, J. J. P., Mom, T. J. M., & Kok, G. J. M. (2023). From platform growth to platform scaling : The role of decision rules and network effects over time. *Journal of Business Venturing*, 38(6), 106346. <https://doi.org/10.1016/j.jbusvent.2023.106346>
- Voegtlin, C., & Scherer, A. G. (2017). Responsible Innovation and the Innovation of Responsibility : Governing Sustainable Development in a Globalized World. *Journal of Business Ethics*. <https://doi.org/10.1007/s10551-015-2769-z>
- Werwath, M. (2019). Lean Startup and the Challenges With "Hard Tech" Startups. *IEEE Engineering Management Review*, 47(1), 22-23. <https://doi.org/10.1109/EMR.2019.2903705>
- Winter, S. G., & Szulanski, G. (2001). Replication as Strategy. *Organization Science*, 12(6), 730-743. <https://doi.org/10.1287/orsc.12.6.730.10084>
- World Economic Forum. (2014). The Bold Ones – High-impact Entrepreneurs Who Transform Industries (p. 52) [Insight report]. World Economic Forum.
- Zhang, J. J., Lichtenstein, Y., & Gander, J. (2015). Designing Scalable Digital Business Models. In

C. Baden-Fuller & V. Mangematin (Éds.), *Advances in Strategic Management* (Vol. 33, p. 241-277). Emerald Group Publishing Limited. <https://doi.org/10.1108/S0742-332220150000033006>

Zott, C., & Amit, R. (2010). *Business Model Design : An Activity System Perspective*. *Long Range Planning*, 43(2-3), 216-226. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2009.07.004>

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Observation de l'impact du déploiement en France des dispositifs d'aides aux entreprises pendant la période de la pandémie de la Covid-19 au niveau de l'évolution du nombre de défaillances d'entreprises.....	36
Figure 2. Observation de la part d'inertie de chaque composante et détermination des composantes à l'effet significatif (en orange)	47
Figure 3. Projection des données de la base des lauréats du concours i-Lab entre 2010 et 2022 sur les composantes principales 1 et 2 déterminées par une ACP réalisée avec le logiciel MATLAB et visualisation du poids des critères sur ces composantes	48
Figure 4. Projection des données de la base des lauréats du concours i-Lab entre 2010 et 2022 sur les composantes principales 1 et 3 déterminées par une ACP réalisée avec le logiciel MATLAB et visualisation du poids des critères sur ces composantes	49
Figure 5. Projection des données de la base des lauréats du concours i-Lab entre 2010 et 2022 sur les composantes principales 2 et 3 déterminées par une ACP réalisée avec le logiciel MATLAB et visualisation du poids des critères sur ces composantes	50
Figure 6. Observation de la part d'inertie de chaque composante et détermination des composantes à l'effet significatif (en orange)	55
Figure 7. Projection des données de la base de l'observatoire des startups deeptech de Bpifrance sur les composantes principales 1 et 2 déterminées par une ACP réalisée avec le logiciel MATLAB et visualisation du poids des critères sur ces composantes	57
Figure 8. Critères d'éligibilité des programmes FT120 et Next40 pour la promotion 2022	60
Figure 9. Observation de la part d'inertie de chaque composante et détermination des composantes à l'effet significatif (en orange)	62
Figure 10. Projection des données de la base des programmes FT120 et Next40 (2022) sur les composantes principales 1 et 2 déterminées par une ACP réalisée avec le logiciel MATLAB et visualisation du poids des critères sur ces composantes	64
Figure 11. Projection des données de la base des programmes FT120 et Next40 (2022) sur les composantes principales 1 et 3 déterminées par une ACP réalisée avec le logiciel MATLAB et visualisation du poids des critères sur ces composantes	65
Figure 12. Solutions de financement du scale-up de Bpifrance accordées aux startups deeptech et différenciées selon le soutien simultané à la R&D.....	67
Figure 13. Montants des solutions de financement du scale-up de Bpifrance accordées aux startups deeptech et différenciées selon le soutien simultané à la R&D	68

Figure 14. Chronologie du développement de la startup DNA Script à partir de la rencontre des fondateurs jusqu'en 2020.....	72
Figure 15. Chronologie des grandes étapes de la recherche	122
Figure 16. Chronologie de la startup Agricoool de sa création en 2015 à son rachat faisant suite à son redressement judiciaire en 2022.....	144
Figure 17. Représentation du mode de développement 1 (premiers prototypes) sous la forme d'une matrice de Suh	156
Figure 18. Représentation du mode de développement 1 (flagship) sous la forme d'une matrice de Suh	156
Figure 19. Représentation du mode de développement 2 (ferme pilote) sous la forme d'une matrice de Suh	157
Figure 20. Représentation du mode de développement 3 (ferme modulaire) sous la forme d'une matrice de Suh	157
Figure 21. Caractérisation des produits à partir d'une matrice de Suh et mise en évidence de la généricité de la culture des fraises.....	158
Figure 22. Visualisation de l'intérêt croissant porté à la bioimpression sur le plan mondial à partir du nombre de publications scientifiques et de dépôts de brevets jusqu'à mars 2023.....	182
Figure 23. Représentation schématique d'un dispositif d'impression par laser illustrant l'invention portée par le brevet intitulé « Procédé d'impression d'éléments biologiques par laser et dispositif pour sa mise en œuvre »	184
Figure 24. Peau formée par un derme et un épiderme et obtenue par un protocole de bioimpression par laser réalisé par la startup Poietis, dont la taille ne dépasse pas 40 cm ²	185
Figure 25. Bioimprimante NGB-C installée en novembre 2021 pour démarrer la première phase des tests cliniques à l'Hôpital de la Conception – AP-HM.....	190
Figure 26. Bioimprimante NGB-R, version 2023	190
Figure 27. Détail des modules principaux de la bioimprimante NGB-R.....	191
Figure 28. Modélisation du raisonnement de conception par la théorie C-K conduisant à la prise en considération de la valeur de la conception simultanée des bioimprimantes NGB-C et NGB-R	193
Figure 29. Stratégie invalidée d'une conception indépendante de deux bioimprimantes et représentation agrégée sous la forme d'une matrice de Suh.....	197
Figure 30. Stratégie de conception d'une plateforme et positionnement des deux complémentaires (NGB-C et NGB-R) sous la forme d'une matrice de Suh, d'après Legrand et al. (2017)	197
Figure 31. Stratégie de conception d'une plateforme avec un cœur technique inconnu et en recomposition.....	198

Figure 32. Dispositif de la cartouche avec une couche d'or absorbante.....	204
Figure 33. Modélisation du raisonnement de conception par la théorie C-K conduisant à la prise en considération de la valeur de la conception simultanée des bioimprimantes NGB-C et NGB-R	212
Figure 34. Représentation de la proportion des publications relatives au scale-up selon le domaine scientifique des revues auxquelles elles sont associées.....	228
Figure 35. Schématisation de la chaîne de valorisation du biogaz transporté sous forme liquide entre les unités de méthanisation et le hub de traitement.....	235
Figure 36. Illustration du prototype BRAVO.....	239
Figure 37. Référentiel C-K sur la valorisation du biogaz et positionnement des acteurs de l'écosystème.....	243
Figure 38. Représentation des interactions entre les acteurs de l'écosystème de SUBLIME Énergie et mise en évidence du SPV (en jaune).....	258

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractérisation des startups deeptech à partir d'une revue de la littérature portant sur des types d'entreprises technologiques.....	41
Tableau 2. Regroupements et abréviations utilisées dans les légendes des figures de l'ACP 1 pour les domaines d'activités des entreprises considérées	45
Tableau 3. Regroupements des régions d'origine des entreprises considérées selon le nombre de lauréats et abréviations utilisées dans les légendes des figures de l'ACP 1	46
Tableau 4. Abréviations utilisées dans les légendes des figures de l'ACP 2 pour les domaines d'activités des entreprises considérées	55
Tableau 5. Part des startups deeptech dans les programmes FT120 et Next40 de la promotion 2022 et comparaison de l'âge moyen des startups deeptech avec l'ensemble	59
Tableau 6. Ordre des critères et normes associées pour la première composante principale.....	62
Tableau 7. Indices du démarrage de la phase de scale-up pour une startup deeptech	87
Tableau 8. Comparaison des caractéristiques des startups deeptech avec celles des startups du numérique à partir de la revue de la littérature.....	92
Tableau 9. Dimensions classiques selon l'approche <i>business model</i> , détails des définitions des dimensions et correspondances avec la littérature	97
Tableau 10. Startups étudiées et données secondaires associées ayant conduit à l'hypothèse d'une superposition des régimes de conception en phase de scale-up	120
Tableau 11. Liste des entretiens semi-directifs menés avec des startups deeptech pour détailler les efforts de conception à mener	120
Tableau 12. Liste des startups deeptech ayant fait l'objet d'une étude de cas.....	121
Tableau 13. Calendrier et modalité des interactions directes de la doctorante dans le cadre de la recherche-intervention menée avec Agricool et Orius.....	140
Tableau 14. Description des modes de développement successifs mis en place au sein d'Agricool	146
Tableau 15. Exemples illustratifs des validations et des préservations portant sur les éléments du modèle d'affaires	149
Tableau 16. Validations et invalidations portant sur les éléments relatifs à la dimension « Clients » du modèle d'affaires défini pour chaque mode de développement,	150

Tableau 17. Validations et invalidations portant sur les éléments relatifs à la dimension « Organisation de l'entreprise » du modèle d'affaires défini pour chaque mode de développement	151
Tableau 18. Validations et invalidations portant sur les éléments relatifs à la dimension « Chaîne de valeur » du modèle d'affaires défini pour chaque mode de développement	151
Tableau 19. Validations et invalidations portant sur les éléments relatifs à la dimension « Réseaux / Parties prenantes » du modèle d'affaires défini pour chaque mode de développement.....	152
Tableau 20. Validations et invalidations portant sur les éléments relatifs à la dimension « Conception technique » du modèle d'affaires défini pour chaque mode de développement.....	152
Tableau 21. Validations et invalidations portant sur les éléments relatifs à la dimension « Règlementation » du modèle d'affaires défini pour chaque mode de développement	153
Tableau 22. Résumé des interactions directes de la doctorante avec Poietis.....	175
Tableau 23. Détail des collaborateurs de Poietis ayant été rencontrés dans le cadre de la recherche-intervention mise en place et sujets principaux abordés au cours des échanges.....	176
Tableau 24. Détails des séances d'étude de la bioimprimante de Poietis dans des contextes de projet différents, fonction de l'interlocuteur associé et sujets des échanges.....	177
Tableau 25. Dénomination, sujets et fonctions des participants aux réunions auxquelles la doctorante a assisté comme observatrice non participante.....	178
Tableau 26. Caractérisation des solutions de bioimpression selon les critères de densité cellulaire et de régulation	186
Tableau 27. Les différents modèles d'affaires mis en place par Poietis avec leurs usages (recherche ou clinique), les dénominations des bioimprimantes et leurs descriptifs.....	189
Tableau 28. Liste des débats étudiés portant sur l'intégration d'une performance développée sur l'une des bioimprimantes à l'autre bioimprimante.....	206
Tableau 29. Interactions avec SUBLIME Énergie : interlocuteurs et format	230
Tableau 30. Calendrier de maturation technologique de SUBLIME Énergie.....	238
Tableau 31. Preuves réalisées avec le prototype ALPHA	247
Tableau 32. Preuves réalisées avec le prototype BRAVO.....	248
Tableau 33. Preuves réalisées avec le prototype CHARLIE.....	251
Tableau 34. Preuves réalisées avec le prototype DELTA.....	253
Tableau 35. Description du prototype ALPHA par une matrice de Suh et mise en évidence des fonctions relatives à la structuration de l'écosystème (en orange)	255

RÉSUMÉ

Face aux défis sociaux et environnementaux contemporains, le soutien à l'émergence d'innovations technologiques est une voie qui mérite d'être explorée. Les nouvelles technologies développées par les startups deeptech portent en elles l'ambition de répondre à ces enjeux, à grande échelle. Néanmoins, les conditions de leur déploiement et les mécanismes de gestion des efforts de conception en phase de scale-up sont encore mal élucidés. En abordant le passage à l'échelle des startups deeptech à partir des théories et des méthodes développées dans le champ de la conception, cette thèse met en évidence que les startups deeptech conçoivent leur patrimoine de création au cours de cette phase de scale-up. À partir de trois recherches-interventions mises en place au sein de startups deeptech, ces travaux de recherche apportent une nouvelle condition pour la gestion du passage à l'échelle et fournissent des recommandations à l'égard de la puissance publique pour déployer le potentiel d'impact de ces startups.

MOTS-CLEFS

Startup deeptech – Scale-up – Conception – Patrimoine de création – Entrepreneuriat

ABSTRACT

Faced with contemporary social and environmental challenges, supporting the emergence of technological innovations is a path worth exploring. The new technologies developed by deep tech start-up carry the ambition to address these issues, on a large scale. However, the conditions for their deployment and the mechanisms for managing design efforts in the scale-up phase are still not well understood. By approaching the scaling-up of deep tech start-up through the theories and methods developed in the field of design, this thesis highlights that deep tech start-up shape their creative heritage during this scale-up phase. Based on three intervention-research projects implemented within deep tech start-up, this research provides a new condition for scaling-up management and offers recommendations to public authorities so as to best deploy the potential impact of these start-up.

KEYWORDS

Deep Tech Start-up – Scale-up – Design – Creative heritage – Entrepreneurship