

THÈSE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ PSL

Préparée à MINES Paris

**L'usine conceptrice de son patrimoine de création :
modèle, organisation et méthodes pour la régénération
d'un système de règles industriel**

Soutenue par
Honorine HARLÉ

Le 16 décembre 2022

Ecole doctorale n° 543

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

Spécialité
Sciences de Gestion

Composition du jury :

Gilles GAREL Professeur, CNAM	<i>Rapporteur</i>
Julie STAL-LE CARDINAL Professeure, CentraleSupélec	<i>Rapporteuse</i>
Thomas GILLIER Professeur associé, Grenoble École de Management	<i>Examineur</i>
Sophie HOOGE Professeure, Mines Paris - PSL	<i>Présidente du jury</i>
Chris McMAHON Professeur, University of Bristol	<i>Examineur</i>
Pascal LE MASSON Professeur, Mines Paris – PSL	<i>Directeur de thèse</i>
Benoit, WEIL Professeur, Mines Paris - PSL	<i>Directeur de thèse</i>

Mines Paris - PSL n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans cette thèse. Ces opinions doivent être considérées comme propres à l'auteurice.

À Geo, en mémoire de ces heures bonifaciennes passées à nous avoir initié à l'esprit d'atelier

Remerciements

Ce manuscrit est le fruit d'un long processus de recherches, de déplacements, de rencontres, et d'écriture qui fut particulièrement stimulant mais aussi quelque peu aventureux tant il y avait de connaissances à intégrer, d'hypothèses à faire, d'incertitudes à lever et d'inconnus à explorer. Il est également l'aboutissement d'un travail collectif de formation, d'enquête, de modélisation, de validation académique. Je remercie ici toutes les personnes qui ont pris part à cette expérience à mes côtés.

Je pense particulièrement aux membres de mon jury qui ont accepté ce travail, et auront à lire et rebondir sur cette thèse : merci à Julie Le Cardinal, Gilles Garel, Thomas Gillier, Sophie Hooge, Chris McMahon et Stéphane Hubac. J'adresse à cette occasion ma très grande reconnaissance à mes deux rapporteur.e.s pour avoir rendu possible la pré-soutenance. Cette étape de prototypage m'a été d'une aide précieuse dans la poursuite de l'écriture. Je remercie également chaleureusement les praticien.ne.s et directeurs qui m'ont ouvert les portes de leur usine et témoigné, documenté, expérimenté, enrichi mes recherches à mes côtés : Yann Veslin et Tony Bourlier, Guillaume Bulin, Sophie Conte, Hélène Pons, et Gérald Lignon, Raphaël Le Bihan et Stéphane Hubac.

L'écho et l'émulation que j'ai trouvés au CGS et à la chaire TMCI m'ont également portée durant ces quatre années, et ont incontestablement contribué à mon plaisir au travail ainsi qu'au profilage progressif des questions de recherche, du modèle et des résultats. Mille mercis à mes collègues du bâtiment Saint Jacques, pré-co-post-doctorant.e.s, et autres chercheur.euse.s plus avancé.e.s dans leur carrière : Raphaëlle, Caroline, Jérémy, Maxime, Chipten, Quentin, Chloé, Antoine, Nafissa, Kevin, Sophie, Armand, Cédric, Blanche, Shen Le, et tou.te.s les autres. Merci également à Michel Nakhla et Éric Ballot pour avoir suivi et évalué année après année mon travail. Merci à Stéphanie, Céline et Marie-Michelle d'avoir rendu plus facile et agréable la vie et l'organisation de mon travail au laboratoire. Je remercie vivement Pascal et Benoit, qui ont été les premiers déclencheurs de mon envie de faire de la recherche et de me former à la conception, après un stage d'études avec eux. Ils ont été des soutiens et des guides de tous les jours et de toutes les étapes durant ce doctorat. Leur rigueur scientifique et leur érudition ont été motivantes et déterminantes pour réaliser cette thèse.

Enfin, un grand merci à mes proches de m'avoir accompagnée dans ce qui a parfois pris des allures de Vendée Globe. Merci à mes ami.e.s nombreux.ses et géographiquement éparses qui m'ont accompagnée de joie, de fantaisie, et de projets plus ou moins rocambolesques : Yann, François D., O₂, Dimitri, Bérénice, Toucan, Quentin, Vincent, Anne-Goëlle, Paul, Perrine & Chloé, Margot Rouge & Morgane, Candy & Blandine, Juliette & Diane, Manon Pivot, Claire Pirot, Claire Plou' & Chloé, Édith & Lucie, Caro & Caroline, la flamboyante et hélvétique Camille, William. J'ai une pensée toute particulière pour ma co-nautico-doctorante Solène, que je n'ai pas fréquentée assez à mon goût, mais dont la bienveillance et la sollicitude ont été déterminantes dans les moments charnières... Mille mercis SR ! Ma gratitude va également à mes parents et mes frères et sœurs ; merci Louise pour le coaching sans répit des derniers instants. Alizée, je n'oublierai pas notre vie douce mais non moins pétillante, portée par ton esprit de cordée sans faille.

Table des matières

<i>Remerciements</i>	4
<i>Table des matières</i>	5
<i>Structure de la thèse</i>	7
1. Introduction	8
1.1. L'industrie face aux crises : une capacité de transformation nécessaire	8
1.2. Les rapports de prescription au sein de l'usine et leurs crises.....	11
1.3. Problématique de la thèse et enjeux	17
1.4. Organisation et plan de la thèse	18
2. Revue de littérature	20
2.1. Le système de règles de l'usine et sa révision : éléments théoriques et exemples empiriques.....	20
2.2. L'industrie 4.0 ré-ouvre la question de la révision des règles.....	26
2.3. L'émergence de la nouveauté dans un système à préserver : les théories et méthodes de la conception pour la production	30
2.4. Conclusion de la revue de littérature	33
3. Questions de recherche	34
4. Parcours et méthodologie de recherche	36
4.1. Ancrage et parcours de la thèse	36
4.2. Démarche épistémologique générale	38
4.3. Présentation des terrains de recherche	42
4.4. Présentation des méthodes et matériaux de recherche.....	49
4.5. Synopsis de la thèse	61
5. Partie 4. Résumé et compléments des articles	64
5.1. Article 1 : Modéliser la régénération du système de règles en usine	64
5.2. Article 2 : La mise en évidence d'un régime de conception à prescription extensive ..	74

5.3.	Article 3 : que révèle la boîte à idée d'un centre de maintenance SNCF ?	81
5.4.	Article 4 : L'amélioration continue chez STMicroelectronics.	87
5.5.	Tableau de synthèse	93
6.	<i>Résultats généraux</i>	97
6.1.	Résultat 1 : la modélisation de la régénération du système de règle en usine	97
6.2.	Résultat 2 : les ressources, les méthodes, et l'organisation de la régénération du système de règle en usine.....	101
6.3.	Tableau de synthèse	105
7.	<i>Discussion</i>	107
7.1.	Reprise de l'argumentation et des apports de la thèse	107
7.2.	Les rapports entre l'usine et le bureau d'études.....	108
7.3.	Les compétences et les formations, et les leviers institutionnels pour l'usine conceptrice	110
	<i>Bibliographie</i>	113
	<i>Table des schémas</i>	123
	<i>Liste des tableaux</i>	124

Structure de la thèse

La recherche se présente sous la forme d'une thèse sur articles : quatre articles sont relus et interconnectés à l'aune d'un travail de recherche plus général présenté dans le présent manuscrit. Le chapeau traite du sujet de recherche général, présente la thèse, ses méthodes de recherche et en utilise les articles comme des briques validées par la communauté scientifique (ou en cours de validation) au service de l'argumentation générale. Le tableau suivant présente les articles, leur statut, et leur objet.

Tableau des articles présentés dans cette thèse

Article / titre / terrain	statut	Référence ou auteur.rice.s	Objet
Article 1 A model of creative heritage for industry: designing new rules while preserving the present system of rules	Article de conférence (août 2021)	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. <i>Proceedings of The Design Society</i> , 1, 141-150.	Modélisation de l'évolution d'un système de règles
Article 2 Innovative design on the shop floor of the Saint-Nazaire Airbus factory Terrain : Airbus (Saint-Nazaire)	Article publié (février 2022)	Harlé, H., Hooge, S., Le Masson, P., Levillain, K., Weil, B., Bulin, G., & Ménard, T. (2022). Innovative design on the shop floor of the Saint-Nazaire Airbus factory. <i>Research in Engineering Design</i> , 33(1), 69-86.	Mise en évidence d'un régime de conception en usine capable d'étendre le système de règles
Article 3 What does the factory's suggestion box reveal? An analysis of the design capabilities of a train maintenance centre from its idea management system Terrain: SNCF (Nantes)	Article soumis à <i>Creativity and Innovation Management</i> (juillet 2022)	Harlé, H., Le Masson, P., Weil, B., Bourlier, T., Veslin, Y.	Mise en évidence de l'ingénierie de validation autour de la prescription l'amélioration continue.
Article 4 Integrating numerous changes at a fast rhythm in an Industry 4.0 system: A strategy to control known and unknown parameters in an Industry 4.0 ramp-up combining expertise and data—The STMicroelectronics case Terrain: STMicroelectronics (Crolles)	Article pour journal soumis à <i>CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology</i> (août 2022)	Harlé, H., Hubac, S., Le Masson, P., Weil, B.	Étude sur la conception continue d'analyses de risque pour des changements très fréquents dans les semi-conducteurs

1. Introduction

1.1. L'industrie face aux crises : une capacité de transformation nécessaire

Depuis 4 ans, le virus de la Covid19 a rappelé l'importance cruciale de disposer de filières industrielles en fonctionnement, résilientes et indépendantes. En France, lors des premiers mois de propagation du virus, le système de santé dû faire face à diverses pénuries : masques, respirateurs, pousse-seringues électriques, et autres produits pharmaceutiques utilisés usuellement par les services de réanimation, manquèrent soudain cruellement. Les usines des chaînes d'approvisionnement classiques se révélèrent incapables d'augmenter fortement et rapidement la production, rendant les systèmes de santé particulièrement vulnérables. La pandémie impacta aussi d'autres secteurs par des diminutions ou des arrêts de production de composants indispensables aux produits finaux, par exemple les semi-conducteurs (Xu et al., 2020).

Cette crise a mis en évidence la défaillance de l'indépendance industrielle française. La désindustrialisation en est une des causes, largement documentée par les économistes. D'après le rapport de France Stratégie sur les politiques industrielles en France paru en décembre 2020¹, la part de l'industrie en France recule. Mesurée en part d'emploi, elle est passée de son apogée en 1974 avec un quart de l'emploi total à 10% aujourd'hui. En part de valeur ajoutée, elle a chuté de 30% du PIB dans les années 1950 à 13% aujourd'hui (prix courants, cf. Figure 1). Le rapport souligne que cette dynamique s'observe particulièrement en France mais le Royaume-Uni, l'Espagne, les États-Unis et l'Italie suivent la même pente. La Corée du sud et l'Allemagne semblent quant à eux résister. Cette désindustrialisation est liée notamment à l'avantage dont disposent les pays à bas coûts de production pour produire et exporter.

Depuis les années 2010, l'État français cherche à relancer l'industrialisation, avec notamment la création de la Conférence Nationale de l'Industrie puis du Conseil National de l'Industrie, qui vise à structurer et coordonner des filières industrielles. Des aides massives sont distribuées pour soutenir la compétitivité coût en diminuant le coût du travail, et la compétitivité hors coût en favorisant la hausse de la qualité des systèmes productifs via le soutien à la R&D et à l'innovation pour l'industrie (baisse de charges sur les bas salaires, Crédit Impôts Recherche (CIR), Crédit d'impôt pour la compétitivité et l'emploi (CICE) notamment).

¹ France Stratégie (2020), Les Politiques industrielles en France. Évolutions et comparaisons internationales, rapport pour l'Assemblée nationale, novembre, 688 pages. Rapporteur général : Vincent Aussilloux. Rapporteurs : Philippe Frocrain, Mohamed Harfi, Rémi Lallement et Guilhem Tabarly.

Cependant, en dehors de la promotion d'une transition vers l'industrie 4.0, ces mesures essentiellement monétaires ne repensent pas les modalités de l'industrialisation. Or, les crises révèlent des propriétés désirables pour l'industrie future : l'adaptation, la flexibilité, voire la transformation rapide d'un système productif face à un choc ou à un tournant stratégique de long terme. Dans le cas de la crise Covid, le virus a par exemple mis à l'épreuve les usines ; elles devaient travailler avec moins de personnel tout en le protégeant d'une contamination possible. Elles devaient également pour certaines modifier plus ou moins fortement leurs produits et leurs cadences pour s'adapter aux nouveaux besoins. La crise en Ukraine apporte son lot d'incertitudes et de défis pour la production : rupture d'approvisionnement en matières premières notamment en métaux, prix du gaz et des autres énergies. La crise climatique amène quant à elle de nouvelles contraintes et de nouveaux défis pour la production : réduire drastiquement l'impact environnemental, réviser la nature et l'usage des produits, changer leur mode d'industrialisation, leurs matières premières, la localisation et le nombre de fournisseurs et sous-traitants etc.

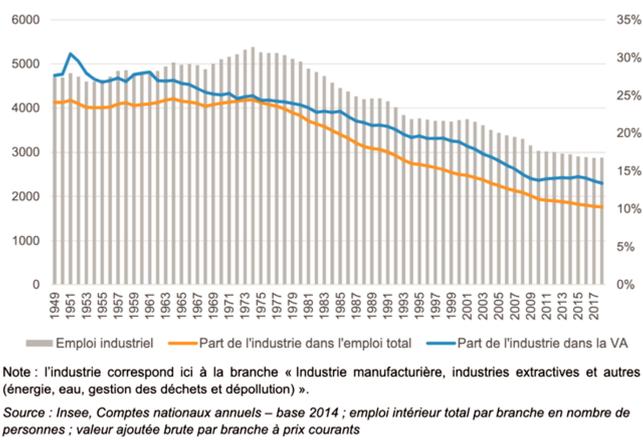


Figure 1 Nombre d'emplois industriels (milliers) et part de l'industrie dans l'emploi et la valeur ajoutée (prix courants), 1949-2018

Source : d'après France-Stratégie, *ibid.*

Ainsi, répondant à ces besoins, des concepts ont fleuri entre les années 2010 et aujourd'hui, qui sont autant d'inconnus désirables à explorer pour l'usine et l'industrie de demain : « industrie 4.0 » (Ghobakhloo, 2020), « usine du futur » (Pessot et al., 2020), « smart factory » (Osterrieder et al., 2020), « usine verte » (Gebbe et al., 2015), « industrie responsable », « usine agile » (Scheuermann et al., 2015) etc. Ces appellations appellent à un virage technologique et/ou à des promesses de flexibilité très poussée de la production, de personnalisation de masse des produits, ou encore de réduction de l'impact environnemental.

L'usine semble aujourd'hui prise dans une double injonction apparemment contradictoire. D'un côté, elle fait l'objet d'un appel à l'innovation, à la transformation profonde de ses modes opératoires et de sa gestion. Les mouvements industriels contemporains visent l'hyper-adaptabilité, la flexibilité des machines, des chaînes logistiques, ou encore des opérateurs et de leurs compétences (Scheuermann et al., 2015). De l'autre côté, elle est issue d'une histoire accumulant les règles, les

normes, les procédures. Les doctrines de gestion industrielle et de maîtrise des procédés se sont en effet tournées vers la stabilisation pas à pas d'un système productif de plus en plus complexe. Par exemple, Taylor sépare la conception (bureau d'études) de l'exécution (usine) et invente l'ingénieur des méthodes, qui capte, au plus proche de la ligne de production, les améliorations à intégrer à la prescription pour pouvoir les systématiser. Autre exemple, dans la deuxième moitié du XXe siècle, la recherche opérationnelle connaît un succès croissant notamment pour planifier, gérer les stocks, ou encore ordonnancer. Des méthodes mathématiques (optimisation combinatoire, modélisation multicritère, simulation, etc.) sont utilisées pour optimiser la production (Cheref, 2017; Crama & Dupont, n.d.). Le but recherché est de déterminer la règle de production la plus efficace selon le critère choisi. Autre manifestation de la recherche d'optimisation et de l'accroissement des règles, la Gestion de la Qualité Totale (Total Quality Management) est généralisée par le modèle japonais et vise à modifier ou ajouter des règles de production et des normes pour ne produire que des produits au niveau de qualité choisie, plutôt que de ne vendre que les produits testés conformes (Graves et al., 1993).

Ce double mouvement peut néanmoins trouver son explication : les systèmes productifs se sont peu à peu transformés : ils ont intégré des nouveaux procédés, se sont automatisés, ont su faire face à l'augmentation des normes environnementales, de qualité, ont mis en place des chaînes de production mondiales, etc. Dans le même temps, la prescription croissante permettait de contrôler et de rendre permanente et stable cette évolution. Ces doctrines de gestion se sont donc traduites localement² par des usines de plus en plus réglées.

Or, l'exigence contemporaine de transformation des usines et de l'évolution de ses doctrines de gestion semblent jugulées par cette omniprésence des règles. L'usine pourrait-elle concevoir rapidement et intensivement les règles de sa propre transformation ? Mais alors, que ferait-elle des règles accumulées par le passé, qui contraignent fortement la production et rendent difficile toute tentative de changement ? Comment concevoir des nouvelles règles compatibles avec la production actuelle ? L'usine pourrait-elle se doter d'une capacité à régénérer son système de règles pour répondre aux nouvelles contraintes qu'elle doit affronter ?

Pour préciser notre propos, définissons à présent les termes attachés à notre recherche. Nous donnerons par la suite une définition large du mot « usine », comprise comme un système de production et de transformation de biens. Dans cette thèse, ce mot est volontairement choisi pour la diversité de réalités qu'il recouvre : entre le chantier naval, l'usine agroalimentaire, l'usine d'automobile, l'usine de textiles, l'usine d'aérospatial, ou l'usine de semi-conducteurs, les produits et les contraintes ne sont pas les mêmes, les organisations et les compétences diffèrent. On trouve ainsi une variété de typologies : par type de produits, par taille de série, par cadence, par degré de standardisation, par degré d'automatisation, par fonction (lancement, assemblage, maintenance, process, etc.), etc. Nous nous concentrerons particulièrement dans cette thèse sur le type de système de règles associé à l'usine. De la même manière que pour « usine », nous avons considéré une définition très générale du mot « règle ». Nous appellerons « règle » de l'usine, toute source écrite qui prescrit l'action, ses performances et sa façon de les atteindre : les normes, les modes opératoires, les consignes, les gammes, sont autant de règles que l'on peut trouver pour soutenir la production. Nous

² Nous nous plaçons dans le cas français

userons alternativement de « règle » et de « prescription » comme deux mots porteurs d'un même sens dans notre cadre. Les règles forment un système qui assure la cohérence de la production et sa répétabilité. Cependant, ce système est imparfait : issu d'une accumulation de prescription années après années, il n'est pas nécessairement complet, homogène, ni parfaitement en accord avec l'action effectuée. Il peut également comprendre des règles cachées ou moins connues, obsolètes, ou contradictoires³. Les systèmes de règles de l'usine peuvent de différentes nature : particulièrement figés, ou modulables, à fort degrés de liberté, ou très contraints. Nous nous concentrerons pour notre travail de recherche sur les usines qui ont un certain degré ou volonté d'évolution dans leur système de règles. Notons cependant que le système de règles et ses logiques d'évolution étant par nature inobservables sans instrument adapté, il est difficile de deviner a priori la nature du système de règles sans s'y tromper : on peut penser qu'une centrale nucléaire aura un système très stable, qu'un atelier de maintenance sera plus transformable. Mais nous ne savons pas quelle logique primera dans l'action, entre la nécessité de garder les règles présentes ou les faire évoluer : cela peut dépendre des pratiques managériales, des compétences des opérateurs, du rapport au normalisateur, etc.

Pour comprendre précisément cette tension entre règles et transformation de l'usine, nous allons étudier plus en détail le lieu où se jouent à la fois les conditions du respect des règles, de leur optimisation, et de leur évolution. Qui prescrit et qui exécute ? Quelles sont les conditions d'évolution du système de règles ? Ces questions sont au cœur du rapport de prescription, notion que le paragraphe suivant invite à approfondir.

1.2. Les rapports de prescription au sein de l'usine et leurs crises

Comment penser les transformations en usine ? Qui émet les nouvelles règles ? Ce paragraphe éclairera les rôles, les relations, les activités des différents acteurs du système productif autour de la prescription. A cette fin, nous nous doterons d'un modèle que nous illustrerons à l'aide des grands moments de l'histoire industrielle. Nous les discuterons dans ses deux modalités afin d'en éclairer les limites et les possibles extensions.

En France, la sociologie du travail, l'ergonomie, la sociologie des organisations, la gestion ont apporté une contribution majeure à l'étude des systèmes de règles et de leur dynamiques (Denis, 2007) (cf. Partie 2).. Ces disciplines partent du constat partagé qu'il existe une différence entre la prescription et le travail réellement effectué pour l'accomplir, la dépasser ou encore la contourner (Dejours & Molinier, 1994). (Hatchuel, 1996) rend visible et explicite l'activité de conception que cette distinction entre travail prescrit et travail réel masque. Il reprend à cette occasion la question des rôles et activités réelles des concepteurs et des exécutants, du BE et de l'usine.

³ La revue de littérature (cf. Partie 2) donnera plus de précisions sur le système de règles de l'usine.

Historiquement, l'ouvrier-artisan, responsable de la production d'une pièce entière et de la façon de la produire, a progressivement laissé la place à l'ouvrier-opérateur qui ne devait plus qu'exécuter les tâches définies en amont par les concepteurs des produits et des méthodes. Cette rationalisation est notamment décrite dans (Forty, 1986) pour la manufacture Wedgewood au XVIIIème siècle. La commercialisation des poteries, faïences et porcelaines Wedgewood se faisaient de façon originale et nouvelle, dans des salons de présentation de vaisselle à travers l'Angleterre et l'Europe. La production s'effectuait donc sur commande, selon un modèle qu'il fallait respecter strictement. Pour faire disparaître les touches personnelles de ses artisans potiers et produire des lots de produits homogènes, Wedgewood embaucha des designers chargés de la description précise des produits ainsi que de sa production. Le processus de production se standardisa peu à peu, et les maîtres potiers devinrent spécialisés dans une des étapes de la fabrication.

F.W.Taylor systématise cette division du travail entre conception et exécution. L'ouvrier n'est plus concepteur de son propre travail, mais exécute les tâches de la façon dont les bureaux d'études et des méthodes ont jugé la meilleure et la plus efficace, sur la base d'expérimentations en ligne et notamment d'un chronométrage des tâches (F. W. Taylor, 1919).

Ce modèle productif s'est répandu et a perduré : aujourd'hui encore, le bureau d'études (BE) conçoit les produits, et conçoit l'industrialisation conjointement avec le bureau des méthodes (BM). L'usine produit en exécutant les plans donnés par le BE et le BM. Le modèle des rapports de prescriptions (Hatchuel, 1996) rend compte de cette division du travail et de ses implications. Il décrit la relation, les actions et leurs effets entre un prescripteur (une personne ou un collectif) émetteur des règles, et un prescrit (une autre personne ou collectif) qui les reçoit et les met en œuvre. Surtout, l'introduction d'une modification ou d'une nouveauté dans l'industrialisation exige le changement ou l'émergence d'une règle compatible avec l'ensemble des règles en vigueur. En effet, le danger serait de rendre obsolète les autres règles du système qui permettent pourtant de contrôler la production afin de garantir une répétabilité de la production à des niveaux de performance (qualité, cadence, coût, etc.) choisis. L'étude approfondie des rapports de prescription en usine permet donc de décrypter les rôles et les enjeux opérant lors d'un changement de règle.

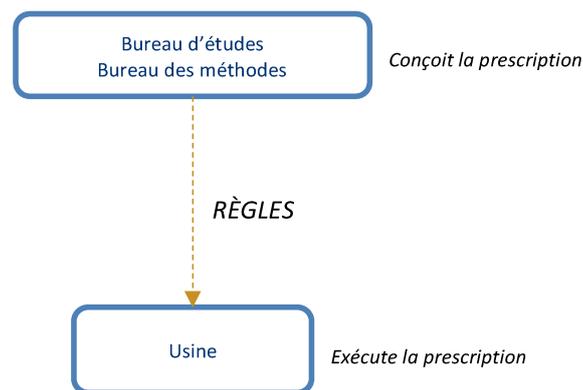
Le rapport de prescription entre deux collectifs peut prendre deux modalités. Dans la première modalité, la prescription unilatérale, un prescripteur conçoit unilatéralement pour un prescrit qui exécute. Dans la deuxième modalité, ce rapport de prescription strict s'enrichit d'une réciprocité: le prescrit conçoit également, et renvoie au prescripteur ce qu'il faut modifier de la prescription. Les deux modalités ainsi que leur ancrage empirique sont tour à tour présentées dans les paragraphes suivants.

1.2.1. Modalité 1 : Le rapport de prescription unilatéral et l'anticipation des changements dans la prescription

Nous allons étudier par un modèle simple ce que le rapport de prescription dans sa forme « pure » signifie pour l'usine, et ce qui advient lors d'un changement (Hatchuel, 1996).

Soit un rapport de prescription unilatéral, réunissant un collectif prescripteur – le BE et BM- et un collectif prescrit -l’usine. Le prescripteur régit l’action par un ensemble de règles qu’il adresse au prescrit. Le prescrit exécute les règles et réalise la prescription. Ainsi, le BE et le BM conçoivent les plans, les modes opératoires, les performances attendues de la production. L’usine réalise ensuite ce que le prescripteur a prévu. En ce sens, les étapes de conception du produit et de son industrialisation reviennent au collectif prescripteur (BE et BM) ; la production relève de l’application pratique des plans du BE/BM, étape supposée exempte de conception. Cette modalité est représentée dans le schéma suivant.

Schéma 1 : rapport de prescription unilatéral



L’usine relève de prime abord d’un modèle proche de cette modalité théorique : la production s’opère dans le cadre d’un système de règles établi et contraint – c’est-à-dire laissant peu de degré de liberté à l’usine pour réaliser la prescription. Les BE et BM conçoivent les produits et leur industrialisation : les plans, les modes opératoires, les performances attendues de la production. Lorsqu’un changement de règle survient, par exemple une modification d’un outil, de l’ordre des procédés, d’organisation des équipes etc., c’est encore les BE et BM qui conçoivent le changement tandis que l’usine le met en œuvre opérationnellement.

Des systèmes experts à l’industrie 4.0, l’automatisation est souvent caractéristique de cette vision du rapport de prescription. Si les différents paramètres d’environnement et de procédés impactant la production sont contrôlés, les performances de la production sont également connues et dans les limites souhaitées. Dans sa limite extrême, la prescription confine totalement l’action. C’est le cas pour certaines productions totalement automatisées, comme les semi-conducteurs depuis plus de 20 ans. Les règles de production sont conçues par le bureau d’études tandis que les automates exécutent les règles. Ainsi, l’industrie 4.0 est souvent décrite par des logiques d’automatisation et de robotisation systématique, de simulation notamment par jumeaux numériques ou par réalité augmentée, ceci étant rendu possible grâce à des capacités computationnelles et de stockage de données très fortes, de l’analyse complexe des données en temps réelles, des objets et des machines connectées, le tout opérant au sein d’un système cyber-physique (Cyber Physical System, ou CPS en anglais) reliant les flux de données au flux des machines physiques (Kohler & Weisz, 2016; Osterrieder et al., 2020) etc. Sa mise

en œuvre repose donc sur une transformation technologique du système en place, et tend vers la promesse du pilotage à distance d'un système entièrement conçu.

Le modèle fonctionne pour une industrie supposée totalement automatisée, en régime nominal c'est-à-dire dans les conditions prévues par le BE. Néanmoins, il suffit d'une crise non prévue dans le système de règles, pour que la production s'enraille (Tupa et al., 2017). Il peut s'agir d'un dysfonctionnement d'une machine, d'une interaction non anticipée entre plusieurs paramètres, d'un changement non anticipé des consommables etc. Deux possibilités s'ouvrent alors. D'abord, la résolution de la crise peut passer par les traditionnels organes concepteurs, au risque d'un arrêt total de la production. Cela suppose alors un organe conceptif fort, disposant d'une connaissance très fine du système productif, de ses failles potentielles, capable de concevoir un système robuste et résilient (Chukwuekwe et al., n.d.). Ensuite, les capacités de conception au plus près de la ligne de production peuvent détecter et comprendre le problème, aménager le système localement et produire en mode dégradé, le temps de retrouver la règle qui va permettre de repasser en régime nominal. Ainsi, une littérature sur l'industrie 4.0 comme système socio-technique s'est développée (Coenen & López, 2010; Veile et al., 2019). Elle met en avant la dimension humaine indissociable des solutions technologiques pour la mise en œuvre de l'industrie 4.0. Ainsi, les compétences espérées de l'« opérateur.rice 4.0 » résident non seulement dans la maîtrise des technologies utilisées, mais aussi dans des qualités de résolution de problèmes, de créativité voire d'imagination et d'improvisation sans compromettre la production (Kaasinen et al., 2020; Romero, Bernus, et al., 2016; M. P. Taylor et al., 2020).

Ainsi, l'industrie 4.0 remet à jour la tension entre l'hypothèse de confinement de l'action par une prescription très forte et le besoin d'opérateur.rice.s capables de prescrire eux-mêmes en situation de crise. Le rapport de prescription se relit alors selon la deuxième modalité.

1.2.2. Modalité 2 : le rapport de prescription réciproque et l'intégration des changements locaux à la règle

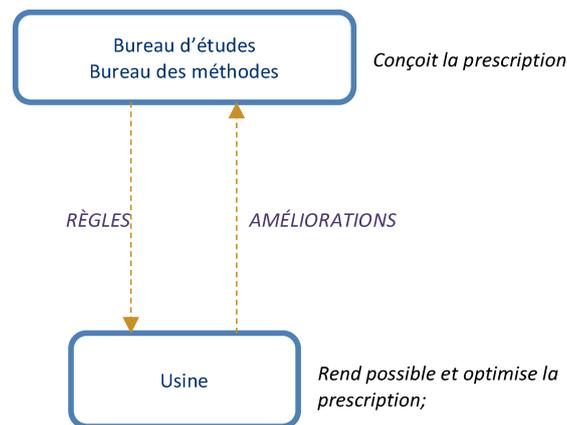
Historiquement, l'usine a peu à peu reconnu et encouragé la conception locale autour de la règle, jusqu'à instaurer une réciprocité dans le rapport de prescription inhérente à l'activité de l'usine.

Dans les premiers temps de la taylorisation et de la séparation systématique des tâches de production et d'exécution, Taylor constatait déjà l'activité d'optimisation des ouvrier.e.s autour de la production. Il inventa alors l'ingénieur des méthodes afin de saisir les améliorations au plus près de la ligne de production et les intégrer à la prescription de la tâche. De même, lors d'une des premières tentatives françaises de taylorisation, Michelin mit en place une boîte à suggestion pour permettre et inciter les ouvrier.e.s à participer à la hausse de la productivité. L'entreprise désigna alors un « ingénieur des suggestions » responsable de promouvoir la boîte à idées, de la remise des récompenses, et de la bonne mise en œuvre des idées (Tesi, 2008).

L'écart entre le prescrit et le réel, mis en évidence en sociologie du travail et en ergonomie (Denis, 2007; Teiger et al., 2006), devint progressivement un espace de conception locale reconnu, permettant d'optimiser la règle, de façon individuelle ou collective. Cet espace est utilisé pour mobiliser l'ensemble

du personnel de l'usine et donne par là même un rôle majeur aux opérateurs, comme levier de la performance (Dejours & Molinier, 1994). L'optimisation identifiée est alors incorporée à la règle par le BE/BM. Le rapport de prescription réciproque, rendu possible par la différence entre réel et prescrit, s'établit alors selon le Schéma 2. Par rapport à la première modalité, cette réciprocity décloisonne donc quelque peu les rôles attribués historiquement : l'un conçoit les plans, l'autre conçoit leur bonne (ou meilleure) applicabilité, en même temps qu'il les exécute.

Schéma 2 : Le rapport de prescription réciproque



Dès les années 1950, le kaizen -ou amélioration continue – promu par le toyotisme puis reprise par le lean management (Sanchez & Blanco, 2014) comme principe général et décliné en de nombreux outils, met en lumière la capacité individuelle et collective à améliorer la prescription au sein de la production et tirent parti de cet écart entre réel et prescrit, encourageant cette activité de conception locale. Le mouvement participatif et toutes les méthodes s'y afférant se répandent, autant dans un souci de démocratie et de réalisation au travail, que pour améliorer les performances productives : les années 70 et 80 furent par exemple marquées par les cercles de qualité (Chevalier, 1989), et les équipes autonomes (Detchessahar & Honoré, 2002).

On peut remarquer que dynamiquement, ce modèle se stabilise de deux façons (Hatchuel, 1996) :

- Le prescripteur ne reconnaît pas ce rapport et reste dans l'unilatéralité, au risque d'avoir une prescription de plus en plus inadaptée à la production.
- Le prescripteur prend en compte cette activité et intègre les améliorations à la règle. Cette voie nécessite alors à la fois encourager l'activité de conception autour de la prescription mais également d'améliorer la prescription elle-même.

1.2.3. L'optimisation et les limites de M1 et M2

Les crises mentionnées au début de cette introduction imposeraient des changements forts et massifs de l'industrialisation, et donc de sa prescription. Pour répondre à ces changements, une voie possible est d'optimiser chacune des deux modalités. Dans la prescription unilatérale, cela revient à

confiner à l'extrême la production par un BE fort, doté de très profonde connaissance de l'industrialisation, capable de concevoir un système robuste et résilient, et adaptatif (Chukwuekwe et al., n.d.). Dans ce cas, pour être optimisée, la prescription doit être la plus complète possible. L'optimisation de la prescription réciproque pourrait se faire par l'optimisation des démarches d'amélioration continue en production et par l'amélioration de la réciprocité, avec une meilleure prise en compte des problèmes et solutions de la production dans la prescription, voire un co-design de l'industrialisation entre les BE-BM et l'usine ((Flatscher & Riel, 2016).

Cependant, les rapports de prescription unilatéral ou réciproque présentent des limites, même optimisés. Les deux modalités présentées font notamment l'hypothèse d'une prescription stable et peu évolutive. D'un côté, la prescription unilatérale semble démunie lorsqu'un problème non anticipé et de nature inconnue advient. Il faut alors, une fois la production arrêtée, déployer un arsenal d'analyse de données -si elles sont disponibles- au sein de systèmes complexes, afin de comprendre l'erreur et de remettre sous contrôle la production. Cela suppose un temps nécessaire d'analyse du problème, et de mise en route d'un nouveau système.

De l'autre côté, le modèle 2 résulte de l'application d'une prescription qui contient elle-même l'ensemble des remontées de l'usine, historiquement accumulées. Un tel modèle pourrait-il intégrer des chocs non prévus, des changements plus forts, expérimenter des voies nouvelles tout en maintenant à niveau la production ? Si une crise survient, n'y aurait-il pas une tentation forte à retourner vers une prescription unilatérale pour des raisons d'efficacité ? Mais alors, dépourvue de l'activité d'optimisation de l'usine, des changements à grande échelles pourraient-ils advenir ? Les prescripteurs sauraient-ils d'avance quelle industrialisation mettre en place et comment le faire sans erreur du premier coup ? Le tableau suivant rend compte des deux modalités de la prescription et de leur limites.

Tableau 1: Synthèse des modalités du rapport de prescription

	M1 - Prescription unilatérale	M2 - Prescription croisée
exemple emblématique	usine 100% automatisée	toyotisme; usine avec participatif; amélioration continue en usine etc
logique d'optimisation	contrôler le plus possible la production jusqu'à la confiner; anticipation des problèmes et agilité pour reconfiguration rapide	favoriser l'amélioration continue en usine ; 2) améliorer la réciprocité de la prescription Ou 3) glissement vers M1 : recherche du contrôle et de l'automatisation.
environnement	paramètres à contrôler et leurs interaction connus et stables	stable ou évolution lente
prescription du BE	stable et totale	stable et incomplète
conception en usine	absente	compléter la prescription
limites	si problème non pré-identifié; besoin d'évolution forte et rapide	si choc, ou besoin d'évolution forte et rapide

Ces deux grandes voies de gestion de la production définissent un spectre de possibilités et ne sont pas mutuellement exclusives. Elles apparaissent plutôt comme les limites du cadre des modes d'actions possibles pour optimiser la production et sa capacité à se transformer. Néanmoins, elles font l'objet d'une hypothèse tacite. Au niveau de l'usine, la prescription est donnée ou à enrichir, à optimiser. Dans tous les cas, elle est un objet stable autour duquel s'articulent les rapports de prescription. Nous pouvons toutefois remarquer, après les avoir assimilés, que le bureau des méthodes n'a pas exactement la même fonction que le bureau d'études, et que ses fonctions ne sont pas figées ni explicitées clairement. Sa plurivalence est peut-être le signe des potentielles fragilités des deux modèles, que l'absence de BM rendrait difficilement soutenable ; son existence est sans doute une des clés de l'évolution des règles. Le BM est-il concepteur ou exécutant ? Est-il expert de la règle et de son application ou de sa révision ? Les ingénieurs méthodes des débuts du taylorisme ont d'abord été très au plus près de la production. Leur mission consistait à détecter les gestes et techniques effectués en pratique par les ouvriers et qui pouvaient améliorer les performances. Il s'agissait alors de les tester et de les intégrer à la prescription pour que ces pratiques deviennent règle. Par conséquent, le gain de performance qui en découlait devenait systématique. Avec le temps et l'importance que cette activité prenait pour l'usine, des bureaux des méthodes se sont formés, et cette organisation a perduré jusqu'à aujourd'hui. Cependant, la fonction de ce bureau prend des sens différents : leur rôle entre le BE et la production, c.-à-d. entre le prescripteur et l'exécutant, demeure variable, comme en témoigne d'ailleurs les différentes localisations choisies. Par exemple, il peut avoir un rôle comparable au BE, non pour la conception des produits, mais la conception de l'industrialisation. Il peut également avoir un rôle de mise au point et d'optimisation de la prescription issue du BE. Le BM peut en outre être le soutien concepteur de la production, quand les opérateurs cherchent à modifier la prescription, ou encore le garant de la règle et de son application. Selon les cas, il a des équipes hors de l'usine avec le BE, dans l'usine mais traditionnellement en hauteur, avec le BE, ou encore au plus proche de la production.

Nous avons vu que les grandes transformations attendues pour l'industrie nécessitent une révision rapide et robuste du système de règles. Pourrait-on lever cette hypothèse de stabilité de la prescription ? Comment l'usine pourrait jouer un rôle dans cette transformation et amplifier l'intensité de la révision de son système de règles ? Pourrait-on lui ôter ses appendices prescripteurs traditionnels, les bureaux d'études et des méthodes ?

1.3. Problématique de la thèse et enjeux

Un troisième modèle de prescription s'esquisse alors : l'usine pourrait elle-même se saisir de la conception de la prescription pour la rendre façonnable, ou transformable, et finalement évolutive. La production n'aurait plus seulement à exécuter les règles, mais aussi à retrouver leur sens, révéler leurs éventuelles incohérences et les réviser.

D'emblée, les difficultés voire les incompatibilités apparaissent ; un éventail de questions surgit.

En premier lieu, la révision de la prescription semble en elle-même un objet méconnu. Si nous avons présenté dans la modalité 1 le régime de l'exécution d'une nouvelle règle conçue par le BE, et dans la modalité 2 le régime de l'optimisation de la règle, nous ne savons pas ce que signifie « réviser », ni « faire évoluer ». Il reste une pluralité de modes d'évolution de la règle, au-delà de l'optimisation ou

de la nouveauté pure (sans antécédent) qui pourraient être envisageables. Plus généralement, si la règle est un objet de conception, nous ne savons pas précisément ce qui est à concevoir dans une règle ou dans un système de règles. En particulier, l'innovation doit se faire dans une logique de préservation. Nous avons montré (cf. 1.1) que les doctrines de gestion de l'usine reposent sur la prescription, notamment parce que le système de règles permet de rendre la production stable avec des performances contrôlées et répétables. Or, si l'on révisé les règles, comment s'assurer de la stabilité de la performance (ou de la meilleure performance) du « nouveau » système de règles ? Comment concevoir une nouvelle version de la règle qui soit compatible avec le système existant ?

Deuxièmement, les conditions d'opérationnalisation de ce modèle de révision restent pour l'instant énigmatiques. Une usine n'est pas organisée pour la conception, n'en a pas le temps – dédié à la production- ni les compétences. Comment peut-elle organiser une nouvelle activité de conception en son sein ? Comment en acquérir les compétences ? Elle n'est pas non plus experte du système de règles, mais seulement de son application. Comment naviguer dans le système de règles, et en assurer sa révision ? De quels outils et méthodes dispose-t-elle ? De quels moyens matériels et de quel type de management doit-elle se doter pour un tel modèle ?

Cette thèse vise à étudier ce modèle de prescription par et pour l'usine, et tente d'élucider et de surmonter les difficultés exprimées précédemment, et que nous pouvons résumer selon deux paradoxes : la révision des règles doit permettre à la l'usine d'innover tout en se préservant elle-même. L'usine n'est a priori pas organisée ni outillée pour l'activité de conception de ses règles.

Pour traiter de la transformation de l'usine et de l'évolution du système de règles, nous aurions pu étudier l'optimisation des rapports de prescription ou encore la recherche d'une meilleure prescription. Cela nous aurait amené à ré-examiner les rapports entre les bureaux d'études, des méthodes, et la production. Cependant, ces questions seront laissées volontairement de côté et pourront être l'objet de recherches ultérieures. Nous avons choisi d'enquêter sur la possibilité d'un troisième modèle, l'usine sans ses appendices. Cette posture théorique « extrême » permettra de tirer des enseignements sur les capacités de l'usine, qui pourront ensuite enrichir les deux premiers modèles connus. En pratique, nous ne nous attendons pas nécessairement à rencontrer un modèle 3 « pur », mais plutôt à en repérer des émergences ou des formes distillées au sein d'usines fonctionnant selon des modèles généraux de prescription classique (modèle 1 ou 2).

Élucider ces énigmes et traiter cette problématique nous permettra de contribuer à apporter des éléments de réponse à de grands enjeux contemporains concernant l'industrie : en déplaçant le regard sur le système de règles et sa régénération, nous cherchons à rendre visibles, compréhensibles et actionnables des phénomènes qui jusque-là semblent cachés. En effet, faire du système de règles industriel un objet à concevoir et à reconcevoir permet certainement de repenser les logiques de ré-industrialisation et de relocalisation à l'œuvre en France.

1.4. Organisation et plan de la thèse

Comme annoncé dans l'incipit, la thèse se compose d'un chapeau suivi de 4 articles.

Après la présente introduction, le chapeau exposera d’abord une revue de littérature pour comprendre le rapport de l’usine à la règle ainsi que les spécificités et outils pour penser la conception de règles (Partie 2). Les questions de recherche seront ensuite isolées dans une partie qui leur sera dédiée. Nous aborderons la question principale de la révision du système de règle de l’usine selon deux axes : la modélisation de la reconception du système de règles industriel (QR1) et les méthodes, organisation et ressources de cette reconception (QR2) (Partie 3). La démarche générale de recherche intervention autour de nos trois terrains et l’articulation des recherches théoriques et empiriques seront ensuite explicitées dans une partie sur la méthodologie (Partie 4). Les articles constituant la thèse seront chacun résumés et reliés aux questions de recherche du chapeau (Partie 5). Les résultats généraux répondant aux questions de recherches de la thèse seront ensuite détaillés (Partie 6). Enfin, une dernière partie discutera des résultats, et de ses implications théoriques et empiriques (Partie 7). Le plan est représenté dans le schéma ci-dessous.

Schéma 3 : Plan du chapeau

Problématique	Comment l’usine peut-elle reconcevoir son système de règles ?
Revue de littérature	L’évolution du système de règles en usine La reconception d’un système de règles
Questions de recherche	<ul style="list-style-type: none"> - QR principale : Comment renouveler un système de règles en usine - QR1 : Comment modéliser la re-conception d’un système de règles en usine ? - QR2 : Quelles méthodes, organisation et ressources sont nécessaires pour cela ?
Méthodologie	<ul style="list-style-type: none"> - Recherche intervention sur trois terrains différents - 4 articles structurant une organisation matricielle
Résumé et apports des articles	<ul style="list-style-type: none"> - A1 : modélisation de la reconception d’un système de règles - A2 : un régime de reconception des règles chez Airbus Saint-Nazaire - A3 : la recherche dans le système de règle au technicentre SNCF - A4 : la révision intensive des règles en industrie 4.0 chez STMicroelectronics
Résultats généraux	<p>R1 : la modélisation de la reconception d’un patrimoine de création</p> <p>R2 : les conditions d’opérationnalisation</p>
Discussion	<p>Conclusion : Résumé des apports</p> <p>D1 : le rôle du Bureau d’études</p>

2. Revue de littérature

Pour mener notre enquête sur la révision du système de règles industriel, nous avons besoin de connaître ce que la littérature académique dit du phénomène. Ainsi cette partie s'organise en deux temps. D'abord, nous expliquons les analyses théoriques sur le système de règles, issues essentiellement de la sociologie du travail et des organisations. Nous présentons à cette occasion leurs traces empiriques, ainsi que leur réouverture par les systèmes productifs contemporains. Dans un deuxième temps, nous nous munirons des théories de la conception pour comprendre comment appréhender la régénération du système par l'usine du point de vue de la conception, et quels outils théoriques peuvent nous aider dans cette quête.

2.1. Le système de règles de l'usine et sa révision : éléments théoriques et exemples empiriques

2.1.1. La révision du système de règles dans la littérature

(Denis, 2007) retrace l'histoire de la notion de rapport de prescription et de ses questionnements.

De nombreux travaux en sociologie des organisations, en sociologie du travail, en ergonomie et en gestion se sont penchés sur la question de la règle. En effet, l'activité de production est déterminée par un ensemble de règles qui soutiennent l'action et en assurent sa répétabilité. (J.-D. Reynaud, 1995) en donne une définition : « La règle est un principe organisateur. Elle peut prendre la forme d'une injonction ou d'une interdiction visant à déterminer strictement un comportement. Mais elle est plus souvent un guide d'action, un étalon qui permet de porter un jugement, un modèle qui oriente l'action ». L'évolution des manières de produire, des procédés utilisés, des performances atteintes, (etc.) sont donc intrinsèquement liées à l'évolution ou l'émergence des règles.

Cependant, les règles ne déterminent pas entièrement l'action : le travail réalisé s'écarte de l'ensemble des consignes, modes d'emploi, recommandations, normes qui l'encadrent. Cet écart est notamment mis à jour et étudié en France par la sociologie du travail et des organisations (Dejours & Molinier, 1994), par l'ergonomie (Lamonde & Montreuil, 2005) mais aussi par les cognitiens qui cherchaient à rendre explicite les règles pour les mettre sous forme de système experts (Terssac et al., 1988). L'atelier est en effet le lieu de savoir et de savoir-faire inconnus des prescripteurs et absents de la prescription ; une part d'activité non-dite, individuelle ou collective, rend la prescription opératoire et dans certains cas, l'améliore (Borzèix & Linhart, 1988). La répartition du travail, la diffusion d'informations nécessaires à la production, les gestes, les « tours de mains » et savoirs-faire pour réaliser la prescription, les astuces, l'improvisation ou encore le « bricolage » facilitent le travail notamment lorsqu'il faut faire face aux imprévus (Borzèix & Linhart, 1988; Schwartz, 1989). (B. Weil & Hatchuel, 1992) montre que lors du processus d'automatisation de la production des années 1980, le travail des cognitiens s'est heurté à la difficulté de débusquer et d'explicitier l'ensemble de ces savoirs et savoir-faire pour les rendre automatisables selon les logiques des systèmes-experts. Cette vague d'automatisation et les nombreuses règles qui en découlent aurait pu conduire à la réduction de cet espace d'action autour du prescrit. (Terssac et al., 1988) ou encore (Böhle & Milkau, 1988) montrent au contraire que l'accumulation de règles a eu pour effet de décupler les degrés de liberté de l'opérateur.rice, en particulier lorsqu'il fallait faire face aux perturbations, aux imprévus, aux pannes inexplicables, et plus à tous les aléas qui n'étaient pas pris en compte dans la prescription.

En sociologie des organisations (Crozier & Friedberg, 1977) propose une analyse stratégique des organisations dans lequel la règle joue un rôle fondamental : elle articule autour d'elle les jeux de pouvoirs et sont le reflet des rapports de force et marchandages entre les acteurs dans leur lutte d'intérêt. Chacun agit en respectant ou en transgressant la règle. La règle crée autour d'elle-même une zone d'incertitude, de « jeu » avec un double mouvement paradoxal : plus il y a de règle, plus l'action est contrainte et le jeu limité, mais plus il existe des zones de jeu qui rendent incertaines les actions des acteurs. Le jeu de négociation autour de la règle est selon (Crozier & Friedberg, 1977) ce qui détermine « le mode de gouvernement réel de l'entreprise ».

D'autres auteurs associent directement le dépassement de la règle à l'innovation. (Babeau & Chanlat, 2008, 2011) décèle dans l'acte transgressif et la déviance ordinaire un acte de négociation silencieuse qui permet l'équilibrage de la bonne marche de l'organisation. (Alter, 1999) explique que la transgression et le « désordre » sont une source majeure et nécessaire à l'innovation en entreprise. Il découle de cet état la fragilité des innovateurs et la « lassitude » d'être en porte à faux avec les règles. Dans la même idée, les travaux sur slack organisationnel (Bourgeois III, 1981; Cyert & March, 1963) portent l'idée d'une marge de manœuvre dans les moyens, le temps de travail, le financement, etc. qui est peut être favorable à l'exploration et à l'apparition de projets innovants.

(E. Reynaud & Reynaud, 1994) repart de la distinction entre le formel and l'informal ((Roethlisberger, 1939) mais pour en mettre en avant deux systèmes de règles concurrents : une régulation de contrôle – l'ensemble des règles fixées de l'extérieur et imposées au groupe de travail – et une régulation autonome – l'ensemble des règles implicites qui font consensus pour le travail du groupe de travail. La deuxième source de règles provient de l'ensemble des gestes, mode d'organisation, et des actions faites au-delà de la règle prescrite. Elle permet à l'activité de se faire, en la tirant des impasses de la régulation de contrôle. Les deux régulations (au sens de processus de

création des règles) cohabitent. E. et J-D. Reynaud parle alors de régulation conjointe pour désigner l'ensemble des compromis entre les deux formes régulations. La régulation conjointe est donc par nature instable, évolutive, et sans cesse rediscutée et renégociée, par des accords locaux implicites ou explicites. (Terressac et al., 1988)

(Hatchuel, 1996) propose de reconsidérer la marge entre le prescrit et le réel comme un espace de conception de rapports de prescription réciproques. Comme expliqué en introduction, le rapport de prescription simple entre un acteur prescripteur (dans notre cas, le BE) et un acteur prescrit (dans notre cas, l'usine) se double d'une activité de conception qui rend opératoire la prescription. La reconnaissance de cette activité instaure un apprentissage croisé et une réciprocité dans la prescription : l'usine se met alors à prescrire le BE en retour.

Nous pouvons dès à présent remarquer que ces approches mènent à une évolution du système de règles très progressive. De plus, l'approche de (E. Reynaud & Reynaud, 1994) ne présente jamais la révision des règles comme une démarche explicite de conception à mener : l'évolution du système de règles dépend de la négociations entre les régulations, et de décisions locales, compromis implicites ou explicite entre les acteurs. (Hatchuel, 1996) souligne la dimension doublement conçue de la prescription. Cependant, il se place implicitement dans l'hypothèse d'une prescription stable et simplement optimisable, perfectible. Les rapports de prescription réciproques expliquent difficilement une révision plus importante du système de règle de l'usine. Dans chacune de ces propositions théoriques, l'usine ne semble pas dotée d'une capacité de conception pour une régénération significative et explicite et collective de son système de règle. Avec ces éléments théoriques, nous pouvons désormais illustrer empiriquement le rapport à la règle de l'usine et ses limites.

2.1.2. Éléments historiques illustrant la révision du système de règles

Dans ce paragraphe, nous allons illustrer les notions précédemment présentées par des exemples tirés des grands mouvements productifs du XXe siècle. Sans avoir l'ambition de présenter une histoire industrielle continue et exhaustive, nous nous arrêterons sur quelques exemples des doctrines de gestion de production et de leurs méthodes et outils qui ont traversé le siècle, et qui ont déterminé en particulier l'évolution du système de règles.

Le.a lecteur.rice pourrait s'étonner que notre étude de la littérature ne s'inscrive pas dans une histoire industrielle plus longue, où nous aurions pu observer les rapports de prescriptions dans les grandes manufactures du XVIIIème siècle, par exemple, ou encore l'impact de la mécanisation au XIXe siècle. De fait, il nous a semblé que le XXe siècle était une période suffisamment fructueuse pour l'approfondissement de notre problématique, pour deux raisons. D'abord, il avait porté des révolutions industrielles majeures et très documentées, tout en restant dans une logique très taylorienne toujours actuelle de division entre la conception par les BE et BM et l'exécution par l'usine. Ensuite, les industries contemporaines sont directement issues de l'héritage de ces doctrines de gestion ; les systèmes de règles actuels se fondent sur les règles accumulées pendant le siècle dernier, selon les logiques que nous avons ébauchées.

Rappelons d'abord que, au-delà des mutations industrielles contemporaines décrites en introduction de cette thèse, le visage de la production a considérablement changé au cours du XXe siècle notamment dans sa seconde moitié. Les pays d'Europe tels que la France sont passés de la reconstruction après-guerre où l'offre était insuffisante par rapport à la demande de biens, à une consommation de masse, accompagnée d'une multiplication des produits et de leurs variétés en termes de complexité et de qualité. La mondialisation fortement accrue depuis les années 1980, se manifestant par la libéralisation des échanges commerciaux, permettait aux entreprises de livrer et recevoir des composants pour des produits finaux dans le monde entier et s'est traduite par une concurrence de plus en plus forte et diversifiée des productions étrangères.

Les usines et leur doctrine de gestion se sont adaptées à ces mutations, en même temps que la performance portait sur des facettes de plus en plus variées : organiser la montée en qualité et en compétences de la production, livrer dans des délais plus courts et pouvoir planifier avec précision ce délai, choisir ses lieux de stockage, ses modes de livraison, automatiser la production, etc. Des outils de gestion plus ou moins sophistiqués sont apparus pour répondre à ces nouveaux enjeux et faire évoluer le système de règles, dans ses performances et ses façons de les atteindre.

Le taylorisme du début du 20ème siècle se concentrait sur la productivité, dont l'amélioration s'obtenait par la maîtrise et la répétabilité de plus en plus fine des procédés. Les ingénieurs du bureau d'études, dont la tâche était de concevoir les produits et leur industrialisation, devaient prescrire de la meilleure façon possible les tâches des opérateurs. La figure de l'ingénieur.e méthodes date de cette période : il fallait, au plus près de l'atelier, identifier les meilleures pratiques et gestes qui n'étaient pas dans la prescription, mais qui permettaient de mieux réaliser la prescription ou de l'améliorer. Les méthodes les étudiaient et le cas échéant les optimisaient, avant de les intégrer à la prescription pour les systématiser. Le système de règles évoluait ainsi par intégration de ce qui était repéré comme écart à la règle chez les opérateurs, mais qui contribuait à rendre la production plus performante.

Dans les années 1950, le « modèle Toyota » se développa au Japon dans les usines Toyota. Étendu aux autres productions japonaises, il permit aux pays à l'industrie délabrée par la guerre de passer de niveaux de productivité et de qualité très faibles à des productivités et des niveaux de qualité élevés (en automobile et en électronique par exemple), avec une avance technologique dans certains domaines (dans les semi-conducteurs notamment). Ainsi en 1983, S. Shingo, ancien ingénieur méthodes chez Toyota et consultant international, publia « Maîtrise de la Production et Méthode Kanban » (Shingo, 1986) où il fait notamment état des écarts de productivité entre les usines japonaises et allemandes et les explique par les doctrines de production mises en place au Japon, notamment chez Toyota.

Un des exemples caractéristiques de la « production à la japonaise » est le juste à temps (JAT), « une philosophie basée sur l'élimination de tous les gaspillages et sur la mise en œuvre d'une stratégie de progrès permanent en termes de productivité »⁴. Il permet de fournir au client le nombre de produits qu'il demande au moment où il le souhaite, à l'endroit désiré et dans le standard de qualité et de coûts fixés (Lamouri & Thomas, 2019). Sa mise en œuvre repose sur la participation du personnel et le travail collectif pour l'amélioration permanente dans le temps (Kaizen, Imai) ainsi qu'une recherche de

⁴ définition de L'APICS (American Production and Inventory Control Society).

productivité de long terme plutôt que de court terme. Le JAT correspond donc à la recherche systématique des facteurs de dysfonctionnement, notamment le « zéro défaut » ou le « zéro panne ».

Ce principe se décline en différents outils, recouvrant les problématiques liées à l'ensemble des « gaspillages » : analyse des pannes, recherche de la qualité, amélioration de la planification, etc. Par exemple, le diagramme d'Ishikawa est un outil de prévention des défauts, qui permet de lister les causes possibles des pannes. Le Kanban est un dispositif de fiches mobiles qui permettent d'optimiser la logistique pour mieux l'adapter à la demande. Les Poka-Yoke sont des détrompeurs astucieux, capables d'éviter les erreurs simplement. De même le management de la qualité totale crée de nouveaux outils, et des méthodes de travail collectives spécifiquement dédiées à l'amélioration de la qualité. Des indicateurs et outils de mesure furent amenés dans l'atelier : diagrammes de Pareto, contrôle statistique des procédés, etc. (Ahire et al., 1995). Avec le JAT et le management de la qualité totale, la prescription s'enrichit à la fois de nouveaux critères de performances dont les ingénieur.e.s doivent concevoir la possibilité, et d'outils et de principes qui incitent chaque employé.e améliorer la règle. L'instrumentation développée dans ce cadre est de ce point de vue significative : on donne à l'usine la capacité de déceler et de mesurer les écarts à la règle, et l'opportunité de les corriger de façon « officielle » et continue. Le toyotisme s'est propagé aux Etats-Unis et dans les autres pays occidentaux après la parution de l'ouvrage *The Machine that changed the World* (Womack et al., 1990) par trois chercheurs du MIT. Ils comparent les situations européennes, américaine et japonaise en recensant les écarts de productivité avec le Japon : nombre d'heures de main d'œuvre nécessaire par véhicule produit, nombre de défauts pour 100 véhicules, stocks, mais aussi d'autres indicateurs caractéristiques du toyotisme : pourcentage des effectifs travaillant en équipes, nombre de suggestions par employé.e, formation, absentéisme, etc. Le lean manufacturing s'est alors déployé, avec des principes issus du toyotisme : par exemple, une attention portée aux flux (sans pertes), à l'engagement des opérateur.rice.s au travers de l'amélioration continue, et une très forte standardisation des tâches (Barney & Kirby, 2022). Dans ces logiques très réglées, le régime de révision du système de règles est encore l'objet d'un rapport de prescription réciproque dans lequel les opérateur.rice.s améliorent la prescription par des procédures standardisées qui explicitent les potentielles pratiques informelles.

Ces pratiques d'amélioration pour et par la production peuvent prendre des formes plus ou moins collectives. Les cercles de qualité regroupent des groupes de travail visant à lancer des projets pour améliorer la qualité (Groux et al., 1985). Ces groupes connurent leur heure de gloire dans les années 1980, mais furent peu à peu abandonnés. Parmi les raisons de la défection, des causes organisationnelles furent mises en avant, avec la difficulté de réunir le collectif et d'extraire les opérateur.rice.s de l'atelier, de le fédérer et de le maintenir sur la durée. L'autre argument mis en avant fut la concurrence et l'incohérence des projets par rapport aux prérogatives d'autres services et fonctions notamment la prescription du bureau d'études, ou le travail du service qualité. Par exemple, les cercles de qualité aboutissaient fréquemment à la volonté de mettre en place l'auto-contrôle, ce qui contrevenait aux règles de contrôle de la qualité d'une part, et rendait obsolète le rôle du contrôleur de qualité. Dans la plupart des cas, le projet était donc abandonné ou mis en œuvre dans un périmètre très restreint (Chevalier, 1989). Les expériences des cercles de qualité ont ainsi démontré la difficulté à concevoir collectivement des règles, qui soient compatibles avec le reste du système, et à faire évoluer la prescription avec (Brossard, 2005). Au contraire, lorsque les cercles de qualité s'attachaient à former des règles indépendantes du système de règles, c'est-à-dire que les nouvelles règles n'avaient pas d'impact sur les règles en place, qu'elles pouvaient s'appliquer sans l'accord de la hiérarchie parce

qu'elles n'impactaient pas directement la production, alors il était possible de générer une prescription (Brossard, 2005).

Pendant que le Japon inventait et propageait son système Toyota, d'autres courants traversèrent le milieu productif, notamment en Europe. Parmi eux, l'analyse sociotechnique des organisations (STS) s'est construite en réaction au toyotisme et a introduit des organisations du travail différentes pour réintroduire dans l'usine « un peu de l'esprit de l'artisan d'antan » (Detchessahar & Honoré, 2002). Exemple emblématique de ce courant, l'usine d'assemblage final de Volvo de Uddevalla (Suède) a expérimenté dans le milieu des années 1980 un système de production géré par des équipes autonomes, notamment pour remédier à la pénurie de main-d'œuvre de l'industrie suédoise de l'époque (Sandberg, 1995). Les opérateur.rice.s, nommaient leurs responsables, concevaient la planification des activités, et devaient être suffisamment polyvalent pour gérer la production du choix et de la réception des pièces aux tests finaux et retouches éventuelles (Ellegård et al., 1992). Dans cet exemple, une grande partie de la prescription est ad hoc, contingente à l'équipe qui s'en saisit, et non permanente. Ce mode de plasticité du système de règles repose sur la détermination de domaines d'indépendance où les règles sont considérées comme localement modulables.

2.1.3. Conclusion du paragraphe

À travers la présentation de ces exemples, nous voyons poindre une forme d'activité propre à l'usine de conception ou de reconception de son système de règles par amélioration et complémentation de sa prescription. Celle-ci prend notamment place lors de l'implication des opérateur.rice.s dans l'amélioration de la prescription, favorisée par la reconnaissance du bricolage et de l'improvisation, les démarches participatives ou les équipes autonomes. Cette activité revient alors à résoudre des problèmes simples, c'est-à-dire à détecter les dysfonctionnements, trouver leurs causes, choisir les solutions techniques et l'organisation adaptée par exemple. Sur le long terme, des résultats particulièrement positifs peuvent être obtenus, comme en témoigne la réussite du modèle Toyota.

Néanmoins, cette activité n'existe que dans le cadre du système de règles en place, de son adaptation à l'usine et de son optimisation. Les méthodes et outils basés sur la participation permettent de déplacer la limite entre le formel et l'informel, et de « publier l'implicite » (Borzèix & Linhart, 1988) : cela améliore la prescription, ou éventuellement ajoute des règles lorsqu'elles sont indépendantes au système en place. Cependant, aller au-delà des règles conduit à la faillite de l'outil censé aider à concevoir : si des idées trop éloignées du système sont proposées, elles sont jugées utopistes et abandonnées en même temps que la boîte qui devait les porter (Carrier, 1998; Fairbank & Williams, 2001). Si les cercles de qualité contrecarrent les plans de l'ingénierie, ou des autres fonctions - qualité, fournisseurs, service clients, etc. – les projets portés sont abandonnés et le cercle de qualité est peu à peu délaissé (Chevalier, 1989). Par ailleurs, nous ne connaissons toujours pas les rouages de la conception collective d'une règle ni les ressorts de l'adéquation avec le système en place.

Or, les doctrines de gestion d'usine présentées dans ce rappel historique sont apparues dans un certain contexte, c.-à-d. à mesure que la concurrence se faisait plus dure et que les produits augmentaient en variété et en qualité, que le commerce mondial prenait des proportions gigantesques, que les technologies changeaient, etc. Toutefois, les produits et leur industrialisation gardaient une certaine stabilité dans le temps et ces outils étaient adaptés à ce paradigme. Dans le paragraphe suivant,

nous montrerons comment l'exemple de l'industrie 4.0 remet en cause ce paradigme et conduit à ré-interroger le rapport de l'usine à la règle et à sa reconception.

2.2. L'industrie 4.0 ré-ouvre la question de la révision des règles

Dans ce paragraphe, nous allons montrer comment la littérature sur l'industrie 4.0 semble hésiter entre deux modèles : celui d'un BE fort qui pré-conçoit tout le système de règles, et celui d'une usine capable de le reconcevoir constamment.

2.2.1. L'industrie 4.0 et les Systèmes Cyber-Physiques (Cyber Physical Systems ou CPS)

Ce paragraphe rappelle l'histoire et les logiques de rationalisation à l'œuvre dans l'industrie 4.0. Ce concept présenté à la foire d'Hanovre en 2011 par des représentants du gouvernement fédéral allemand (ministère de la Formation et de la Recherche), des industriels et des chercheurs allemands. Ce concept répond à une stratégie nationale émanant conjointement des politiques, des chercheurs et des industriels pour maintenir le leadership de l'industrie allemande qui faisait face dans le début des années 2000 à plusieurs menaces : la baisse de la demande en machine-outil allemandes, la montée concurrence chinoise et sud-coréenne, un modèle industriel fondé sur l'optimisation de la fabrication de haute qualité de produits techniques vulnérable à l'innovation de rupture, et la crainte du contrôle par les GAFA des données de production et des clients finaux (Kohler & Weisz, 2018). La mise en récit de cette stratégie l'ancre dans l'histoire industrielle, en la présentant à la foire de Hanovre comme une 4ème révolution industrielle, succédant ainsi aux premières machines-outils (1ère révolution), à l'apparition de la méthode scientifique et du paradigme taylorien (2ème révolution), à la vague d'automatisation des années 1980 (3ème révolution).

Un des enjeux majeurs de l'industrie 4.0 réside dans la personnalisation de masse (mass customization). Alors que les systèmes productifs « traditionnels » ont progressivement augmenté la qualité de leurs produits et leurs variétés, l'industrie 4.0 contient la promesse de réaliser des séries de taille 1 à coûts de production maîtrisés.

Ainsi, cette transformation industrielle s'appuie sur les systèmes cyber-physiques (ou CPS – Cyber Physical Systems) : ils mettent en relation les machines physiques, humains, et données afin d'assurer le fonctionnement du système de production de façon autonome et adaptative. Pour cela, des technologies propres à l'automatisation et à la simulation sont mises en œuvre au sein de la production : capteurs, algorithmes, puissances computationnelles et de stockage des données, réalité virtuelle, robotisation etc. En outre, les CPS ne sont plus seulement limités à une usine ou une entreprise mais peuvent s'imbriquer avec ceux des fournisseurs et des clients.

Dans les autres pays, les industries prennent le même tournant technologique, avec des noms variés : « smart factory » aux États-Unis depuis le début des années 2000, « usine du futur » en France, « digital factory », etc. (Büchi et al., 2020).

Ce détour contextuel permet de comprendre que l'industrie 4.0 remet à jour l'utopie cybernétique (Kohler & Weisz, 2018), où la production relève d'une logique de prises de décisions rapides, décentralisées et autonomes. Le système est hyper-adaptif en termes de cadences, de produits fabriqués et de procédés. Un tel paradigme de production semble donc a priori difficilement compatible avec une activité de conception générative et permettant de réviser les règles. Au contraire, l'intervention humaine créative pourrait perturber la production.

2.2.2. Le rapport ambigu à la règle dans les CPS

Pourtant, la littérature décrivant la place de l'humain dans l'industrie 4.0 est ambiguë sur le sujet, et fait ressortir l'indétermination existant sur la re-conception des règles : qui les conçoit ? Peut-on reconcevoir des règles d'un système existant qui semble aussi « fini » et complexe ? Pour notre étude, nous faisons un détour par l'approche des systèmes socio-cyber-physiques, qui pose la question de la place de l'humain dans de tels systèmes. Selon cette littérature, l'humain reste la pierre angulaire des systèmes de production. L'enjeu est alors de faciliter la coopération humain-machine, mais aussi d'augmenter l'humain dans son travail, de lui donner les moyens de concevoir son environnement.

(Romero, Stahre, et al., 2016) offre un exemple de typologie d'« opérateur.rice.s 4.0 ». L'article donne à voir les interactions humain-machines qui peuvent exister en production, en fonction des technologies utilisées. Par exemple, Super-Strength Operator est un.e opérateur.rice dont l'effort physique est allégé par des exosquelettes. Augmented Operator utilise la réalité augmentée pour détecter plus facilement les erreurs, effectuer des diagnostics et réduire l'effort cognitif associé aux tâches. Virtual Operator s'aide des technologies de réalité virtuelle pour sa formation ainsi que pour simuler des scénarios et prendre les meilleures décisions. L'utilisation des technologies permettrait ainsi d'atteindre une symbiose humain-machine (Gerber et al., 2020; Romero, Stahre, et al., 2016).

Dans cette perspective technologique, l'activité de conception des règles en usine semble compromise : il paraît en effet difficile d'élaborer de nouvelles règles ou d'en infléchir le sens alors que l'interaction humain-machine est déjà conçue. Pourtant, les mouvements de participatory design, human-centered design et design du travail (Cahier & Pellerin, 2019; Kaasinen et al., 2020) promeuvent l'intégration des opérateur.rice.s dans la conception du système de production, des interfaces machines et plus largement du travail en tant que futur.e.s utilisateur.rice.s du système de production. L'ergonomie joue alors un rôle important dans la conception du système de production pour le rendre plus facile d'utilisation, allégeant ou aménageant la charge physique et cognitive inhérente au travail 4.0, afin de l'adapter aux compétences et capacités de chaque opérateur.rice et de permettre la flexibilité des actions (Kaasinen et al., 2020; Nelles et al., 2016).

Au-delà de la participation à la conception du travail, les systèmes 4.0 ne présentent pas seulement un aspect human-in-the-loop, où l'action et la décision humaines font partie intégrante du fonctionnement de la production en mode nominal. Dans les systèmes human-on-the-loop, l'humain

peut superviser un système totalement automatisé et apporter l'expertise et les compétences sans lequel le système ne peut fonctionner, par exemple, lors de pannes (Kong et al., 2019; Nahavandi, 2017). (Griffin et al., 2007) souligne une part d'incertitude dans les systèmes complexes qui nécessite une adaptation permanente des compétences. Les tâches ne peuvent pas toutes être formalisées dans la prescription, l'activité nécessite donc de pouvoir aller au-delà de ce qui est déjà décrit dans les règles. (Mattsson et al., 2020) reconnaît un « mode disruptif » existant de façon importante pour l'industrie 4.0, qui est décrit comme toutes les tâches que l'opérateur.rice ne sait a priori pas faire, comme faire face à des perturbations importantes, résoudre des problèmes complexes ou planifier la stratégie. (Nara, 2013) souligne l'importance de disposer d'opérateur.rice.s ayant la capacité de diagnostiquer et résoudre les « cygnes noirs », événements imprévisibles qui ont pourtant un impact négatif fort sur le système ; ils n'ont pas été prévus dans les scénarios d'automatisation et doivent être découverts, compris et résolus par les opérateur.rice.s.

L'industrie 4.0 accroît la complexité et le manque de transparence du système et rend ce rôle essentiel. (Pfeiffer, 2018) rappelle, dans la lignée de (Böhle & Milkau, 1988) pour la vague d'automatisation des années 1980, que l'automatisation et la digitalisation massives ne suppriment pas mais renforcent le « non routine work » c.-à-d. le travail qui ne répond pas à des règles et des procédures pré-établies. Ainsi, les compétences des opérateur.rice.s 4.0 sont non seulement de l'ordre technique, avec une importance de la connaissance des technologies utilisées, de l'algorithmie, d'automatisation, etc. Mais il faut également du sens social, de la collaboration et du travail d'équipe, savoir résoudre des problèmes complexes, ou encore faire preuve de créativité pour gérer les systèmes 4.0. (Pfeiffer, 2018) parle ainsi de « travail subjectif » : il peut s'agir par exemple d'une forme de perception globale des problèmes, d'une approche exploratrice, de l'intuition et de l'instinct pour faire face aux aléas de la production et découvrir le « yet-unknown », c'est-à-dire la part d'inconnu à arpenter dans le système pour lever les problèmes advenant.

Dans cette perspective, le rapport à la règle comporte paradoxalement plus de degrés de liberté, puisque les opérateur.rice.s sont constamment en train de gérer le mode dégradé, et de tenter de rentrer dans le nominal par un ensemble de raisonnements, de recherches, ou de tests, qui ne sont pas prescrits. C'est finalement cette activité de conception -qui n'est pas identifiée comme telle dans la littérature- qui permet au système de fonctionner. En même temps, l'on comprend que la complexité des systèmes automatisés nécessite une connaissance très fine des règles, des raisonnements pointus, et une habileté à gérer l'inconnu, ce que (Pfeiffer, 2018) nomme « expérience ». On est donc bien dans une forme de réciprocité de la prescription, où l'usine doit concevoir à son tour pour rendre la prescription opératoire.

Toutefois, si la littérature sur l'activité des opérateur.rice.s en industrie 4.0 reconnaît une prescription réciproque, la nature de l'activité de conception reste énigmatique, voire nébuleuse, comme en témoignent les termes utilisés : « créativité », « intuition », « subjectivité » sont autant de termes utilisés dans les articles précédemment cités pour parler de cette capacité des opérateur.rice.s 4.0. De plus, la littérature ne permet pas de penser une autre nouveauté que celle du retour au nominal, ni d'expliquer comment faire évoluer le système tout en préservant l'existant.

2.2.3. D'autres exemples de mouvements qui ré-ouvrent la question de la re-conception des règles

Au-delà de la gestion de production, des mouvements actuels sociétaux, traversant les secteurs sont aussi un appel à enrichir le travail, et à impliquer le personnel dans l'élaboration de leur travail mais aussi dans la transformation de leur organisation. Ces mouvements peuvent s'appliquer à l'industrie mais ne s'y limitent pas nécessairement. Par exemple, les organisations « libérées », « responsabilisantes » ou encore « basées sur la confiance », popularisées par (Getz & Carney, 2012) reposent sur la liberté des employé.e.s de prendre des décisions ou encore de mener des projets collectivement choisis en créant un environnement propice à la confiance et à la responsabilisation (Gilbert et al., 2017). Ce mouvement a d'abord vu le jour pour l'organisation de la production dans les usines de Favi, sous-traitant automobile spécialisé dans la production de fourchettes de boîtes de vitesses et de rotors en cuivre. Dans les années 1980, cette entreprise a reçu une commande de boîte de vitesses pour Peugeot. Le nouveau directeur de l'usine décida alors de créer une mini-usine à côté de la ligne de production, organisée de façon autonome, avec la suppression de plusieurs niveaux hiérarchiques et de leurs attributs, octroyant une certaine liberté d'action pour les opérateurs dans le but de mieux répondre aux attentes du client. (T. Weil & Dubey, 2020) fait cependant état de difficultés pour « libérer » l'entreprise dans les faits notamment la difficulté pour les dirigeants et managers à changer de mode de management et de contrôle.

On peut interpréter ce type de management comme le besoin de ré-ouvrir le système de règles pour le reconcevoir et favoriser la transformation du système. Pour autant, on peut se demander si ces entreprises n'auraient pas pris plutôt la stratégie de « relâcher » les règles sur un certain nombre de domaines indépendants de la complexité de la production (l'organisation, la gestion du temps de travail, la nomination de responsables, etc), en confinant le changement qu'à ces champs peu risqués du point de vue de la robustesse de la production. Cependant, on peut noter que des cadres comme ceux-ci semblent favorables à l'implantation d'une activité de reconception du système de règles, au-delà des champs pré-définis.

D'autres mouvements, plus anecdotiques, témoignent du désir de concevoir à l'échelle d'un petit collectif ou individuellement. Nous en citerons ici quelques-uns, sans visée d'exhaustivité. Laurence Décréau enquête sur les anciens cols blancs qui deviennent artisans dans L'Élégance de la clé de douze. Ils outrepassent le clivage « intellectuel vs manuel » (Décréau, 2018) et recherchent l'autonomie dans le travail et la gestion du temps, la réalisation de choses « concrètes », l'intelligence et une forme de sagesse au service de l'objet. Le mouvement des fab lab et des makerspaces (Rumpala, 2014) « grand public et pro amateurs », peut être compris comme le rêve de mettre à la portée de tous les moyens de concevoir et de produire en petite série, combinant réflexion, expérimentation, et réalisation (Rumpala, 2014) ; Certains parlent de « neo-industrie » pour désigner ces ateliers qui permettent d'avoir des performances proches de celles de l'industrie mais en permettant une grande flexibilité et personnalisation, et en gardant ainsi un positionnement proche de l'artisanat (Boenisch, 2014; Rumpala, 2014). Un dernier exemple de ce réinvestissement dans la conception est le courant low code/no code en industrie qui permet de s'emparer du code et de recoder rapidement des programmes sans être spécialiste de programmation (Sanchis et al., 2019). Nous voyons peut-être là un regain d'intérêt pour les doctrines de gestion proches de celles de l'atelier pré-taylorien, où la conception de règles était

le travail quotidien des opérateur.rice.s – concepteur.rice.s. Nos interrogations pourraient conduire à ramener cet esprit dans des systèmes de production beaucoup plus standardisés.

2.2.4. Conclusion du paragraphe

A l'issue de cette partie, on comprend donc que l'usine est un système de règles donné, un ensemble de prescription à exécuter. Les mouvements participatifs ou promouvant l'autonomie en vue de l'amélioration des performances permettent d'optimiser les règles en place, de les adapter ou de mieux les appliquer. Cette forme d'évolution pas à pas des règles par prescription réciproque a permis à l'industrie de se transformer et de devenir de plus en plus performante tout au long du XXe siècle.

Aujourd'hui, les transformations appelées par les enjeux contemporains, le besoin de créativité dans les systèmes 4.0, ou encore l'existence de mouvements où l'employé.e devient aussi concepteur.rice, laissent poindre le besoin de donner à l'usine la capacité de reconcevoir ses règles.

Cependant, la littérature achoppe sur la question d'une reconception plus significative de la prescription : elle ne donne de détail ni sur sa nature, ses procédés, ses moyens de coordination, ni sur la possibilité d'apporter de la nouveauté dans un système déjà en place.

La conception de règles reste cependant, à ce stade de l'enquête, énigmatique. Quels sont les potentiels d'une telle activité ? Qu'est-ce que concevoir et re-concevoir un système de règles ? Peut-on concevoir sans détruire le système pré-existant à l'activité conceptrice ? Il manque pour l'instant à l'analyse des armes théoriques pour penser un tel phénomène.

Nous souhaitons alors comprendre le processus conduisant à l'adoption de la nouvelle règle et observer la réforme du système de règles en action.

Pour cela, nous étudierons dans la partie suivante les théories sur l'innovation et la conception de règles.

2.3. L'émergence de la nouveauté dans un système à préserver : les théories et méthodes de la conception pour la production

Nous entrons dans le deuxième temps de la revue de littérature. Nous souhaitons désormais comprendre ce qu'est l'activité de conception de règles en elle-même. Pour cela, nous cherchons à nous doter des armes théoriques qui pourraient nous aider à la fois à comprendre le problème de la

conception de règles en usine, tout en nous offrant des recours théoriques pour sa représentation. Comment concevoir dans un espace aussi contraint que le système de règle de l'usine ? En particulier, comment penser l'affleurement du nouveau dans l'ancien ? Comment innover et préserver à la fois ? Nous montrerons d'abord comment la littérature a envisagé l'avènement d'innovations dans un système contraint. Nous verrons ensuite que les patrimoines de création semblent particulièrement adaptés à notre étude.

2.3.1. L'innovation incrémentale comme compromis à l'innovation destructrice

L'apport d'une nouvelle règle par rapport aux règles existantes est complexe, entraîne éventuellement des contradictions, et peut s'avérer à risque pour le système de production. Ainsi, l'innovation de rupture, par la nouveauté qu'elle apporte, apparaît presque impossible à insérer dans une usine déjà contrainte par ses normes, son organisation, ses performances. Comment la littérature en innovation appréhende-t-elle ce phénomène ?

Schumpeter, économiste autrichien, dans son livre *Capitalisme, socialisme et démocratie* (1942) mobilise le concept de destruction créatrice pour appuyer sur l'inexorable couple entre l'arrivée d'une innovation et sa propagation, et la destruction du système en place. Selon lui l'entrepreneur, figure centrale du capitalisme, apporte des ruptures – innovation de produits, de procédés, nouveaux marchés, nouvelles matières premières ou nouvelles organisation du travail -, et modifie les règles à son avantage pour rendre obsolète celles qui apparaissaient pourtant jusque-là fondamentales. Ce concept a eu une longue destinée en économie. En 2021, *The power of creative destruction* (Aghion et al., 2021), réaffirme ce principe au plan macroéconomique : La destruction créatrice est ce moteur du capitalisme qui assure le renouvellement permanent et la reproduction, mais qui en même temps génère du risque et des bouleversements qu'il faut savoir réguler et orienter. Ce principe est-il approprié à notre problème d'innovation en usine ? Bien qu'il soit employé pour parler de macro-économie, ce principe peut aussi être compris dans un sens local. La métaphore semble à première vue adaptée à l'innovation en usine : réaliser de grands progrès en production signifierait faire une innovation de rupture (ou radicale), au risque de détruire ou de rendre obsolète l'ancien système. Nous retrouvons ainsi notre paradoxe de l'innovation en usine : si nous souhaitons conserver l'existant, il n'est pas souhaitable ni possible d'innover.

Nous avons vu en première partie de la revue de littérature que face à ce dilemme, les seules façons de s'en sortir consistent à rester dans la règle (et ne pas innover) ou faire une règle indépendante du système en place (donc en ne causant pas de perturbations au système en place). En effet, si l'innovation radicale dans une usine en fonctionnement est à exclure de notre cadre, une innovation « mineure » est toutefois acceptable. L'innovation incrémentale apparaît ainsi comme un compromis efficace et une issue possible à notre problème : en apportant des « petites touches de nouveauté », elle ne sera pas trop destructrice, et permettra tout de même de rester sur la voie du progrès (Dewar & Dutton, 1986). L'amélioration continue est donc très progressive, et préserve le système existant d'une disruption qui pourrait lui être fatale. Il s'agit alors d'une « innovation non-destructrice » (Kim & Mauborgne, 2019), c'est-à-dire préservatrice, à condition de rester dans le champ des règles données. Ce cadre théorique est cohérent avec l'ambition optimisatrice des principes et

outils de conception décrits en première partie de la revue de littérature : il s'agit d'adapter ou d'améliorer la règle, et non d'en créer une nouvelle.

Toutefois, trois problèmes ressortent : premièrement, dans l'amélioration continue, l'activité de conception n'est pas décrite en tant que telle, mais par son résultat. Nous ne savons pas ce quel raisonnement et quelles actions sont mis en œuvre pour les atteindre. Nous ne connaissons pas non plus son impact sur la régénération du système de règle. Cela appelle à une modélisation fine de l'activité de reconception d'une règle et de son impact sur le système de règles. Deuxièmement, la partie précédente de la revue de littérature a montré que la distinction entre réglé et innovant, qui est souvent mobilisée en théorie de la conception (ex.: Le Masson & Weil, 2010), ne tient plus lorsqu'il s'agit d'un système de règles, puisque les acteurs ne cessent de « jouer » autour de la règle (J.-D. Reynaud, 1995), et de la reconcevoir (Hatchuel, 1996). Pour penser la conception de la régénération de la règle, on a donc besoin de mobiliser d'autres notions que celles qui s'appliquent à l'innovation. Notre cadre d'analyse devrait être en mesure de concilier la règle présente et la nouveauté (issue par exemple du « jeu » autour de la règle), de modéliser le moment où la règle évolue : est-elle « neuve » ? rend-elle celle qu'elle remplace caduque ? S'agit-il de propriétés nouvelles que l'on ajoute à son énoncé, de manière agrégative ? Ou bien de combinaison de règles ? La règle prise comme objet de conception semble avoir des particularités et des modes subtils de passage de l'actuel au nouveau que la littérature sur la conception innovante peine à éclairer. Troisième problème, la première partie de la revue de littérature nous a montré qu'il était difficile de théoriser ou de trouver des exemples empiriques de transformation significative du système de règles par l'usine. La littérature en innovation précédemment présentée semble indiquer l'impossibilité d'un « saut » transformatif, à moins de « détruire » le système. Il nous faudrait au contraire une façon de concevoir à la fois de la grande nouveauté, mais dans l'existant ; il nous manque des modèles pour penser une innovation dans la tradition.

2.3.2. Les patrimoines de création et leur tentative de modélisation

Des travaux de recherche récents ont cherché à reconsidérer ce compromis entre innovation radicale mais destructrice et innovation incrémentale mais porteuse d'une moindre évolution. (Carvajal perez et al., 2018) explore ce problème en réinterrogeant l'innovation dans le domaine de la gastronomie. En étudiant la haute cuisine, ils montrent que l'évolution des recettes ne correspond ni à de la création destructrice – puisque les mêmes plats existent depuis plusieurs siècles, ni une amélioration incrémentale – de cuisinier.e.s en cuisinier.e.s la recette a significativement changé. Ce régime d'innovation conservatrice est appelé par les auteurs « patrimoine de création » : le caractère radicalement nouveau d'un plat peut en effet prendre racine dans une tradition et des règles de cuisine datant de plusieurs siècles. Dans des travaux très récent, (Hooge et al, 2022) mobilisent les patrimoines de création dans l'industrie pour désigner précisément la tension entre la conservation des traditions de la fabrication de la haute horlogerie et les transformations dans l'usine. (Hatchuel et al., 2019) propose de modéliser le phénomène par des topos. Les travaux mathématiques sur les topos d'Alexandre Grothendieck en 1957 proposent un langage sur les relations et la structure des relations entre les objets, indépendamment de la nature des objets eux-mêmes (qui peuvent être eux-mêmes

complexes, en partie inconnus ou contradictoires etc) (Lawvere, 1964). Il s'agit d'étudier la structure des relations et les conditions de sa préservation. Les topos vont au-delà d'une opposition simple « nouveau » vs « ancien » ; ils outillent ainsi une analyse plus fine de la nouveauté et de son rapport à la tradition, des évolutions acceptables « localement » ou acceptées généralement par rapport à l'existant (Leveque, 2022). Toutefois, bien qu'un début de modélisation du patrimoine de création existe, il ne permet pas de mettre en évidence finement le processus de conception d'une règle et son intégration au patrimoine. Sur ce dernier point, la théorie C-K met en évidence non seulement le résultat – l'innovation – mais surtout le processus cognitif qui permet d'y aboutir (Hatchuel & Weil, 2003) à l'aide d'opérateurs entre l'espace des concepts et celui des connaissances. Elle a d'abord été pensée pour modéliser la conception de nouveaux produits ou technologies; cependant, cette théorie a une portée générique et l'article (Hatchuel et al., 2019) décrit les prémisses d'une modélisation usant d'un couplage CK-topos pour les patrimoines de création.

2.4. Conclusion de la revue de littérature

En termes organisationnels, comme nous l'avons vu en première partie, loin des ressources classiques dans les lieux d'innovation, l'usine est un lieu où le temps, les compétences, les machines sont dédiées en très grande priorité à la production. La question de l'arsenal organisationnel et méthodologique dédié à la révision des règles en usine reste donc entière. Comment les acteurs se coordonnent-ils ? Comment explorent-ils le système de règles ?

Nous disposons maintenant d'éléments qui pourraient nous aider à résoudre notre problématique et à penser l'activité de l'usine conceptrice. Néanmoins, ceux-ci demeurent encore frustrés. Il n'y a à ce jour pas de modèle formel de la conception de règles dans un patrimoine de création. La modélisation CK-topos semble avoir des propriétés intéressantes pour notre problème mais elle reste pour l'instant très parcellaire, et utilisée pour d'autres domaines que le système de règles de l'usine. En effet, nous aimerions avoir un support pour expliciter et soutenir l'action de reconception des règles en usine. Nous souhaiterions ainsi disposer d'un modèle qui rende compte des logiques de création préservatrice et de ses mécanismes, mais qui permette également d'expliquer la cohabitation potentielle entre différents régimes de conception en usine. La partie suivante pose les questions de recherche correspondant à ce cahier des charges.

3. Questions de recherche

La revue de littérature a souligné les difficultés à comprendre et rendre actionnable le renouvellement d'un système de règles en usine. Cela nous amène à poser la question de recherche suivante, qui guidera notre raisonnement.

QR principale : Comment renouveler un système de règles en usine ?

Par « renouvellement », nous pouvons entendre un processus d'évolution du système de règles, en même temps qu'une révision du système existant. Nous ne savons pas précisément quels ressorts soutiennent la révision du système de règle : ni ses mécanismes, ni ses conditions d'opérationnalisation. Suit-il une logique agrégative, ou d'accumulation progressive de nouvelles propriétés dans les règles, ou encore de remplacement ? Comment se fait l'adaptation au système existant ? Comment valider une nouvelle règle ? Répondre à ces questions pourrait permettre de repenser l'industrialisation au prisme des systèmes de règles que l'on veut mettre en place ou reconcevoir. Cela donnerait de nouveaux outils pour organiser la transformation des filières industrielles autrement que par les simples investissements technologiques. Dans le même temps, la tâche est immense et malaisée : le système de règles est peu accessible, son évolution n'est pas directement visible. Il va falloir, pour étudier cette question, se munir et concevoir les outils qui rendront repérables ces phénomènes subtils et encore inconnus. Cela nécessiterait un programme de recherche entier et pourrait offrir des angles d'étude multiples et pluridisciplinaires : c'est à la fois un problème de gestion, mais aussi d'ingénierie, de sociologie du travail et des organisations, d'ergonomie, de psychologie, et certainement aussi de géographie, d'administration publique, etc.

C'est pourquoi, pour notre thèse, nous avons choisi de circonscrire notre périmètre de recherche à deux directions qui nous ont paru à la fois pertinentes pour notre problème et génératrices pour les Sciences de Gestion.

QR1 : Comment modéliser la reconception d'un système de règles en usine ?

Nous l'avons vu en revue de littérature, par sa nature invisible, l'activité de la conception de règles est méconnue, tant dans son raisonnement que dans la possibilité de la renforcer. Nous avons donc besoin d'un outil pour rendre visibles le système de règle et son activité de reconception, afin d'en éclairer ses rouages. Nous nous placerons au moment de l'enrichissement du système de règles par une nouvelle règle, et tenterons de formaliser l'acte conceptif et son effet sur les règles. L'enjeu est double : d'abord, la modélisation est un instrument pendant et après la thèse. Le processus de mise en modèle correspond à la mise au point d'un outil pour notre recherche-intervention, qui servira de base de discussion afin d'éclairer les facettes de notre problème que nous ne voyons pas en restant seulement dans la simple observation du système. Après la thèse, ce modèle pourra servir d'instrument d'explicitation des systèmes de règles industriels et de leur régénération. Sa portée actionnable devra aussi permettre de soutenir l'action et la reconception en train de se faire du système de règles. Le deuxième enjeu est la compréhension théorique du phénomène étudié. La modélisation pourra

notamment nous aider à répondre à ces questions : suffit-il d'adopter une nouvelle règle et de l'adapter au système ? doit-on abandonner les règles qui s'opposent à la nouvelle règle au risque de déstabiliser le système, ou bien abandonner les facettes de la nouvelle règle qui s'opposent au système au risque d'en altérer la portée réformatrice ? Comment régénérer au-delà l'optimisation ?

Après la revue de littérature, nous nous attendons à mobiliser pour cette modélisation les patrimoines de création et le formalisme CK-topos. Il nous reste encore à comprendre les spécificités du patrimoine de règles, ainsi qu'à représenter le plus finement possible les raisonnements et actions à l'œuvre dans la conception de règle.

QR2 : Quelles méthodes, organisations, et ressources sont nécessaires pour cela ?

Notre revue de littérature a déjà parcouru un certain nombre d'outils de révision du système de règles en usine. Cependant, le résultat obtenu se limite souvent à l'amélioration de la prescription. Nous questionnons ici les conditions d'opérationnalisation, de contingence, mais aussi d'amplitude de ce renouvellement. Disposons-nous de prises sur l'intensité de cette révision ? Quels sont les moyens activables pour gérer le renouvellement du système de règles, et avec quels effets ? Cette deuxième question est donc relative à la gestion du patrimoine de création et en particulier à la gestion de son antagonisme intrinsèque apparent entre tradition et innovation.

L'enjeu est de fournir les bases de l'action pour la révision du système de règles. Ainsi, il ne s'agit pas seulement de révéler un phénomène mais aussi de l'outiller afin de le rendre répétable et actionnable par une personne praticienne.

Pour répondre à cette question, notre modèle sera certainement vecteur d'hypothèses de gestion sur la reconception du patrimoine de création. Des cas empiriques pourront valider ces hypothèses et compléter la réponse.

4. Parcours et méthodologie de recherche

Comment allons-nous traiter ces questions de recherche ? Quelle posture épistémologique adopter ? Comment nos trois terrains allaient-ils pouvoir nous aider à répondre à nos deux questions ? Dans cette partie, nous traiterons du façonnage du sujet de thèse, du rapport aux terrains, de l'émergence des questions et du choix des stratégies de recherche, ou encore de la structure de l'argumentation que nous avons tenu pour répondre à nos questions de recherche.

Ainsi, nous aborderons l'ancrage et le parcours de la thèse (4.1). Puis nous présenterons la posture épistémologique adoptée (4.2). Les terrains de recherche seront ensuite présentés un à un 4.3 avant de présenter dans la sous-partie suivante les matériaux et méthodes mobilisées pour répondre aux questions de ce chapeau (4.4) Enfin, le synopsis de la thèse sera détaillé (4.5).

4.1. Ancrage et parcours de la thèse

Tout d'abord, nous rappelons ici les prémices de la thèse et son cheminement, avec ses éventuels soubresauts, jusqu'à l'écriture du présent chapeau.

4.1.1. Ancrage de la thèse dans les travaux du laboratoire

Cette thèse s'inscrit dans la lignée d'un certain nombre de travaux au Centre de Gestion Scientifique et plus particulièrement de la chaire Théorie et Méthodes de la Conception innovante (TMCI). Ce présent paragraphe en donne quelques éléments.

Dans les années 2010, l'industrie et l'usine, posant de nouveaux défis en même temps qu'elles semblaient porter des concepts innovants devint peu à peu un objet d'études pour la chaire TMCI, encouragée par ses partenaires industriels. Parmi les travaux qui ont pavé le chemin jusqu'au lancement de la thèse et qui n'ont pas manqué d'en apporter un socle de connaissances et de questions, il est important de souligner qu'un partenariat entre la chaire et Airbus a été lancé dès 2013 sur ces questions. Une équipe de chercheurs de la chaire ainsi que des praticiens airbusiens ayant obtenu le soutien de leur hiérarchie jusqu'à l'état-major de l'usine questionnent l'activité de conception et constatent la possibilité d'une forme de conception innovante, dans un contexte marqué notamment par l'arrivée des technologies 4.0 comme source majeure d'innovation, une incertitude sur la délocalisation possible, et l'avènement dans l'usine de Saint-Nazaire de la démarche d'entreprise libérée et de la transformation des rapports hiérarchiques. En 2015-2016, un stage de l'option Ingénierie de la Conception mené par deux élèves ingénieurs des Mines (accompagnés de cette même équipe de recherche et praticien.ne.s) a conduit à une première analyse des activités de conception et permet de proposer les premiers contours de l'usine conceptrice. Il a notamment été mis en évidence

que l'usine conceptrice rend possible des innovations originales sur les moyens de fabrications, qu'elle est dotée de moyens de prototypage industriel utilisés non seulement pour valider les solutions mais aussi pour les explorer, est capable de prescrire des procédés de fabrication à ses fournisseurs et à d'autres acteurs non -industriels sur la robotisation et automatisation notamment. Les résultats de ce stage et de ce partenariat questionnaient alors les apprentissages à mener, les collectifs associés, ainsi que la possibilité de faire évoluer le système de règles avec l'hypothèse de la nécessité d'une ingénierie de conception spécifique. En 2017-2018, un projet de recherche d'un an a été conduit par un ingénieur de recherche formé à la conception innovante sur l'industrie 4.0 dans l'usine Airbus de Hambourg, et qui a également fourni une revue de littérature étayée de quelques éléments de modélisation afin de comprendre l'histoire et les enjeux de l'industrie 4.0.

4.1.2. Cheminement de la recherche

La thèse a débuté en juin 2018 à l'occasion d'un travail préparatoire de 7 mois sur l'usine conceptrice au laboratoire en tant qu'ingénieure de recherche. Cette période fut d'abord intensive en formation académique, par le suivi des enseignements en théorie de la conception, en systèmes de production et en recherche opérationnelle, qui me permettait de connaître et comprendre les enjeux de production par des cadres d'analyse différents. Ces éléments de connaissance furent complétés par la lecture des travaux, publiés ou non, anciens et récents, du laboratoire sur le sujet, la rencontre éventuelle des protagonistes ayant été impliqués dedans, ainsi qu'une revue de littérature fournie sur l'industrie 4.0.

En parallèle, il fallait nouer des partenariats industriels et brosser des axes d'exploration avec chacun d'eux, afin de préparer des terrains et situations de recherches adaptées à un travail de thèse. Les premières visites et la découverte des problèmes industriels auxquels été confrontés mes éventuels futurs partenaires ont permis de mieux cerner la nature de l'objet de recherche et notamment la tension latente résultant de l'incompatibilité apparente entre les deux termes « usine » et « conception ». Les premiers éléments – très frustrés- de modélisation du concept, datent de la fin de cette période-là et se présentèrent comme un élément de dialogue, de contextualisation et d'avancée pour la période suivante.

Trois terrains de recherche furent retenus, et jusqu'en mars 2020 des allers-retours nombreux d'un ou plusieurs jours, pouvant aller jusqu'à 3 semaines dans les usines partenaires scandèrent la recherche. L'effort de compréhension d'abord sur les problèmes rencontrés localement dans chacune des usines et que la recherche contribuait à comprendre, modéliser, et infléchir. Il s'agissait dans le même temps de saisir les relations et les oppositions potentielles entre les terrains. Un certain rapport au système de règles, la capacité à l'arpenter, à ré-explore le sens des règles pour les réaffirmer ou les modifier a progressivement été mis en évidence.

Pendant et après la période Covid, à partir de mars 2020, les relations avec les industriels furent arrêtées avant certaines explorations nouvelles et expérimentations prévues : les usines partenaires cessèrent alors leurs activités de recherches et se recentraient sur la production. Les échanges ont repris à distance plusieurs mois plus tard par des échanges par visio-conférence avec les praticiens, afin de modifier et/ou d'affiner les travaux entrepris, et éventuellement d'accéder à des données secondaires (supports de présentation, documents de référence etc) pour rendre plus robustes les démonstrations

et les résultats accessibles alors. En parallèle, des présentations à la communauté académique (conférences, mais aussi chaire, et partenaires de la chaire) permirent de valider et d'enrichir les démarches de recherches et les résultats obtenus. Certains de ces travaux ont nécessité de très nombreux allers-retours jusqu'à l'été 2022 entre praticien.ne.s, chercheur.euse.s, et communauté académique, avant d'obtenir un modèle définitif qui pouvait ensuite être affiné et illustré.

Loin d'un désœuvrement chronique, l'arrêt des relations industrielles lors de la période Covid et de ses deux premiers confinements (au printemps et à l'automne 2020) marqua l'esquisse puis l'émergence du modèle général de l'évolution d'un système de règles et de son « test » auprès de la communauté académique sur plusieurs des cas industriels rencontrés auparavant. Le modèle sera validé par les praticiens lors de la réunion des partenaires de la chaire de janvier 2021 et avec la reprise des relations ultérieures lors de réunions bipartites entre la doctorante et les industriels.

4.2. Démarche épistémologique générale

Notre thèse peut apparaître au.à la lecteur.rice d'un format quelque peu particulier : nous avons accès à trois terrains, qui ont permis de récolter du matériel empirique, mais nous nous proposons d'aller au-delà de la somme de ces expériences de recherche, en écrivant ce chapeau. Quelle posture scientifique choisir pour une telle entreprise ? Nous traiterons dans cette partie du choix de la démarche épistémologique, et notamment de la relation entre la doctorante (accompagnée de son duo d'encadrants chercheurs), les terrains, et la connaissance en cours d'émergence.

4.2.1. Une méthodologie générale de recherche-intervention

Plusieurs particularités épistémologiques émaillent l'itinéraire de recherche présenté dans le paragraphe précédent. On les doit notamment au positionnement général adopté de recherche-intervention combinant des phases locales d'observations et une démarche générale de modélisation, d'apprentissage avec les partenaires, et de transformation du modèle et de l'existant. Ce paragraphe détaille les principes de cette approche et leur mise en œuvre pour ce travail doctoral.

À l'inverse d'une position d'extériorité par rapport au terrain, tentant de limiter au maximum les interactions pour ne pas être influencée et donc biaisée, la recherche-intervention se caractérise par un rapport engagé avec le terrain, des interactions nombreuses, et une visée transformative de l'organisation sur le terrain avec les praticien.ne.s (Aggeri, 2016).

Nos recherches se sont déroulées en partenariat avec 3 terrains : l'usine d'Airbus à Saint-Nazaire, le centre de maintenance (dit « technicentre ») SNCF des TER Pays de la Loire, et l'usine de STMicroelectronics à Crolles. Les questions de recherche pour chacun des projets ainsi qu'une première stratégie d'exploration ont été élaborées conjointement avec les chercheurs lors des premières réunions entre chacun des industriels et l'équipe de recherche « doctorante-encadrants ». L'accès au terrain a également été prévu à ce moment-là, bien qu'il fût radicalement bousculé lors de la crise COVID de mars 2020 et les années suivantes. Dans tous les cas, il ne s'agissait ni d'un cahier des charges

précis de la part des industriels, ni d'un parcours de résolution préétabli : chaque projet comportait en lui-même une part d'indétermination et d'inconnu tant dans le résultat que dans la méthode pour y arriver – point notable qui distingue radicalement le principe de la recherche-intervention d'une pratique de consultant.e en Sciences de Gestion (Aggeri, 2016). Par exemple, les questions posées s'énonçaient alors de la façon suivante : Quels modèles et méthodes pour l'usine conceptrice ? (Airbus) ; Quelles sont les formes de conception et comment les amplifier ? (SNCF) ; Comment concevoir des validations de changement robustes ? (STMicroelectronics).

Commençant l'enquête dans chacun des terrains et récoltant du matériau empirique de façon ciblée, la recherche débuta par des phases d'observations participantes. Il s'agissait alors de rencontrer les acteur.rice.s, procéder à de nombreux entretiens, participer à des réunions en tant qu'observatrice, collecter l'historique des présentations de réunions, accéder aux fiches de la boîte à idées etc. Ainsi, la doctorante obtint dans les années 2019 et 2020 une grande densité de données empiriques par ailleurs très hétérogènes dans leur nature (cf. partie 4.4). Cela lui permit d'entrevoir la variété possible du même concept « usine conceptrice » dans des conditions très différentes.

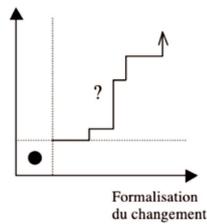
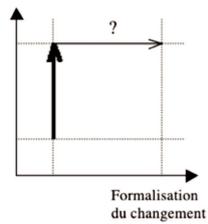
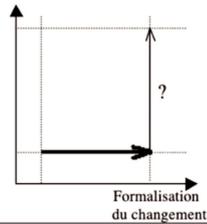
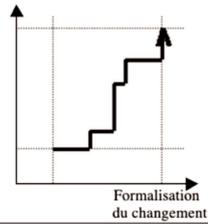
Néanmoins, les contacts successifs et répétés avec les terrains ne se limitèrent pas à une simple posture d'observation. Très vite, nous avons eu besoin de nous munir d'un modèle général. En effet, nos débuts premières observations s'avérèrent rapidement assez frustrés. Les interprétations simples achoppaient, les énigmes du terrain nous rattrapaient : chez Airbus, certes, des groupes de travail se réunissaient pour l'amélioration continue. Certes, certains s'organisaient pour l'exploration - ce qui n'est pas habituel en production-. Mais les résultats entre les projets étaient très variables. Que se passait-il ? Comment avaient-ils fait ? Avaient-ils besoin de s'engager dans de telles entreprises d'exploration pour parvenir à leur solution ? Sur quoi avaient-ils buté ? Que concevaient-ils au juste ? A la SNCF, nous avons bien trouvé une très classique boîte à idées, calibrée pour les idées « simples », compréhensibles, d'application quasi-directe. Nous aurions pu nous arrêter là dans nos recherches sur la conception en usine. Toutefois, que signifiait ce temps de latence entre l'idée postée et sa validation ? Que faisait-on des idées « hors calibre » ? Pourquoi et quand fallait-il parfois en appeler à l'évolution dans le référentiel matériel SNCF ? Chez STMicroelectronics, nous avons des changements, intenses, et maîtrisés. La production était sous contrôle statistique, et la très haute expertise de ses ingénieur.e.s permettait d'analyser les données et de repérer les erreurs. Pourtant, comment pouvaient-ils faire face à un changement nouveau qui pouvait impacter le système de façon encore inconnue ? Quelles données devaient-ils, au juste, analyser ? De quoi était composée leur expertise, pour parvenir à valider les changements à ce rythme-là en maîtrisant les risques ?

Toutes ces interrogations justifiaient l'emploi d'un instrument qui allait nous permettre de renouveler nos interprétations et d'expliquer ces énigmes. Le modèle nous a guidé dans les échanges entre la doctorante et les industriels. Ces échanges ont permis la reconception euristique du modèle, et révélèrent peu à peu les phénomènes jusque-là cachés : la révision du système de règle, la conception de la preuve de robustesse de la règle. Le modèle créait le lien et s'enrichissait des expériences de nos 3 terrains mais exerçait également une forme de contrôle théorique de ce que nous cherchions sur les terrains, et de ce que nous pouvions espérer trouver. Ainsi, ils permettaient l'apprentissage des acteurs (doctorante, encadrants et praticien.ne.s) en continu : ils suscitérent des échanges et révélèrent des objets, des nuances, et des conditions de validité pas observables sinon. Grâce à notre modèle qui ne cessait de se refaire, la doctorante devint progressivement chercheuse-actrice (Lallé, 2004), associant

les praticien.ne.s à la démarche de progression de la connaissance, et recherchant un effet transformatif sur les terrains au regard des problématiques rencontrées.

Pour résumer, la présente recherche n'est pas seulement partie de l'observation des faits, ni ne se limita pas à une « construction mentale » de la réalité. Elle a au contraire été guidée par un projet de transformation défini en partie dans les premières réunions avec les industriels et enrichi au cours des nombreuses interactions avec eux. Ainsi, la thèse relève d'une recherche-intervention, schématisée par (David, 2012) dans le cadran Sud-Est de son tableau et qu'il résume en ces termes : Aider, sur le terrain, à concevoir et à mettre en place des modèles et outils de gestion adéquats, à partir d'un projet de transformation plus ou moins complètement défini. Notre modèle général fut notre principal medium de passage de la recherche empirique à la théorie (et inversement) et de circulation des concepts entre les terrains. Par ailleurs, nos recherches ont donné lieu à la mise en place d'expérimentations pour améliorer les outils et les méthodes. Ces tests étaient directement associées à nos résultats que nous avons obtenus alors : à la SNCF, modification des règles de la boîte à idées, lancement d'ateliers de formation à la défixation pour l'usine, et initiatives de lancement de projets d'exploration avec d'autres acteurs dans lesquels le technicentre avait intérêt à s'impliquer. Chez Airbus, des modalités de co-design ont été expérimentés autour de concepts pour l'industrialisation de l'avion. Chez STMicroelectronics, à la suite de notre modélisation de la stratégie de maîtrise des risques, un nouveau format de réunion et une nouvelle trame de présentation power point devait être testé pour renforcer la visibilité du raisonnement de conception des analyses de risques et valider et/ou raffiner notre propre modélisation. Cet aller-retour entre modélisation et expérimentation est schématisé dans le schéma suivant.

Schéma 4 : Extrait de (David, 2012) – Formalisation et contextualisation du changement dans les quatre démarches de recherche.

		Objectif	
		<i>Construction mentale de la réalité</i>	<i>Construction concrète de la réalité</i>
Démarche	<i>Partir de l'observation des faits ou d'un travail du groupe sur son propre comportement</i>	Observation Contextualisation du changement  Formalisation du changement	Recherche action Contextualisation du changement  Formalisation du changement
	<i>Partir d'une situation idéalisée ou d'un projet concret de transformation</i>	Conception « en chambre » de modèles de gestion Contextualisation du changement  Formalisation du changement	Recherche intervention Contextualisation du changement  Formalisation du changement

Lecture : les flèches en trait épais indiquent ce qui est effectivement fait au cours de la recherche, les flèches en trait fin indiquent ce qui serait une suite logique du processus, mais non abordée au cours de la recherche, d'où les points d'interrogation sur les schémas

4.2.2. Des évaluations périodiques par la communauté académique et les praticiens

Cependant, la démarche de recherche-intervention contient le risque d'une forme de transfert, où le chercheur.euse risque de se fondre dans ses terrains, d'en adopter les codes et les rites et de perdre sa réflexivité nécessaire. Contre cela, (Lallé, 2004) préconise d'abord d'alterner des phases d'intériorisation dans l'organisation avec des phases d'extériorisation, en s'éloignant de l'objet afin d'en développer un point de vue critique. Ainsi, pour ce travail de recherche, les phases dans les terrains se sont avérées courtes et ont alterné avec des périodes au laboratoire (cf Tableau 2). Ensuite, l'autrice préconise d'élargir le champ de l'investigation. Pour cela, des recherches bibliographiques approfondies ont été conduites tout au long de la thèse sur les objets rencontrés, comme en témoigne la revue de littérature du présent manuscrit. Enfin, (Lallé, 2004) souligne l'importance de se soumettre à une double évaluation périodique de la communauté académique d'une part et des praticien.ne.s d'autre part.

Tableau 2 : Les interactions avec les trois partenaires industriels (hors comités de pilotage)

terrain	Interventions sur le terrain (notée i.)	Interventions par visio	Type d'intervention
SNCF	5 i. d'un jour	3 de 1h30	Entretiens, formation à CK, participation à des prototypes d'ateliers KCP ; Réunions d'avancement sur le modèle SNCF
Airbus	2 i. d'un jour ; 2 i. de jours ; 3 i. d'une semaine ; 1 i. de 2 semaines	Très nombreuses	Entretiens nombreux, participation à des ateliers de co-design, participation à des réunions diverses ; Réunions d'avancement sur le modèle Airbus
STM	1 i. d'un jour ; 3 i. de 2 semaines ; 1i. de 3 semaines	10 de 2h	Entretiens ; participation aux comités de validation ; participation à 2 réunions de crise ; réunion d'avancement du modèle STMmicroelectronics

En outre, l'évaluation périodique des praticiens et de la communauté académique s'est faite au travers de comités de pilotage (2 pour le cas SNCF, 4 pour le cas airbus, 3 pour le cas STMmicroelectronics). Ce dispositif formel et prévu dans le partenariat de recherche consiste en des réunions de 2 heures réunissant l'industriel, les encadrants de recherche et la doctorante (la composition des comités de pilotage en fonction des terrains est exposée dans le Tableau 3). Les comités permettent de discuter des problématiques et des résultats de recherche, de convenir des directions à prendre, des éventuelles expérimentations à mener.

Tableau 3 : Composition des comités de pilotage

Mines Paris	Pascal le Masson, Benoit Weil (encadrants de thèse), Honorine Harlé
STMicroelectronics	Stéphane Hubac (ancien expert contrôle des procédés, actuel conseiller-expert en production) , Raphaël Le Bihan (responsable méthode des procédés et de la maintenance, de la défektivité)
SNCF	Yann Veslin (directeur du technicentre), Tony Bourlier (responsable innovation)
Airbus	Guillaume Bulin (responsable technique et de l'industrialisation A330 ; (2017 : responsable du projet usine conceptrice à l'usine de Saint Nazaire)

Lecture : chacun des comités est composé de l'équipe des Mines Paris et des praticiens du terrain concerné

Enfin, de nombreuses interactions avec la communauté académique ont eu lieu dans une logique de contre-transfert. Les présentations des travaux à la communauté académique ont ainsi scandé le cheminement doctoral, comme le montre le Tableau 4.

Tableau 4 : Présentations à la communauté académique

Type de présentation et acteurs concernés	Date ou nature
Présentations en réunion d'équipe de la chaire TMCI	Décembre 2019, décembre 2020, novembre 2021, décembre 2022, février 2022, mai 2022
Présentations aux entreprises partenaires de la chaire TMCI	Janvier 2019, janvier 2020, janvier 2021, janvier 2022
Comités de suivi individuels de thèse	Juin 2019, juin 2020, juin 2021
Participation à des conférences internationales	IPDM juin 2019 (Leicester), ICED août 2019 (Delft), ICED août 2021 (Göteborg, en hybride)
Présentation au Special Interest Group (SIG) de la Design Society , Paris	Janvier 2019 (atelier doctoral), janvier 2020
Présentation au séminaire doctoral du CGS	Novembre 2020, mars 2021

4.3. Présentation des terrains de recherche

Quels terrains devrions-nous choisir pour enquêter ? Quelles propriétés sont nécessaires pour un bon partenariat ? Nous l'avons déjà évoqué plus haut, cette thèse est à l'origine née d'une demande au laboratoire de certains industriels partenaires de la chaire TMCI de venir en production, lieu de l'exécution, étudier la conception. Une fois les expériences de recherches préliminaires, qui ont convaincu les chercheurs d'aller plus loin et de lancer une thèse, il a fallu trouver des terrains d'investigation. Certains étaient déjà lancés, mais avaient des problématiques qui évoluaient à mesure que leur compréhension du phénomène progressait. D'autres partenariats balbutiaient ou n'existaient pas ; il a fallu les débusquer, les construire et les renforcer. Ce paragraphe explique le choix des terrains, leurs problématiques empiriques, et leurs grandes tensions qui les traversent. Il retrace par là même la co-construction des partenariats.

4.3.1. L'usine d'Airbus à Saint-Nazaire

Airbus est un groupe multinational leader dans les domaines de l'aéronautique et spatial composée de trois entités : hélicoptères, défense et espace, et avions commerciaux. Les deux premières branches ne faisant pas l'objet de notre recherche, nous nous concentrerons sur la troisième branche, correspondant à l'entreprise Airbus S.A.S., que nous appellerons par la suite « Airbus ».

Le siège d'Airbus (avions commerciaux) est situé à Blagnac, près de Toulouse, et regroupe les fonctions centrales (qualité, marketing, ressources humaines, finance) ainsi que le bureau d'études. La production est confiée aux usines qui sont chacune responsables d'une partie de la fabrication des avions ou de leurs composants spécifiques, mais aussi à un large réseau de fournisseurs gravitant autour de l'entreprise. Les usines Airbus sont réparties en Europe, mais aussi aux États-Unis, et en Chine. En France, les usines sont implantées à Nantes, à Saint-Nazaire et près de Toulouse pour l'assemblage final avant livraison au client.

L'usine de Saint-Nazaire assemble et pré-équipe les pointes avant (ou noze) et le fuselage central des avions commerciaux d'Airbus (A320, A330, A350, et auparavant A380 et leurs déclinaisons), mais aussi des avions militaires. Au moment de la recherche, c'est-à-dire avant la crise Covid19, Airbus Saint-Nazaire emploie environ 3000 personnes, 600 intérimaires, mais aussi 3000 prestataires en contrat chez un fournisseur. L'usine est considérée comme « petite » par rapport à ses voisines européennes. Ancrée dans le bassin nazairien, le sentiment d'appartenance y est très fort. Les opérateur.ice.s sont appelés « compagnon.ne.s » afin de souligner l'expertise de leur travail : que ce soit dans la partie assemblage des parties de l'avion, avec des compétences d'ajustage et de montage pour assembler les pièces de l'avion et les « souder » ensemble de façon très précise et à des exigences de qualité élevées, ou encore pour disposer et fixer les premiers équipements dans l'avion (circuits d'électricité, hydrauliques par exemple), ce qui requiert notamment des compétences en électricité et en mécanique. L'usine est peu automatisée (et le.a compagnon.ne.s y tient donc un rôle clé.

En plus de remplir ses objectifs de production habituels (livrer les tronçons d'avion à temps, aux objectifs de qualité et de coût fixés, etc), l'usine doit faire face à plusieurs défis liés au secteur et qui se repercutent en production⁵. D'abord, Airbus est un leader en aéronautique civile. Son concurrent principal est l'étasunien Boeing, mais d'autres constructeurs sont également engagés sur le secteur, comme le canadien Bombardier, mais aussi le chinois COMAC (Commercial Aircraft Corporation of China), fondé en 2008, mais dont le développement de l'avion de ligne C919 pourrait venir concurrencer directement l'A320 et le Boeing737. D'autre part, les avancées dans le domaine spatial de SpaceX, concurrent non direct, pourraient néanmoins déclencher des innovations de rupture dans la façon de développer d'un avion ou de l'industrialiser, qui imposeraient à Airbus de réagir. Dans ce contexte de pression concurrentielle, Airbus Saint-Nazaire voit sa cadence régulièrement augmenter. Concernant la lignée phare des A320, la production est passée de 42 avions par mois à 60 avant la crise Covid (depuis, des cadences de 75 avions par mois sont prévues pour 2023). De plus, l'avionneur connaît une pression à la baisse des temps de développement et d'industrialisation : il s'agit de produire « bien du premier

⁵ Ceci est vrai au moment où la recherche a eu lieu ; la crise Covid19 n'a fait qu'amplifier ces tensions, auxquelles s'est rajoutée une pression écologique devenant plus impactante pour l'aviation civile, poussant à revoir la mobilité aérienne dans ses usages et ses avions.

coup » pour chaque nouvelle modification ou nouveau modèle. Or, l'organisation héritée du passé qui sépare fortement BE et usine, ainsi que la durée du succès commercial de l'avion qui a d'abord été dessiné et produit sur plans papiers dans les années 1980 (le premier vol de l'A320 date de 1987) ne favorise pas la vitesse d'adaptation et d'itération. Face à cette croissance rapide des cadences et des performances de développement et d'industrialisation, il faut produire plus vite, mais aussi différemment. Airbus a besoin d'adapter ses outils (par exemple par la numérisation de ses plans, mais aussi ses procédés et méthodes, tant au niveau BE qu'en production, notamment en permettant une très forte imbrication entre les bureaux d'études, des méthodes (manufacturing) et les compagnons sur les lignes de production.

Face à ces tensions, la direction de l'usine a souhaité renforcer les recherches et expérimentations pour l'usine. Par exemple un projet pilote de management en « entreprise responsabilisante » est lancé en 2014 pour 600 salariés airbusiens pour explorer, avec une équipe de chercheurs en psychologie de l'université de Nantes, les conditions de validité et d'ajustement de l'entreprise libérée dans l'usine. Il en a découlé la volonté de favoriser les processus collaboratifs (la conception à plusieurs) ainsi que la participation de chacun (donner un pouvoir de décision plus important à chacun, à tous les niveaux) (Caillé, 2020). Le projet « usine conceptrice », lancé dès 2013, entre dans ce cadre de recherche et d'expérimentation spécifiquement pour l'usine.

4.3.2. Le technicentre SNCF de Nantes

Le technicentre SNCF TER Pays de la Loire est situé sur le site de Blottereau, à quelques kilomètres de la gare de Nantes. Ce centre industriel assure la maintenance préventive (à hauteur de 70%) et corrective (30%) des trains régionaux circulant dans les Pays de la Loire. En d'autres termes, il inspecte, contrôle, procède aux remplacements de pièces, prévus par le plan de maintenance à intervalles réguliers, ou imprévus mais détériorés prématurément. Après avoir été entièrement nettoyé par un prestataire de service externe, les TER arrivent au technicentre où sont d'abord effectuées certaines opérations spécifiques : plein d'eau, de sable, de gasoil, mise à niveau de l'huile, de la graisse pour aiguillage et du liquide de refroidissement, vidange WC etc. Puis, les trains sont inspectés et le cas échéant, remis en conformité et fiabilisés. La compétence du technicentre s'arrête et se transfère à un autre technicentre spécialisé pour certaines modifications importantes (par exemple changer l'ensemble du mobilier intérieur) ou sur des pièces très techniques nécessitant du matériel spécifique, et pour les opérations de remise à niveau complète de mi-vie des rames. La bonne activité du technicentre est cruciale pour les passagers SNCF puisque les problèmes matériels sont susceptibles d'impacter directement le trafic ferroviaire.

35 trains sont maintenus par jour en trois-huit et sept jours sur sept, avec une moyenne de stationnement à l'atelier de 7h par train. Il dispose d'une voie de nettoyage et détagage, de 4 voies de 80 mètres et de 3 voies de 110 mètres. Le technicentre est spécialement équipé de fosses et de chaîne de lavage simultané pour accéder au-dessous des rames, ainsi que de nacelles et passerelles pour accéder au toit. 150 personnes travaillent pour la maintenance, de métiers variés et clés dans la maintenance des trains : thermiciens (pour les moteurs thermiques et la transmission notamment), électriciens (pour les équipements de sécurité, la chaîne de traction, le système d'information voyageur etc.), freinistes (pour la production d'air, les systèmes de freins, les essuie-glaces), « bogies

caisses » (pour les essieux et les organes de roulement, les bogies⁶, l'attelage automatique, les pantographes...), dépanneur.euse.s (dépannent l'ensemble des systèmes du train) ainsi que spécialistes de l'aménagement intérieur (pour les sièges, les WC, les portes d'accès, les vitres etc). Pour soutenir et organiser les opérations, une vingtaine travaille en appui de la production, notamment des référents techniques pour aider techniquement à la production, un responsable logistique pour l'approvisionnement et la gestion des pièces, un coordinateur de production qui organise la production pour tenir les délais prévus, un directeur de l'amélioration continue et de l'innovation pour faire progresser le technicentre sur les indicateurs qualité, coût, délais, sécurité, mais aussi engager des ressources pour des chantiers de transformation à définir.

La maintenance des TER pays de la Loire doit faire face à plusieurs défis. D'abord, les métiers de la maintenance ferroviaire sont en cours de transformation. Le technicentre de Nantes-Blottereau existe depuis 1941 et a gardé des métiers traditionnels de maintenance (énumérés plus haut) qui restaient jusqu'il y a peu stabilisés. Or, aujourd'hui très peu automatisés et digitalisés, le centre voit le matériel changer, embarquant plus d'automatique, mais aussi plus de détecteurs pour assurer un suivi d'état en continu. La façon de mener un contrôle ou un diagnostic change alors : dans un extrême quelque peu caricatural, l'opérateur.rice n'a plus besoin de démonter les pièces pour en vérifier le fonctionnement, mais peut accéder à un tableau de bord indiquant l'état des composants. Une perte de sens et de savoir-faire peut alors être ressentie ; le directeur du technicentre parle de « crise » des métiers pour désigner cette mutation qui se traduit dans les faits par des départs prématurés ou des difficultés à embaucher.

L'évolution vers plus d'automatisation et de digitalisation se fait aussi dans les technicentres. Il peut s'agir par exemple de solutions de simplification digitale pour un suivi plus fin et en temps réel des stocks ou des travaux en cours, mais aussi de l'aide par un exosquelette pour certaines tâches non ergonomiques comme le travail en fosse sous les rames, ou encore de l'utilisation de drones et de réalité augmentée (la caméra facilitant le repérage des défauts) pour l'inspection des toits plutôt que la réalisation d'un travail en hauteur comportant des risques mortels de chutes et d'électrocution. Le technicentre de Nantes, comme les 35 autres technicentres SNCF maillant le territoire ferroviaire français, a donc la charge d'actualiser constamment sa façon d'opérer la maintenance, en repérant les besoins, imaginant les façons de travailler, testant les technologies, tout en garantissant une qualité, une cadence, une sécurité, ou une rentabilité meilleures.

Par ailleurs, depuis le milieu des années 1990, la SNCF ne conçoit plus ses propres trains, mais en opère la maintenance sur toute la durée du cycle de vie, et le démantèlement éventuel si la rame n'est pas vendue à la fin de son exploitation. Par exemple, les automotrices électriques « Regio2n », très utilisées pour les trains régionaux, sont conçues et fabriquées par Alstom (anciennement Bombardier). Le cahier des charges des TER a été établi par le bureau d'étude du matériel SNCF en incluant des fonctions liées à la maintenance. Cependant, une fois les trains livrés, les technicentres doivent s'adapter. Par exemple, le centre a dû faire récemment des grands travaux pour pouvoir accueillir les nouvelles rames de 110 mètres de long au lieu des 80 jusque-là en vigueur. Dans un autre registre, les choix d'architectures des trains rendent la maintenance peu aisée d'accès et peu sécurisée pour les opérateur.rice.s travaillant alors en hauteur et à proximité directes des lignes électriques. Le

⁶ Chariots sous le train permettant de maintenir les essieux.

technicentre a donc intérêt à prendre une part croissante dans la conception des spécifications aux constructeurs et dans les tests de leurs prototypes afin de rendre les trains maintenables facilement. En interaction avec la direction matérielle de la SNCF, il peut apporter des concepts nouveaux pour la maintenance des trains.

Enfin, la région décidera au cours de l'année 2023 du choix de l'opérateur dans le cadre de la mise en concurrence de 30% des lignes intra-régionales. Cela pousse le technicentre SNCF à faire la démonstration dans le présent mais aussi pour le futur de ses compétences et sa fiabilité en matière de matériel et de vitesse d'intervention pour soutenir les besoins en TER de la région.

Pour répondre à ces transformations et défis, l'évolution conjointe du technicentre, de ses métiers, de ses outils et techniques, mais aussi de sa capacité à fédérer autour des enjeux de conception pour la maintenance ses partenaires plus ou moins éloignés (autres technicentres, fournisseurs, BE, recherche, constructeurs etc) constituent un enjeu majeur. Cette tendance est jusqu'alors appuyée par les démarches d'amélioration continue (5S, kanban etc). Le directeur et le directeur de l'innovation et de l'amélioration continue du technicentre ont souhaité comprendre et développer le potentiel d'innovation dont l'usine pouvait être l'instigatrice. Ils ont contacté les chercheurs de la chaire TMCI avec qui la SNCF avait déjà eu des partenariats de recherche-intervention notamment pour travailler sur les problématiques de méthodes et d'organisation innovantes avec l'ingénierie de l'entreprise (cf par exemple (Laousse, 2018)).

4.3.3. L'usine de STMicroelectronics à Crolles

STMicroelectronics est un des leaders européens et mondiaux dans le domaine des semi-conducteurs, aux côtés d'Intel, Qualcomm, Broadcom, Samsung Electronics, TSMC, etc. L'entreprise franco-italienne conçoit, fabrique et commercialise des puces électroniques, utilisées dans de nombreux secteurs : les objets du quotidien connectés, la téléphonie, les machines industrielles, les voitures intelligentes, l'aviation, le spatial, etc. L'ubiquité de plus en plus marquée des puces électroniques dans le quotidien ainsi que dans les produits technologiques alimente une tension sur la demande⁷.

Le secteur des semi-conducteurs est un secteur technologique de pointe, tant dans la conception des produits que dans leur fabrication. Il s'est longtemps structuré autour de la « loi » de Moore en coordonnant les efforts et la stratégie de R&D entre les différentes entreprises du secteur. La « loi de Moore » n'est pas une loi à proprement parler mais une projection faite en 1965 par Gordon Moore, alors directeur de la R&D à Fairchild Semiconductor, selon laquelle le nombre de composants par circuit intégré doublait chaque année et que ce rythme se maintiendra au moins les dix prochaines années. En 1975, il révisa sa projection à un doublement tous les deux ans. Le secteur des semi-conducteurs s'est ensuite structuré afin de réaliser cette croissance. La miniaturisation des composants et des puces électroniques constituait alors l'enjeu principal des développements technologiques successifs, afin d'améliorer les performances et de diminuer les coûts de production. Depuis les années 2000, les acteurs se tournent également vers d'autres voies de performance, notamment

⁷ Cf. les ruptures d'approvisionnement dans l'actualité récente

l'expansion fonctionnelle des puces électroniques et la diminution de leur consommation d'énergie. Au-delà de rôle de mémoire et de calcul, les puces sont peu à peu devenues des systèmes complexes formés de composants hétérogènes et réalisant des fonctions diversifiées: par exemple, des fonctions de capteur/actionneur, la récupération d'énergie pour l'Internet des objets, les communications à faible puissance, etc.

L'entreprise STMicroelectronics emploie environ 45000 personnes dans le monde, dont 11000 en France, où se situent 9 sites dont 3 (Rousset, Tours et Crolles) pour la production des circuits avant tests, découpe et emballage final. Nous avons effectué nos recherches à l'usine de Crolles, située près de Grenoble. 4000 personnes y travaillent, réparties entre la production des puces avant test et assemblage final et la R&D. Le site a été construit en 1990 pour y implanter une usine pour la fabrication de puces électroniques sur les wafers⁸ de 200mm. La R&D est également présente pour la conception des circuits intégrés de pointe. Une seconde usine a vu le jour en 2002 pour la fabrication sur wafers de 300mm et un renforcement des équipes en R&D.

Une des particularités de l'usine réside dans sa grande complexité. 218 machines se répartissant dans 70 types d'équipements produisent environ 1800 wafers par semaine, contenant chacun près d'un milliard de composants répartis pour environ 640 puces électroniques. Une gamme de fabrication est composée de plus de 250 opérations opérées à l'Ångström (Å) près, pour réaliser les étapes clés de la production : la photolithographie, l'implantation ionique, les dépôts de films minces, les dépôts métalliques, gravure physico-chimique par plasma, traitements thermiques, opération de nettoyage et de gravure humide, polissage mécano-chimique (Cabanes, 2017). Cette usine est gérée par des ingénieurs.e.s expert.e.s dans ces procédés et les champs scientifiques concernés. L'enjeu de la production est donc d'être en mesure de piloter et répéter ces procédés de pointe, tout en garantissant une qualité maximale pour le client, et en faisant évoluer les technologies constamment. Pour cela, la production est mise sous contrôle statistique et dispose de nombreux capteurs sur les machines de traitement ou de métrologie. De plus, la fabrication est réalisée en salle blanche, c'est-à-dire dans un environnement où la pression, la température et l'humidité sont maintenues aux niveaux souhaités. L'air y est filtré et renouvelé entièrement toutes les 10 minutes, afin de maintenir la concentration en poussières à un niveau très bas et contrôlé.

4.3.4. Un modèle multi-partenarial original

Pour résumer, nous pouvons brosser rapidement les composantes de chacun de nos terrains. Chez Airbus Saint Nazaire, nous sommes allés à la rencontre de démarches innovantes de re-conception de règles dans un secteur aéronautique pourtant très normé. L'usine, de taille « petite » relativement aux autres sites de production Airbus, est soucieuse d'innovation technologique mais aussi managériale, et prête pour cela à l'expérimentation scientifique qui est soutenue par la direction, et développe des échanges depuis 2013 avec le laboratoire. Cette usine est peu automatisée, et une grande partie de ses tâches repose sur l'expertise techniques des compagnon.ne.s. La cadence de production tend à augmenter fortement, tout en conservant ou améliorant la qualité des livraisons ce qui nécessite de re-

⁸ plaques de silicium sur lesquelles sont fabriquées les puces

concevoir les modes de production et d'industrialisation. la question est donc, pour la direction de l'usine, de savoir innover et rendre l'usine de Saint-Nazaire conceptrice de son industrialisation.

Au technicentre SNCF, nous étions en présence d'une usine aux activités et aux métiers relativement stabilisées qui devait faire face à l'évolution du matériel roulant et co-concevoir la façon dont il sera maintenu dans le futur. Le centre a historiquement appuyé son évolution sur des outils d'amélioration continue dont l'utilisation a été rendue routinière, sans pour autant être sûr qu'ils suffiront pour relever les défis de la transformation actuelle et future de la maintenance ferroviaire. Le directeur de l'amélioration continue et de l'innovation, ainsi que le directeur de l'usine cherchent à connaître plus précisément la nature de l'activité de conception dans le technicentre, ses potentiels non exprimés et la façon d'atteindre ces derniers.

Enfin, chez STMicroelectronics nous avons effectué une plongée dans l'industrie 4.0, implantée à Crolles depuis plus de 20 ans. Cela offre donc un recul suffisant pour permettre aux chercheurs en gestion et en génie industriel de comprendre et de modéliser le système et de formuler des hypothèses sur ce que pourrait être la production de demain dans les autres industries. L'usine de Crolles possède en effet des propriétés remarquables de l'industrie 4.0 : une cadence très importante, des produits et des technologies évoluant très vite (quelques mois), des procédés et des techniques de pointe nécessitant des expertises rares et diversifiées, une production complexe, sensible et automatisée etc. Compte-tenu du caractère crucial que revêt la garantie de la qualité dans ce contexte, le directeur des méthodes pour les procédés et la maintenance souhaitait comprendre comment maîtriser les risques au moment d'introduire les changements en production, et rendre ainsi le système robuste à sa propre évolution.

Ce passage en revue rapide des terrains, de leurs tensions et de leurs problématiques permet de prendre la mesure de l'hétérogénéité de notre panel. Le lecteur aurait pu s'attendre à un format plus classique d'enquête longitudinale approfondie dans une unique usine ; des formes contractuelles type « thèse CIFRE » auraient pu être adaptées à un travail de recherche sur l'usine. Cependant, pour répondre à nos deux questions de recherche soulevées par cette thèse, nous avons choisi de panacher nos terrains et nos méthodes. Nous voyons en effet plusieurs avantages à cela. D'abord, la dimension très exploratoire du sujet, amenée par les concepts initiaux « usine conceptrice » et « révision du système de règles », est propice à une enquête élargie. En travaillant dans des environnements et sur des problématiques diverses, les facettes spécifiques de chacun des concepts ont pu être portées au jour, et faire l'objet d'une démonstration. Dans le même temps, la résonance entre les travaux de recherches, menés en parallèle, a incontestablement aidé à repérer ce qu'il y avait de particulier ou de générique sur chacun de nos terrains et ainsi à polir peu à peu nos résultats. La structure de la thèse, avec un chapeau et des articles, rend d'ailleurs compte de cette dynamique de recherche : chacune de nos expériences de recherche apporte une contribution à la question principale et à ses deux questions subsidiaires (sur ce dernier point, cf « Synopsis de la thèse » partie 4.5).

Ensuite, la variété des terrains permet d'enrichir et de valider le modèle dans des conditions hétérogènes, renforçant sa robustesse. Nous avons ainsi pu travailler sur la conception à la SNCF avec du travail non automatisé, des tâches qui se répètent de train en train, des conditions opérationnelles tendues avec un travail en trois-huit etc. Dans le même temps, nous allions dans l'usine 4.0 de Crolles pilotée par des ingénieurs hyper-spécialisés tentant de re-modéliser sans cesse le système de production, tandis qu'Airbus Saint-Nazaire était résolument tournée vers l'expérimentation pour la

production en parallèle de sa production. Dans le même sens, ce contexte de recherche nous a permis de valider l'existence, les caractéristiques et les conditions de re-conception du système de règles dans un spectre large de pré-dispositions a priori à re-concevoir les règles. L'énigme de cette thèse réside dans la possibilité d'existence d'une activité de re-conception du système de règle, exigeant à la fois une capacité à concevoir et à faire évoluer sa prescription. Comme nous l'avons expliqué en introduction, cette énigme tient notamment au fait que l'usine est avant tout un lieu d'exécution, que si la production conçoit, ce n'est que pour résoudre les derniers problèmes de mise en œuvre de la prescription. Ici, nos trois terrains reflètent cette énigme à des degrés divers: il paraît difficile d'envisager une activité forte de conception dans un technicentre dont l'évolution est dictée par les démarches d'amélioration continue, et dont l'organisation est réglée sur la cadence. Le lecteur pourrait s'étonner de voir une usine leader mondiale d'aéronautique, secteur normé par excellence, re-concevoir ses règles. Il paraît impossible d'imaginer des ateliers de créativité qui vont changer les règles au sein d'une usine de semi-conducteurs entièrement automatisée. L'accès à cette diversité des terrains permet alors de dévoiler l'activité de conception là où on ne l'attendait pas, allant au-delà des images d'Épinal souvent associées aux usines.

Néanmoins, la richesse et la variété que nous procure ce modèle partenarial pourrait masquer la difficulté d'accès au terrain que nous avons rencontrée. De fait, les partenariats ont été longs et difficiles à nouer, notamment au niveau des ressources humaines des entreprises. Plusieurs hypothèses peuvent être avancées, mais l'une d'entre elles tient sûrement à la nature de la production : Il faut préserver la production des problèmes ; ne pas inventer de nouvelles règles sans fondements ; les opérateurs en usine doivent respecter la prescription; ils doivent optimiser leur temps pour la production ; la production c'est d'abord de la gestion des opérations et des crises, il n'y a pas de temps pour concevoir etc. Il nous a fallu démontrer par de nombreux entretiens - et parfois renoncer - que notre posture de chercheur n'était pas subversive et n'allait pas conduire à de l'improvisation généralisée ni à une perte de contrôle de la production, que la conception en production était loin d'être suspecte et qu'elle pouvait même avoir quelque intérêt caché. La crise productive liée à la crise du Covid19 a finalement mis un terme à toute forme d'expérimentation sur les terrains. Corollairement à cette difficulté d'accès, nous pouvons affirmer que notre percée dans le monde industriel fut une expérience précieuse et qu'elle nous a permis de récolter un matériau rare. Nous tenterons de le mettre à profit dans ce chapeau, notamment afin de dévoiler les conditions de robustesse de la re-conception de règles, constituant une condition sine qua non de l'opérationnalisation par les usines, et de la poursuite des recherches dans les usines.

4.4. Présentation des méthodes et matériaux de recherche

Avec les terrains précédemment présentés, comment explorer la re-conception de règles en usine ? Quelles méthodes mettre en œuvre ? Quels matériaux récolter ? Cette partie explique article par article quels étaient les questionnements et les enjeux face aux terrains, et comment se sont formées les approches méthodologiques ad hoc pour y répondre. Cette recherche-intervention repose de facto sur une pluralité de méthodes et de matériaux adaptés à chacune de nos questions de recherches « locales ».

4.4.1. Article 1 : Modélisation de l'évolution d'un système de règles en usine

Comment modéliser la régénération d'un système de règle en usine ? Nous l'avons vu en revue de littérature, ce phénomène demeurait jusque-là un point aveugle. De plus, le système de règles était un inobservable, si nous n'avions pas les bons instruments pour leLe phénomène que nous étudions était manifestement caché, et nous devons le révéler; par ses interactions qu'il permet entre la connaissance en train de se faire et les expériences empiriques, le modèle allait nous y aider (cf partie 4.2.1, dans la démarche épistémologique).

Néanmoins, quel objet pouvait-être pertinent pour modéliser une règle ? Par quels formalismes modéliser un système de règles, qui demeure pourtant encore bien hermétique et impénétrable à notre compréhension ? Bien plus, comment rendre compte de l'évolution préservatrice d'un tel ce système, et de ce double mouvement simultané de renouveau et de conservation ? En effet, on aurait pu modéliser une règle de plusieurs façons. Par exemple, en informatique, une règle est en toute généralité un lien causal entre un objet A et B, que nous pouvons écrire $A \rightarrow B$. On aurait pu aussi, classiquement, leur donner la forme d'éléments d'un ensemble de règles : « soit r_1, \dots, r_n appartenant à R ». Cependant cela ne permettait pas de rendre compte de la structure entre les règles ni de leur évolution.

La revue de littérature nous indique que certains objets et débuts de modélisation existaient déjà, et paraissaient adaptés à notre problème d'évolution conservatrice. Ils étaient néanmoins mobilisés sur d'autres sujets que l'évolution du système de règles de l'usine (cf partie 2, dans la revue de littérature), et il nous fallait donc les reprendre, et les prolonger.

Notre modèle repose ainsi sur trois notions (cf. partie 2) : d'abord les patrimoines de création, objet permettant de donner corps à cette propriété d'évolution conservatrice qui nous intéressait. Ensuite, la théorie C-K, adaptée à la modélisation d'un raisonnement de conception qui rend compte de la réorganisation des connaissances permises par la conjonction, et pour nous, de l'éventuelle réorganisation du système de règles après évolution (Hatchuel & Weil, 2003). Enfin, les topos de Grothendieck qui permettent de penser les structures entre les objets et leur évolution indépendamment de leur nature (Boileau & Joyal, 1981). Devant la complexité du formalisme topos, notre approche a consisté à raisonner par analogie avec la théorie, en interprétant ses mécanismes et ses résultats et ce qu'ils signifient pour notre problème, dans la lignée de (Hatchuel et al., 2019; Leveque, 2022)

Nous avons donc repris la modélisation CK-topos esquissée dans (Hatchuel et al., 2019), en l'approfondissant et en la développant pour la régénération du système de règles en usine. Nous avons ensuite illustré le modèle par deux cas tirés de nos recherches sur le terrain. Ils expliquent en pratique les modalités de reconception de la règle formalisés par notre modèle et ont été choisi pour leur capacité à fournir une approche pédagogique d'une première mobilisation du modèle.

4.4.2. Article 2 (cas Airbus): Mettre en évidence un régime de conception à prescription évolutive

Dans cet article empirique, nous cherchons à donner à voir l'exemple de l'usine d'Airbus de Saint-Nazaire qui a expérimenté un régime de conception permettant de faire évoluer sa prescription. Ce cas illustre par là une des modalités de conception en patrimoine de création décrite dans le modèle de l'article 1. L'enjeu de la méthodologie de l'article est donc de rendre visible ces deux types de conception et leurs résultats.

4.4.2.1. Matériau

Entre 2013 et 2018, 30 projets collectifs, rassemblant opérateurs et managers, ont été menés dans le cadre de l'amélioration continue de l'usine Airbus de Saint-Nazaire. Ils concernaient des sujets variés comme améliorer la qualité aux passages de contrôle, améliorer la gestion des outils (pour ne pas en perdre dans l'avion, ou encore utiliser un robot automatique par exemple), améliorer l'organisation des équipes et ont mobilisé des équipes de taille hétérogène (de 4 personnes à 300 personnes pour le plus gros projet). Un praticien formé aux méthodes de conception innovante a participé à ces cas, comme simple participant ou comme responsable du projet. Travaillant en étroite collaboration avec les chercheurs de la chaire TMCI, il a recueilli la liste des cas, du matériau empirique formel (présentations power point aux équipes et à la direction) et informel (discussions informelles autour des projets notamment).

4.4.2.2. Méthode

Une partie de ces cas nous semblaient surprenants par leur méthode et leur résultat. Notamment, certains démontraient une aptitude à faire évoluer le système de règles, tout en utilisant des méthodes se rapprochant de la conception innovante. Il nous fallait une grille de lecture pour pouvoir s'en assurer, et mesurer le degré de polarisation dans l'un ou l'autre des régimes. Pour cela, la littérature en développement de produits et en théorie de la conception nous a fourni une liste de caractéristiques qui se retrouvaient dans les projets réglés ou innovants. Ainsi nous pouvions catégoriser les cas. Nous avons distingué 16 critères de conception au total : 4 concernant l'organisation collective, 4 sur la caractérisation du problème, 4 sur la façon de traiter le problème et 4 sur la caractérisation de la solution (cf Tableau 5, tiré de l'article en anglais). Cette grille de critère n'est pas originale en soi, et est certainement imparfaite. Elle contient par exemple des critères très proches les uns des autres, ne se distinguant que par légère nuance. Il nous a en effet semblé important de capturer les traces d'exploration et ainsi permettre de ne pas laisser échapper à l'analyse des phénomènes plus fins. La redondance n'était pas en soi pénalisante pour notre analyse : nous cherchions en effet à rendre visibles des signes qui, d'après la littérature, nous permettraient de catégoriser dans un deuxième temps, et non pas à trouver le modèle robuste de l'ensemble des variables causales explicatives d'un modèle pour le valider. Dans la même logique, les descripteurs choisis pour distinguer ces régimes ne sont volontairement pas propres à un régime de conception innovante stricte, mais peuvent être appliqués à de nombreuses démarches d'apprentissage ou d'exploration. Il y avait en effet une forme d'indétermination dans le régime de conception observé en usine, et nous cherchions un faisceau

d'indices permettant de statuer sur la logique ou non d'exploration. En revanche, le résultat espéré au terme de l'exploration différait radicalement d'un projet de conception innovante. Il n'était pas question de trouver une solution particulièrement originale, particulièrement nouvelle, ou encore une variété de solutions. Il fallait que les solutions soient adaptées à la production, et s'en assurer. Autrement dit, il s'agissait de concevoir la preuve de la robustesse de la production avec la nouvelle solution. La solution conçue était donc capable de s'intégrer à la prescription ; nous avons donc nommé ces régimes pour les distinguer dans l'article «conception à prescription évolutive » en regard de la « conception à prescription fixe ».

Tableau 5 : Tableau des critères caractérisant les deux régimes de conception extrait de l'article⁹

	n	Closed prescription	Expandable prescription
Collective organization (Engwall & Svensson, 2004; Hatchuel, 2001; Li et al., 2008; Scott-Young & Samson, 2008; Wheelwright & Clark, 1992)	1	The team is coherent within the production organization (i.e., all involved people belong to the environment of the problem and have a manufacturing specialty corresponding to a part of the problem: e.g., quality, planning, logistics).	The team follows another organization (i.e., people who are not directly involved in the production problem).
	2	The team members want to become experts in the problem (i.e., the team is like a "commando team" where experts are tightly linked and all act with a high degree of implication).	Some people do not become experts in the problem (i.e., a core team is involved with a network of experts who gravitate around with various levels of implication. Some people will follow the whole process, while others will be called on to give a piece of knowledge).
	3	The problem is divided between fields of expertise. There is one expert for every part of the problem (i.e., each practitioner is in charge of part of the problem, according to the division of labor).	The problem is not entirely covered by expertise. There are unknown fields to investigate (e.g., the team's experts will learn about new phenomena in their expertise that they did not previously know, or new expertise appears. The division of labor is not enough to understand the phenomenon).
	4	The solution is legitimized by expertise and approved by the nonexperts (i.e., each expert knows their part of the problem and offers an adequate solution. The solution is a combination of the experts' solutions for each field of expertise).	The solution is collectively designed (i.e., the solution is not a combination of existing experts' solutions. New results are designed collectively).
	5	The problem is local (i.e., the problem has a known and limited impact).	The question is a field for investigation (i.e., the problem is a wide question or concept, e.g., "a safe factory").
Characterization of the problem (Dorst, 2006; Hooge et al., 2018; Paton & Dorst, 2011)	6	The problem is considered as known and understood (i.e., the problem is about well-known manufacturing criteria of success and is not new in manufacturing).	The problem must be clarified and measured (i.e., the problem is badly understood and an investigation is required).
	7	The parameters of the problem can be measured easily.	There are new parameters to measure and new measures to implement to understand the problem (i.e., the method for investigating the problem is new and relies on data not considered previously).

⁹ Les références détaillées dans le texte de l'article sont ici ajoutées dans la colonne de gauche

	8	The problem is common in manufacturing (e.g., tools are available to tackle it).	The problem is revealed by unusual manufacturing science (e.g., the problem appears because an “external” science not directly linked to manufacturing is considered in the factory, such as human factors, psychology, safety).
<p>Problem-solving approach: tests and experiments</p> <p>(Caloghirou et al., 2004; Charue-Duboc et al., 2010; Li et al., 2008; Schmidt et al., 2009; Simonsen & Hertzum, 2012)</p>	9	The problem is solved using sciences commonly used in manufacturing (e.g., quality control, logistics, data analysis).	External sciences are needed to address the question (i.e., new knowledge in external sciences brings a new concept for the solution).
	10	The solution is tested according to a validation of hypotheses (i.e., there is a “yes” or “no” conclusion).	The validation of initial hypotheses is insufficient and the approach is exploratory. All the results of the tests are considered (i.e., the solution is tested, but also its impact, its behavior in the long term, its potential drawbacks, etc.).
	11	Only the final solution is tested (i.e., the team concludes on a solution and tests it).	Partial solutions are tested (i.e., some “pieces” of solutions are tested and the solution is not tested only at the end, but throughout its design).
	12	A surprising result is not considered in the final solution (i.e., only the final result is important for the design).	The surprising results are integrated to the design of the solution (e.g., if interesting phenomena are observed during the exploration and the tests, the solution will be changed).
<p>Characterization of the solution</p> <p>(Barker & Neailey, 1999; Hatchuel & Chen, 2017; Kidder, 2011; Krishnan & Ulrich, 2001; Lenfle & Midler, 2009, 2009; Li et al., 2008; Rhodes & Dawson, 2013; Roucoules et al., 2016; Wheelwright & Clark, 1992)</p>	13	The solution is approved when it is considered satisfying (e.g., if the work is considered as done, the solution has been implemented, then the problem is considered as closed).	There is a continuous process of improvement for the solution, which can open new concepts to be explored (i.e., once a solution is found, the team follows the results and tries to improve them. The design activity does not stop).
	14	The solution keeps the rules unchanged. The prescription is not challenged.	The rules are continually modified in response to the experimental results (i.e., the norms, processes, gestures evolve in relation to the findings).
	15	The history of the design process (i.e. the steps that drove to the solution) is not kept (i.e., the case is closed and the work of the team is closed without leaving any record).	The design process (i.e. the steps that drove to the solution) is tracked (i.e., the work of the team during the design of the solution is kept for future presentations).
	16	The solution is an existing method or tool in production or a combination of them (i.e., a tool frequently used in manufacturing is chosen and implemented).	The solution must be designed from scratch, knowledge has to be developed for the design process (i.e., a ready-to-use tool is not adapted for the problem and the solution is new).

Les 30 projets ont été passés au crible de cette grille par un code binaire : pour chacun des 16 critères un « 0 » correspondait à la colonne de gauche (conception classique en usine), et « 1 » à la colonne de droite (conception à prescription extensive). Ces projets ont été indépendamment codé par le praticien, et par la doctorante après entretiens téléphoniques ou en direct avec le praticien sur tous les cas (6 entretiens de 2h), et avec un accès à certains documents de travail (présentations visuelles pour l'équipe ou pour le comité de validation des projets par exemple). Les deux codes ont été comparés

lors d'une réunion et des explications et documents supplémentaires ont été nécessaires pour trancher sur les 10% de cas dont les codes différaient entre la doctorante et le praticien. Enfin, pour la suite de nos analyses nous avons attribué un régime de conception aux cas (codé 1 pour le régime à prescription extensive, 0 pour le régime à prescription fixée), considérant qu'un cas relevait d'un régime s'il avait au moins strictement la majorité des critères dans un régime.

Par ailleurs, nous cherchions à connaître la performance des régimes de conception identifiés ; il fallait donc nous munir d'un critère de performance. Différentes perceptions du « succès » s'offraient à nous : est-ce une solution très nouvelle ? Est-ce une solution qui convenait le mieux à tout le monde, s'imposant comme une forme de consensus ? Est-ce encore une solution particulièrement rentable, ou améliorant significativement les critères classiques de performance (qualité, coût, délais, sécurité) ? Nous avons choisi d'estimer le succès par la longévité de la solution : si elle était conservée plus d'un an, le projet était considéré comme un succès (et codé 1, 0 sinon). Plusieurs raisons nous ont conduit à cela. D'abord, la nouveauté et la distance à l'existant, outre la difficulté de mesure, ne semblait pas constituer un élément de différenciation entre les projets. D'autre part, il nous semblait que la longévité était un bon indicateur de plusieurs de ces aspects : une solution sera gardée si elle est rentable (ou au moins aussi bonne en qualité, coût, délai, ou encore sécurité) ; une solution qui ne convient pas à tout le monde a de bonnes chances d'être rejetée ou abandonnée. Enfin et surtout, une des grandes sources d'étonnement dans notre recherche résidait dans la capacité à exercer différemment la conception dans un cadre opérationnel très contraint, tout en révisant la règle. La viabilité de ces solutions était donc un sujet d'interrogation à la fois pour l'usine, qui n'a d'autre choix que de ne pas nuire à son système de production, et pour les chercheur.euse.s en gestion qui pouvaient alors évaluer la robustesse des choix de conception. Au terme de ce processus, et après classement en deux colonnes selon le régime de conception, nous avons obtenu le Tableau 6.

Tableau 6 Les 30 projets d'amélioration codés selon les 16 critères de conception, le régime de conception et la performance

crit.	3	5	7	10	12	14	17	22	23	28	29	30	1	2	4	6	8	9	11	13	15	16	18	19	20	21	24	25	26	27	
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	
2	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	
4	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
5	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
15	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
succ	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	

Lecture : Les colonnes représentent les cas (et leur numéro) tandis que les lignes représentent les résultats du code pour chacun des critères, pour le régime de conception (ligne « type ») et pour la performance (ligne « succ »). Le régime de conception à prescription évolutive est noté 1 (en jaune) ; le régime classique est noté 0 (en bleu).

L'homogénéité des régimes de conception, ainsi que la très forte corrélation sont visuellement remarquables. Deux tests statistiques ont été conduits pour le confirmer : la polarité des cas, et corollairement, leur très faible hétérogénéité est validée (à 5%) avec un test de Mann-Whitney-Wilcoxon, bien adapté à notre taille d'échantillon. La non-indépendance entre la performance et le régime de conception est validée (à 5%) avec un test d'indépendance entre les deux échantillons (test

du Chi-deux, également adapté à la taille d'échantillon). Ces tests sont présentés plus en détails dans l'article 2.

Nous souhaitons exposer l'étape du codage et donner à voir le type de projets dans leur dimension conceptrice - c'est-à-dire leur démarche cognitive, leur méthode, leur organisation etc. -, et dans leur dimension de performance c'est-à-dire leur résultat et leur impact sur la production et l'organisation. Malgré des contraintes très fortes en matière de confidentialité sur la nature des projets, des résultats, et des méthodes, nous avons choisi d'illustrer la méthode et le résultat par deux projets pris pour leur caractère typique de chacun des deux régimes de conception. Ces cas sont détaillés dans les articles et repris (et complétés par d'autres exemples) dans la partie 4 (résumé et compléments des articles).

4.4.3. Article 3 (cas SNCF) : révéler les rapports à la règle dans l'activité de conception du technicentre SNCF

Cet article vise à comprendre la nature de la conception et de la révision des règles dans l'usine, de façon générale, mais aussi plus particulièrement dans ce qui est appelé classiquement « amélioration continue ». Pour y parvenir, il nous fallait nous munir d'un outil d'observation doté de suffisamment de finesse pour observer la conception et son effet sur le système de règles dans toute sa granularité : nous souhaitons non seulement en connaître ses résultats, mais également son élaboration, ses prémisses, ses échanges entre acteurs, ses rebondissements et éventuellement ses heurts ; nous souhaitons nous placer au moment précis de la confrontation entre l'innovation et le système de règles .

4.4.3.1. Matériau

Pour notre enquête, nous nous sommes munis de la boîte à idées du technicentre et nous avons étudié ses règles d'utilisation ainsi que son contenu. Cet outil est aujourd'hui décliné dans de nombreuses versions regroupées sous l'appellation système de suggestions (suggestion systems), pour collecter des idées sur des thèmes larges et ouverts ou bien résoudre des problèmes ciblés. Il peut être mobilisé dans de nombreux environnements (entreprise, collectivité, associations professionnelles, etc.) La littérature en fait un outil de gestion des idées (idea management), qui est passé de la sélection et validation d'idées pour l'amélioration continue à un outil de structuration d'idées pour les phases initiales de lancement d'innovations radicales (Sandstrom & Bjork, 2010).

En usine, son utilisation remonte au moins au début du 20ème siècle, et a été favorisée fortement par la nécessité d'organiser la participation des employés, pour tenter d'instaurer plus de démocratie, pour encourager l'implication personnelle, ou encore pour profiter de l'expérience et de l'expertise des personnes au plus proche de la production pour l'améliorer.

Elle représente un outil courant de l'amélioration continue (Moica et al., 2018). La littérature relève cependant un défaut majeur: le risque d'abandon de ces boîtes à idées, pour de multiples raisons : non prise en compte des idées, perçues comme trop lointaines de ce qui est possible, mauvais système de

récompense, manque de motivation pour poster des idées etc. (Fairbank & Williams, 2001). Par ailleurs, tout en soulignant son rôle comme outil par excellence de la participation des opérateurs, (Carrier, 1998) montre que les résultats obtenus sont peu innovants et demeurent cantonnés à de l'optimisation selon les performances productive. La boîte à idées n'est donc pas adaptée à des changements profonds de l'usine.

La SNCF a une longue tradition de recueil des idées auprès de son personnel pour l'amélioration du matériel. Un système de récolte d'idées et de mise à l'honneur des cheminots apportant leur ingéniosité est officialisé dès 1929 dans la compagnie de chemin de fer Paris Lyon Méditerranée (PLM¹⁰). La création de la SNCF en 1937 unifia les pratiques locales et permit d'éditer un premier texte réglementaire pour le système de suggestions de l'entreprise en 1939, qui ne cessera d'être actif et d'évoluer (Janssoone, 1999).

Dans notre technicentre, la boîte à idée actuelle, sous format numérique, est implantée depuis 2013, mais a remplacé d'autres systèmes similaires antérieurs. Elle est mise en place dans le technicentre avec l'appui de la direction du matériel, avec une équipe dédiée pour les démarches participatives comme la boîte à idées. Elle conçoit l'outil, en fixe les règles, notamment le système de récompenses, déploie et favorise et son utilisation en aidant les responsables locaux à leur mise en œuvre. Pour stimuler la génération d'idées, elle organise des concours annuels d'idées entre les technicentres.

La boîte à idées, outil par excellence de l'amélioration continue et du participatif en usine, et implantée de longue date dans la vie du technicentre, semblait être un médium d'observation adapté à nos questions. Nous allions pouvoir examiner plus attentivement le type d'idées qui y entraient, leur traitement et leur transformation éventuelle jusqu'à leur mise en œuvre. Le format informatisé décrit en détail ci-dessous permettait en outre de repérer les traces de la validation plus ou moins progressive des idées, et de déceler de potentielles anomalies quant au rapport entretenu avec le système de règles.

Premièrement, nous avons eu accès aux règles de la boîte à idées, appelé par la direction « Matériel » de la SNCF, et classée comme « procédure » dans le « référentiel matériel » de l'entreprise. Ces règles ainsi que les principes de mise en œuvre ont été expliquées ou approfondies lors d'un entretien semi-directif de 1h30 avec la responsable de l'innovation participative de cette même direction. Ces règles et leur classement sont exposés en substance dans l'article correspondant (Table 2 : the national rules). Elles montrent que l'outil a été mis en place dans un but d'amélioration continue, et permet de réaliser les idées concrètes. La définition de l'idée est donnée comme suit : « une idée de solution ou d'amélioration et non un concept, une bonne intention ou une représentation imaginaire. (...) une idée est donc une nouvelle idée réalisable, c'est-à-dire une manière qui paraît nouvelle, inédite, originale, de résoudre un problème ou de satisfaire une demande concrète pour le périmètre concerné, dans un contexte donné, avec des moyens donnés. Une idée peut s'apparenter à une astuce, c'est-à-dire une manière habile de résoudre de petits problèmes pratiques. » (source : référentiel Matériel). Ces règles nous permettent de contrôler que nous sommes bien dans le cadre d'un outil classique d'amélioration continue ne recherchant pas l'innovation de rupture. Quelques ambiguïtés laissent

¹⁰ La SNCF a été créée en août 1937 pour unifier les diverses compagnies des chemins de fer français. La PLM était jusqu'alors une compagnie privée reliant Paris Gare de Lyon au sud de la France.

toutefois des degrés de liberté dans l'interprétation. Leur analyse sera l'objet de la deuxième partie de la méthode.

Deuxièmement, nous disposons de la série des 132 idées proposées et en cours de traitement (c'est-à-dire en cours de décision de validation) sur la période de janvier à septembre 2019 tirée de la boîte à idées du technicentre de Nantes-Blottereau. La période correspond à la volonté de constituer un échantillon à la fois conséquent, et d'idées traitées récemment ou en cours de traitement au moment de la recherche. Une « idée » correspond à une solution concrète inscrite au format numérique sur un modèle pré-établi de fiche, détaillant le titre, les contributeur.rice.s, la date, la description du contexte, la description de la solution, les résultats attendus, et les étapes de traitement comprenant éventuellement des commentaires (cf **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Des photos et schémas pouvaient éventuellement être joints à la fiche idée. Nous avons pu interroger à de nombreuses reprises le responsable de la boîte à idées du technicentre pour nous expliquer l'idée et la solution si nous ne la comprenions pas.

La composition de l'échantillon des 132 idées est détaillée dans l'article correspondant (cf Article 3). Cependant, on peut retenir quelques propriétés qui nous intéressent particulièrement. D'abord, avec les 93 contributeurs différents sur 150 personnes qu'emploie le technicentre, l'usage de cette boîte est répandu dans le centre. Les idées sont toutes traitées ou en cours de traitement (au moment de la recherche), ce qui permet d'affirmer que cette boîte est « active ». En effet, une des responsabilités du responsable de l'amélioration continue et des managers est de faciliter le bon fonctionnement de l'outil : rappeler aux équipes l'existence de cette boîte ou suggérer de déposer les idées pertinentes, et assurer leur suivi avec les équipes. De plus, la fiche numérique permet d'inscrire les commentaires de validation et de les archiver dans le temps. Cela nous permet d'accéder non seulement à l'idée initiale, mais aussi de comprendre le cheminement de l'idée et les étapes intermédiaires qu'elle a pu franchir dans son processus de mise en œuvre. Enfin, cette boîte à idée est

Fiche Idée 

Grille de protection sur le pot d'échappement du compresseur d'air thermique

📄 En attente de la décision de C [redacted]

Référence : ID84452
Auteur : M [redacted]
Origine de l'idée : DIRECTION TER PDL • TM - POLE TECHNIQUE MECANIQUE
Date de publication : 20 sept. 2019
Décideur : CYRIELLE ROMAGNIER
Action attendue : Décision à prendre (Échéance : 20 oct. 2019)

2 consultations

Contexte, constat, problème, environnement

Risque de brûlure lors de l'utilisation du compresseur d'air mobile thermique.
Le pot d'échappement situé sur le compresseur est dans une zone à risque de brûlure.

Description de la solution apportée et de la mise en œuvre envisagée

Pour éviter le contact direct sur le pot d'échappement qui est situé en partie supérieur à côté du filtre à air, je propose de mettre une grille de protection de couleur rouge fixé sur le pot à l'aide des 2 vis de fixation existant et en rajoutant 2 entretoises pour surélever la grille de 2 cm.

Ressources : grille de protection CPR

Résultats attendus

Retirer le contact direct sur le pot d'échappement et enlever le risque de brûlure.

Etapes du traitement

📄 20 sept. 2019 Enregistrée (M [redacted] > C [redacted])
M [redacted]
Installation d'une grille de protection sur le pot, en cour chez les IO en collaboration avec S [redacted]

explicitement destinée aux « solutions concrètes » et rapides à implémenter. Nous avons donc accès par ces 132 idées à l'amélioration continue en cours de conception et de validation au regard de la prescription.

4.4.3.2. Méthode

L'analyse de ce que contenait la boîte à idées du technicentre s'est déroulée en plusieurs temps.

D'abord nous cherchions à identifier la nature des idées gravitant dans la boîte à idées. Était-elle conforme à ce qui était annoncé? N'y avait-il que des idées-solutions prêtes à être appliquées? Était-ce seulement des idées de « bon sens » que la prescription avait ignoré jusque-là? Une façon d'instruire cette question était de la prendre par le prisme de la validation, et plus précisément par son critère de validation. En effet, cela allait nous permettre de repérer des traces éventuelles de frottement avec le système de règles.

– On s'attendrait à un critère binaire (validation ou échec) : si l'on applique la règle annoncée, les solutions ne devaient être que les solutions abouties, dont la mise en œuvre est facile, et favorables aux performances du technicentre. Les autres devraient être invalidées.

– Si au contraire le critère est plus raffiné (par exemple, plusieurs étapes de validation, ou un premier tri puis un deuxième...), cela marque une nuance dans la stricte application de la règle (« une idée est donc une nouvelle idée réalisable, c'est-à-dire une manière qui paraît nouvelle, inédite, originale, de résoudre un problème ou de satisfaire une demande concrète pour le périmètre concerné, dans un contexte donné, avec des moyens donnés ») et le système étudie soit des idées pas encore réalisables soit encore d'autres types d'idées non appropriées pour la boîte à idées mais pourtant à l'étude.

Nous avons donc cherché un proxy pour juger du critère de validation. Dans les commentaires de la fiche, les managers et autres experts du centre peuvent annoter les idées pour s'adresser au.à la porteur.euse de la fiche (ex. type : « bonne idée, à mettre en place ») mais aussi s'adresser le problème entre eux (ex. type : « est-ce que tu penses que cette solution est bonne ou l'on pourrait s'y prendre autrement? ») ou encore se passer la main (ex. type : « A., tu peux voir pour ce nouveau montage? »). Parmi ces commentaires, que nous avons tous lus en détail, nous avons repéré qu'ils pouvaient se classer en deux catégories : les commentaires de validation, et les commentaires d'investigation. Dans la première catégorie des commentaires conclusifs et validant l'idée pour sa mise en œuvre, ou remerciant le.a rédacteur.rice de la fiche. Dans la deuxième catégorie, le commentaire marquait une temporisation et l'idée ne pouvait pas être validée tout de suite : il fallait la faire aboutir, la modifier, ou encore vérifier qu'elle était conforme aux règles (« il faut préciser la taille », « idée à passer à... pour avis », etc. (cf. article 3 pour d'autres exemples). Nous avons intitulé les idées présentant des commentaires de validation, « idées avec design gap », que l'on pourrait traduire par « idée à conception inaboutie ». Les fiches idées avec design gap font donc apparaître un point de friction entre le système de règles et l'idée qui pourrait menacer la robustesse de la production.

Avec ce critère (avec ou sans commentaire d'investigation), nous pouvions désormais isoler les idées avec design gap. Nous avons ainsi sélectionné 31 fiches qui correspondaient à cela. Nous avons

d’abord vérifié, par une lecture scrupuleuse, que les idées sans design gap demeuraient attendues : relevant de l’astuce ou du bon sens, et prête à être mises en œuvre (cf. exemple détaillé dans l’article).

Pour poursuivre l’enquête au cœur de la validation des idées, nous voulions comprendre plus spécifiquement la nature du point de friction entre règles et idées avec design gap. Nous cherchions simultanément à déceler les leviers opérationnel mis en œuvre pour y remédier. Il nous fallait connaître plus précisément ce que contenaient les 31 idées restantes. Nous avons donc analysé plus en détail la fonction des commentaires des fiches avec design gap afin de préciser la nature de l’investigation. Pour nous aider, en plus de la lecture des fiches-idées concernées, nous avons parcouru les commentaires. Nous avons pu en identifier 5 catégories qui couvraient l’ensemble des commentaires : mobilisation d’une tierce personne ; demande de précision sur la solution ; hésitation sur la possibilité ou la validation ; demande explicite de changement dans le référentiel.

Nous avons donc pu rendre compte à l’aide d’un tableau les commentaires que contenaient chaque idée avec design gap. Le tableau de cette étape est dans l’article. Nous avons ici retranscrit son résumé dans le Tableau 7.

Idea Number	more people	more details	the problem remains	explicit check in the rules	explicit change in the rules
total (31)	21	10	6	8	2
total in % of the 31 ideas	68%	32%	19%	26%	6%

Tableau 7 : Résumé des types de commentaire par idée

Enfin, nous questionnions la conception de l’outil « boîte à idée » en lui-même, tel que pensé par la direction « Matériel » au niveau national. Était-il cohérent avec son utilisation ? ou bien le cas de Nantes indiquait-il une sorte d’utilisation élargie voire détournée de l’objet? Pour le savoir, nous avons relu les règles du référentiel qui concernaient l’utilisation de la boîte et de ses acteurs, et nous avons notifié les propositions selon qu’elles laissaient une largesse d’interprétation et des degrés de liberté dans leur opérationnalisation au niveau local ou non. Le tableau correspondant est donné dans l’article 3.

4.4.4. Article 4 (cas STMicroelectronics) : une stratégie de validation des règles rapide et robuste pour l’industrie 4.0

Comment se régénère le système de règles en industrie 4.0 ? Cet article questionne les raisonnements à l’œuvre pour la régénération des règles en industrie 4.0 et plus particulièrement l’interaction entre les données et les ingénieur.e.s et experts du système. STMicroelectronics opère ainsi des changements de façon intensive sur ses technologies dans le cadre de son amélioration continue.

Les changements en industrie 4.0 pour les semi-conducteurs sont extrêmement nombreux, complexes, et surtout, doivent s'insérer dans un contexte méconnu : les technologies utilisées sont pointues et de nombreuses interactions et phénomènes physico-chimiques ne sont pas connus des experts du système de production. Par conséquent, l'insertion d'un changement, aussi minime soit-il, est susceptible d'entraîner un risque systémique sur la production et des pertes importantes. Une des questions, lors de la validation d'un nouveau changement, est donc de gérer les paramètres qui ne sont pas encore connus comme jouant un rôle spécifique pour la production. Comment les repérer et maîtriser les risques qu'ils présentent, dans un environnement qui paraît déjà entièrement sous contrôle? Comment STMicroelectronics parvient-il à valider intensivement ses changements tout en demeurant robuste pour la production?

4.4.4.1. Matériau

Pour nos investigations, nous avons fait une incursion dans les rouages de la validation des changements. L'usine prépare et valide en effet de nombreux changements toutes les semaines pour mettre à jour et modifier ses technologies. Ces modifications peuvent être mineures (par exemple, la requalification d'un élément revenu de maintenance), mais présentent un risque pour la production qu'un défaut advienne et se propage à l'ensemble du système. Pour maîtriser les risques, l'ingénieur.e responsable du changement prépare une analyse de risque, et opère quelques tests préliminaires en production avec le changement. Il passe ensuite devant 3 comités représentant 3 étapes du processus : d'abord la validation de l'analyse de risque, puis la présentation des tests et la validation de la montée en cadence, enfin le contrôle des résultats après montée en cadence. Les comités sont composés de 4 experts de domaines complémentaires et assistent régulièrement aux comités.

Nous avons pu avoir accès à 19 comités de validation à des étapes variées et à leur présentation powerpoint. 9 des responsables de ces comités ont été interrogés lors d'un entretien semi-directif sur la préparation de leur analyse de risque. 5 experts réguliers du board ont été interrogés en entretien semi-directifs d'une demi-heure sur la façon dont ils évaluaient les analyses de risque en un temps limité. Nous avons également bénéficié de l'aide d'un ancien expert du board pour nous expliquer les cas et rebondir sur nos modélisations itératives.

4.4.4.2. Méthode

Pour répondre à nos questions, nous souhaitions accéder à la stratégie de raisonnement établie pour préparer les analyses de risque et les valider. Pour cela, une approche modélisatrice nous semblait particulièrement appropriée : elle permettait à la fois de mettre en évidence certains phénomènes et interactions, mais se constituait aussi en moyen d'échange et de discussion avec les candidats et l'ancien membre du board pour se raffiner et mettre à jour itérativement les phénomènes qui n'avaient pas été vus jusque-là. Le modèle a donc changé de nombreuses fois avant de trouver sa forme actuelle présentée dans l'article et de se raffiner. Ainsi, nous avons pu formaliser deux stratégies de modélisation théoriques possibles du système de production après changement. Nos différents entretiens, et nos observations attentive des comités ont permis de confronter les stratégies modélisées avec nos données. Cela a permis de rendre visible le raisonnement fait par les ingénieurs de STMicroelectronics

pour la maîtrise des risques (y compris ceux encore non connus) lors l'introduction des changements en production. Les détails de la modélisation sont présentés dans l'article 4.

4.5. Synopsis de la thèse

Cette partie présente le synopsis, c'est-à-dire la façon dont est articulée l'argumentation du chapeau pour répondre aux questions de recherche et aboutir aux résultats de la thèse.

L'argumentation de la thèse se construit pour répondre aux questions de recherche mentionnées plus haut. Pour rappel, la question principale était : comment faire évoluer un système de règles en usine? Nous avons choisi de l'approcher de façon plus précise sous l'angle de deux questions subsidiaires. D'abord, une question relative à la modélisation du phénomène de régénération de la prescription : comment modéliser le renouvellement d'un système de règles en usine? (QR1). Ensuite, la question des conditions de son opérationnalisation : quelles sont les méthodes, organisations, et ressources nécessaires pour cela? (QR2) Une fois les questions de recherche posées, la méthodologie générale adoptée est celle d'une recherche-intervention sur trois terrains, avec trois problématiques industrielles différentes : au vu de la variété des types d'usines et du caractère exploratoire du sujet initial, cela nous a permis de renouveler nos concepts et nos connaissances sur le sujet, en utilisant une méthodologie de recherche que nous jugions la plus adaptée aux questions et situations. Bien plus, alors que les partenariats prenaient forme et que les premiers résultats se dessinaient, cette configuration révélait peu à peu sa robustesse et surtout sa générativité : nos percées dans chacun des mondes et problèmes industriels se faisaient échos, nos énigmes ricochaient, nos résultats se répondaient. Ainsi, cela nous a permis à la fois de préciser nos méthodes et résultats sur chacun des terrains, mais aussi d'aller, dans ce chapeau, au-delà d'un résultat par combinaison linéaire ou d'une simple agrégation des résultats de chacun des articles.

Pourtant ce mouvement ne va pas de soi : comment peut-on avoir des articles, développés pour répondre à leurs propres questions de recherche très précises et locales, et dans le même temps répondre à d'autres questions plus générales, celles du chapeau? Nous pouvons l'expliquer par la posture conceptrice adoptée pour la rédaction de ce chapeau. En termes C-K, la configuration multi-partenariale et le format par articles nous a permis d'apporter des briques de connaissances (en K) avec les terrains, notamment autour des propriétés de l'activité de conception dans nos différentes usines. Le chapeau retranscrit quant à lui la reconceptualisation rendue possible par ces briques (opérateur $K > C$). Par suite, ce synopsis est le résultat ex post de cette démarche. Il explique, en repartant de nos questions générales de la thèse, comment nos expériences sur les terrains — retranscrites dans les articles — offrent des éléments de réponses à nos questions. De fait, ce format de recherche s'avérait propice à une argumentation matricielle (cf Schéma 1). Ainsi, chaque article apporte une contribution de réponse particulière aux questions de recherche du chapeau. Cela permet de mettre en relief un mouvement argumentatif bi-dimensionnel : une lecture article par article (ligne par ligne dans le schéma) permet de comprendre précisément les contributions de chacune des expériences à la thèse, en saisissant les particularités propres aux terrains. Une lecture question par question (en colonne dans le schéma) assure quant à elle une vision d'ensemble de la réponse, dont certaines facettes ressortent

particulièrement ou s'affinent grâce aux conditions de validations variées apportées par l'hétérogénéité de nos terrains, problématiques empiriques, et méthodes.

Afin de retranscrire cette structure argumentative dans le chapeau et d'exposer les différentes perspectives qu'elle permet, les résultats sont présentés en deux étapes distinctes. Dans une première phase de présentation des résultats (cf. partie 5), nous présentons la lecture en ligne de la matrice : par l'intermédiaire de résumés, nous rappelons les apports des articles indépendamment les uns des autres. Cela est renforcé par le format « article académique », qui impose de facto une argumentation auto-porteuse. Cependant, dans cette première phase, nous avons ajouté des compléments, qui peuvent correspondre à trois fonctions. La première est de préciser ou d'enrichir certains aspects des papiers qui aurait pu être aplanis lors de leur l'écriture. La deuxième fonction est de relire les articles à l'aune du modèle général, et de montrer en quoi le chaque expérience empirique explicite une facette du modèle. Réciproquement, le modèle général lu à travers les articles permet une restructuration des connaissances. Nous avons donc pu indiquer les inflexions dans les questions de recherche et les méthodologies utilisées qui seraient pertinentes d'apporter désormais aux articles, ce qui constitue la troisième fonction éventuelle des commentaires. Dans une deuxième phase de présentation des résultats (cf. partie 6), nous proposons une lecture de la matrice par colonne. Cette partie reprend les questions de recherche de la thèse et y répond notamment en mobilisant la fonction prédictive du modèle général, et éventuellement le prolonger par une mise à l'épreuve du modèle par les 3 expériences empiriques. Ainsi, nous pourrions conclure, au-delà des contingences des terrains, sur des résultats généraux de la révision du système de règles en usine, sa modélisation et ses ressources.

Schéma 5 : Représentation schématique de la trame argumentative matricielle

	QR1 – Modélisation ?	QR2 – conditions d'opérationnalisation?
Article 1	Contribution 1.1.	Contribution 1.2.
Article 2	Contribution 2.1.	Contribution 2.2.
Article 3	Contribution 3.1.	Contribution 3.2.
Article 4	Contribution 4.1.	Contribution 4.2.

Y a-t-il un ordre entre les articles? Certains sont-ils plus importants, d'autres plus anecdotiques? Le lecteur attentif aura déjà été interpellé par le fait que nos trois expériences de recherche issues des terrains ont donné lieu, logiquement, à 3 articles seulement. Le dernier article avait donc un statut un peu particulier. Écrit en tirant parti de la diversité de nos explorations, il était plus modélisateur et général que les trois autres, et donnait corps à la réponse de la question 1. De plus, loin de ne se préoccuper que de considérations théoriques, le modèle permettait déjà de prédire certaines conditions d'opérationnalisation et situations types de régénération du système de règles. L'article A model of creative heritage for industry s'est donc constitué en clé de voute de notre argumentation. Nous l'avons à ce titre présenté en 1er. Les autres articles illustrent et raffinent le modèle en mettant en exergue certains de ses aspects. Ils ont été présentés des enseignements les plus généraux aux plus particuliers : d'abord, l'existence et l'organisation d'une activité conceptrice forte en usine (article 2 Airbus, Innovative design on the shop floor of the Saint-Nazaire Airbus factory) ; ensuite, l'ingénierie déployée autour des règles pour l'amélioration continue (article 3 SNCF, What does the factory's

suggestion box reveal ?) ; enfin une puissance de validation des nouvelles règles en industrie 4.0 en remodelisant le patrimoine de création (article 4 STMicroelectronics, Integrating numerous changes at a fast rhythm in an Industry 4.0 system).

Le tableau suivant reprend l'ordre de présentation des articles, ainsi que leur statut (état de publication), leur référence ou auteur.rice.s, ainsi que l'objet principal de l'article (cf Tableau 8).

Tableau 8 : Articles présentés par ordre d'apparition dans l'argumentation de la thèse

Article / titre / terrain	statut	Référence ou auteur.rice.s	Objet
Article 1 A model of creative heritage for industry: designing new rules while preserving the present system of rules	Article de conférence (août 2021)	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. <i>Proceedings of The Design Society</i> , 1, 141-150.	Modélisation de l'évolution d'un système de règles
Article 2 Innovative design on the shop floor of the Saint-Nazaire Airbus factory Terrain : Airbus (Saint-Nazaire)	Article publié (février 2022)	Harlé, H., Hooge, S., Le Masson, P., Levillain, K., Weil, B., Bulin, G., & Ménard, T. (2022). Innovative design on the shop floor of the Saint-Nazaire Airbus factory. <i>Research in Engineering Design</i> , 33(1), 69-86.	Mise en évidence d'un régime de conception en usine capable d'étendre le système de règles
Article 3 What does the factory's suggestion box reveal? An analysis of the design capabilities of a train maintenance centre from its idea management system Terrain: SNCF (Nantes)	Article soumis à <i>Creativity and Innovation Management</i> (juillet 2022)	Harlé, H., Le Masson, P., Weil, B., Bourlier, T., Veslin, Y.	Mise en évidence de l'ingénierie de validation autour de la prescription l'amélioration continue.
Article 4 Integrating numerous changes at a fast rhythm in an Industry 4.0 system: A strategy to control known and unknown parameters in an Industry 4.0 ramp-up combining expertise and data—The STMicroelectronics case Terrain: STMicroelectronics (Crolles)	Article pour journal soumis à <i>CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology</i> (août 2022)	Harlé, H., Hubac, S., Le Masson, P., Weil, B.	Étude sur la conception continue d'analyses de risque pour des changements très fréquents dans les semi-conducteurs

5. Partie 4. Résumé et compléments des articles

Cette quatrième partie rend compte du contenu des articles, de leurs questions de recherche et de leurs résultats spécifiques. En outre, nous avons apporté un certain nombre de compléments, pour la compréhension et l'enrichissement de l'article en lui-même. Ils ont également vocation à relier nos travaux empiriques à nos questions de recherche générales.

Les articles sont donc présentés un à un, d'abord sous forme de tableau de synthèse, puis dans un résumé plus détaillé, avant d'être amendés de quelques compléments.

5.1. Article 1 : Modéliser la régénération du système de règles en usine

5.1.1. Tableau de synthèse

Titre (traduit de l'anglais)	La modélisation d'un patrimoine de création pour l'industrie: concevoir des règles nouvelles en préservant le système de règles existant
Auteur.rice.s	Honorine Harlé, Pascal le Masson, Benoit Weil
Statut	Article de conférence présenté à ICED 2021 (Göteborg, Suède) 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. <i>Proceedings of The Design Society</i> , 1, 141-150.
résumé	L'usine doit à la fois évoluer constamment tout en préservant ses capacités de production ; elle crée sans arrêt des nouvelles règles tout en conservant son système de règles. C'est ce paradoxe que souligne et élucide cet article. Convoquant la théorie CK et les topos au service des patrimoines de création, le papier modélise la régénération d'un système de règles en usine. Il permet alors de comprendre théoriquement le processus de validation d'une nouvelle règle au regard du système existant, et d'en déduire des vecteurs d'opérationnalisation pour l'usine en pratique.
Connaissances actuelles et limites	L'innovation conservatrice (ou préservatrice) est un problème résolu dans la littérature par un compromis : ne pas trop innover pour ne pas trop détruire. On retrouve cette idée dans l'innovation incrémentale ou encore l'amélioration continue. Les patrimoines de création sont des objets qui ont la propriété de concilier la création et le patrimoine, c-à-d la nouveauté avec le système hérité du passé. Ils ont suscité un début

	de modélisation en recourant à la théorie CK-topos qui permet notamment de penser la permanence de la structure des liens entre les objets indépendamment de leur nature.
Questions de recherche	QR1 : Comment modéliser l'innovation en usine et les différents types d'interaction entre la nouvelle règle et les règles actuelles ? Notamment, comment une règle peut-elle être à la fois innovante et préservatrice ? QR2 : Quels sont les ressources, les acteurs, l'organisation et les moyens nécessaires à la conception d'une nouvelle règle (ou l'extension d'une règle existante) dans un patrimoine de création ?
méthodologie	Modélisation théorique suivie de deux exemples illustratifs tirés des terrains de recherche
Résultats	R1. L'article apporte une modélisation de la validation de la nouvelle règle en cohérence avec le système existant ; R2. La modélisation souligne le rôle des opérateur.rice.s et des managers. Ils doivent être en mesure de suivre les différentes étapes de la création et la validation de la nouvelle règle : un processus d'exploration dans l'inconnu dans le système de règles, la démonstration de la faisceautisation et un organe de validation de la preuve.
Discussion et apports	La modélisation plus fine des patrimoines de création et l'explicitation de la phase de conjonction (en théorie CK) pour régénérer le système de règles ; La compréhension du rôle et des enjeux des opérateur.rice.s 4.0, concepteurs des règles et de leur validation.

Tableau 9 : synthèse de l'article 1

5.1.2. Résumé développé

Cet article modélise la conception de nouvelles règles en usine tout en garantissant à la fois la préservation des règles existantes et la bonne intégration de la nouvelle règle au sein du système de règle.

Dans un environnement 4.0, le système de production est complexe, méconnu, et son automatisation semble le reflet d'une mécanique bien huilée, et d'une certaine stabilité des procédés. Comment apporter de la nouveauté dans un tel système sans le perturber ? Comment le modifier en s'assurant de la cohérence du changement avec le système, déjà complexe ? Plus largement, comment concevoir un nouveau procédé, une nouvelle organisation et même un nouveau produit en usine sans perturber négativement la production ? Peut-on concevoir une innovation préservatrice ?

Cette question correspond d'abord à une pierre d'achoppement de la littérature académique. En effet, l'innovation serait avant tout destructrice selon la célèbre formule de Schumpeter, la « destruction créatrice » (Schumpeter, 1942). L'innovateur cherche une innovation assez radicale pour rendre le système existant obsolète et l'innovation indispensable ; il obtient ainsi une forme de rente le temps que les entreprises accèdent à son innovation pour être plus performantes, en même temps qu'elles mutent vers l'autre système imposé par l'innovation. Le système n'intégrant pas l'innovation devient caduc, ce qui se traduit par la mort d'entreprises, mais aussi potentiellement la destruction d'emplois, de savoir-faire, la fin de la richesse de certains territoires, etc. Il semblerait donc que l'on soit dans un dilemme entre innovation et destruction sans laisser la possibilité au couple innovation/préservation d'exister.

La typologie opposant l'innovation majeure dite « radicale », « disruptive » avec son pendant mineur « incrémentale », « marginale » ou encore « continue » semble réaffirmer le dilemme en ouvrant néanmoins la voie à un compromis possible : s'il n'y a pas d'ambition de rupture ou de radicalité dans l'innovation, ou s'il y a un risque d'être trop éloigné de l'existant, il est toujours possible de proposer un « petit » changement, presque invisible et indolore pour le système en place (Dewar & Dutton, 1986). Néanmoins, dans cette voie, il ne semble donc pas permis d'être à la fois très innovant et conservateur.

C'est pourtant cette dernière propriété qui caractérise les patrimoines de création. L'objet est apparemment en lui-même un oxymore. Il s'agit de patrimoine, au sens d'héritage et de traditions léguées par le passé qui possèdent une valeur et doivent être conservées. Cependant, le patrimoine de création a la propriété d'accepter la nouveauté, l'innovation, de rupture ou pas sans qu'elle ne vienne entraver sa dimension conservatrice. Comme déjà expliqué dans la partie 2 (revue de littérature), les patrimoines de créations ont fait l'objet de travaux récents en théorie de la conception. Ils permettent par exemple de penser la transmission des connaissances dans l'œnologie de luxe pour permettre un certain degré de générativité recherché (Carvajal perez et al., 2018). Dans le domaine de la gouvernance d'entreprise, ils permettent de donner un critère de validation pour contrôler ce qui est dans l'ordre de la mission d'entreprise ou ce qui s'en écarte (thèse de Jérémy Lévêque, à paraître). Enfin, des premiers éléments de modélisation ont été fournis par (Hatchuel et al., 2019; Leveque, 2022) et J.Lévêque. Le recours à l'objet mathématique des topos de Grothendieck permet notamment l'étude de la structure de la relation entre les objets et de son évolution possible, indépendamment des objets eux-mêmes. Cela paraît donc adapté à l'étude de la nouveauté (une nouvelle règle en usine) par rapport à « ce qui fait patrimoine » (le système de règle existant).

Questions de recherche :

QR1 : Comment modéliser l'innovation en usine et les différents types d'interaction entre la nouvelle règle et les règles actuelles ? Notamment, comment une règle peut-elle être à la fois innovante et préservatrice ?

QR2 : Quels sont les ressources, les acteurs, l'organisation et les moyens nécessaires à la conception d'une nouvelle règle (ou l'extension d'une règle existante) dans un patrimoine de création ?

Méthodologie :

Pour répondre à ces questions, le recours à la modélisation d'un système de règle compris comme patrimoine de création permet de mettre en évidence les mécanismes et résultats à l'œuvre lors de la conception d'une nouvelle règle. Deux exemples tirés de cas de situations de conception serviront ensuite d'illustration.

Exemples :

Pour éclairer la modélisation du raisonnement de conception en CK-topos, ce présent résumé reprend le cas des matelas de sécurité chez Airbus Saint-Nazaire. Le modèle permet de mettre au jour les différents types de règles qui peuvent apparaître en fonction de leur rapport avec le patrimoine.

Exemple détaillé du matelas de sécurité¹¹ : L'équipe d'Airbus souhaite améliorer la sécurité en particulier diminuer les chutes de hauteur (A). Après quelques recherches, elle propose d'utiliser un matelas (concept). Elle consulte un expert de la sécurité en usine qui lui indique que le matelas de sécurité est interdit, et que la sécurité est obtenue par des barrières infranchissables ou des harnais incassables, ainsi que des consignes et avertissements visuels, des formations et un management attentif à la sécurité. L'équipe découvre également que le matelas est interdit parce qu'il suggérerait que la première ligne de défense contre les chutes (les barrières et harnais) ne sont pas robustes, et que la chute est possible (B). Ainsi, l'équipe découvre la « catégorie » c-à-d la règle originelle qui fait patrimoine : la sécurité maximale est obtenue par une première ligne robuste à 100% complétée de moyens de préventions adaptés (C).

Les possibilités qui s'offrent à l'équipe pour faire une nouvelle solution apportant une meilleure sécurité, mais en cohérence avec les règles en place sont détaillées ci-dessus. Le schéma explicatif du raisonnement CK-topos est ajouté après le texte.

- Une première solution est d'éviter les chutes en rompant avec la tradition. Par exemple, l'équipe pourrait décider de repenser la construction de l'avion en évitant au maximum le travail en hauteur. Une branche, ouvrant la voie à de nombreuses solutions à concevoir, apparaît alors en haut de l'arbre des concepts. Cependant, cela ne permet pas de conserver le système existant. (D)
- Une deuxième voie est de rester dans la tradition, si le crible (noté dans le schéma J) qui garantit la structure de la catégorie est strict sur son interprétation. L'équipe pourrait alors par exemple choisir de renforcer la robustesse des barrières et des harnais, ou d'améliorer le management de la sécurité auprès des compagnons.ne.s. Cela lui permet de rester en cohérence avec les règles en place, sans toutefois laisser la possibilité de les faire évoluer pour améliorer la sécurité (E).
- Pour rester dans la tradition, une autre possibilité consiste à autoriser localement (c-à-d. dans un temps et un lieu délimité) une solution qui n'est pas en accord avec la règle mais fait l'objet d'une exception parce qu'elle a montré ses vertus. On entre alors dans le régime de la dérogation. Par exemple, des matelas de sécurité pourraient être acceptés exceptionnellement sur un chantier particulier de l'usine. La catégorie n'évolue alors pas, mais elle admet des variations dans un régime d'exception (F).
- Enfin, si le crible associé à la catégorie (noté J) est dit « dense », c'est-à-dire si la catégorie peut accepter des mutations sans en changer sa nature, la faisceautisation devient possible. L'équipe s'emploie alors à démontrer que le pré-faisceau appartient à la catégorie en lui donnant éventuellement une interprétation légèrement différente. Dans notre exemple, l'équipe a démontré que l'ensemble des solutions qui admettent une deuxième ligne de sécurité indépendante de la première offrent significativement plus de sécurité que la seule ligne 100% robuste. Par ce nouveau faisceau, la catégorie devient : la sécurité maximale est obtenue par un management adapté et incitatif à la sécurité, une première ligne 100% robuste ET une

¹¹ Cet exemple est également utilisé et détaillé dans l'article 2.

deuxième ligne indépendante de la première (par faisceautisation) (G). L'interprétation de ce qu'est la *sécurité maximale* change donc, tout en restant la *sécurité maximale*. Dans l'espace des concepts, cette faisceautisation ouvre la voie à une nouvelle branche innovante mais en cohérence avec le patrimoine, constituée de l'ensemble des solutions offrant une deuxième ligne indépendante de la première 100% robuste. Les matelas de sécurité sont alors validés, comme cas particulier de solution répondant à ce concept (H).

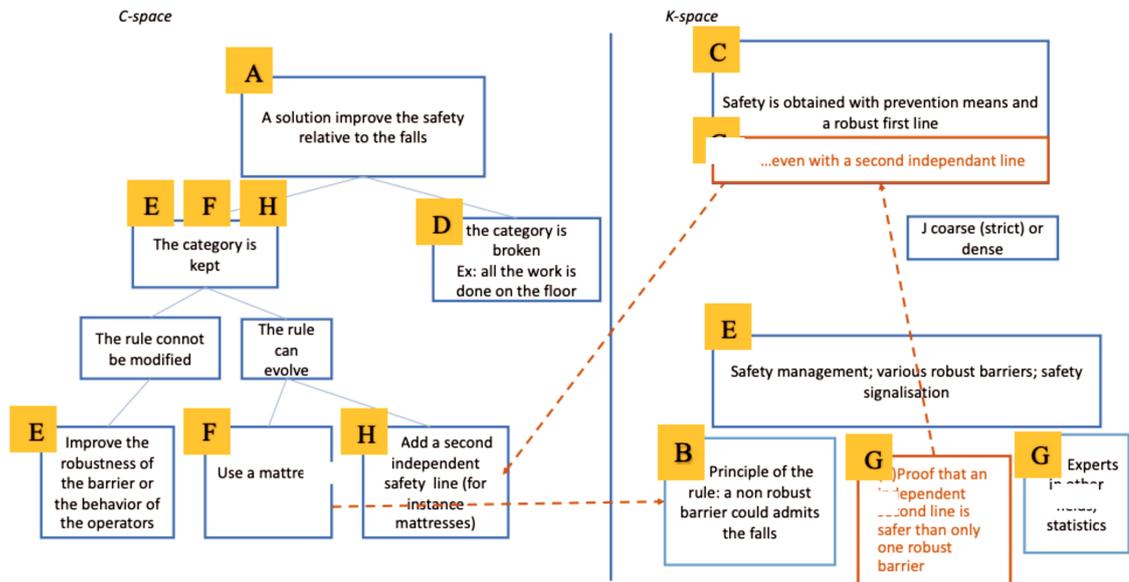


Schéma 6 : la reconception d'une nouvelle règle en cohérence avec un patrimoine de création

Lecture : les cases et les flèches en bleu sont caractéristiques de la théorie CK ; en orange elles sont spécifiques au processus de faisceautisation.

Résultats :

1. La modélisation de la création d'une nouvelle règle dans un système existant s'appuie d'une part sur un raisonnement de conception modélisé par la théorie CK, d'autre part sur la modélisation du système de règle par les topos. Cela permet de mettre à jour les mécanismes fins au cœur de la régénération d'un système de règle industriel. Ainsi, l'évolution du système de règles est permise par la faisceautisation, c.-à-d. l'acceptation d'un nouveau faisceau pour la catégorie, qui vient en enrichir le sens. Après une phase d'exploration dans l'inconnu pour trouver un concept ou une solution possible, le point d'attention dans le processus d'évolution du système réside donc dans la validation de la nouvelle règle : d'abord l'exploration attentive des règles pour en découvrir la catégorie, puis la formulation de la preuve, enfin le choix de la solution.
2. Ce processus de validation requiert des conditions pour sa mise en œuvre, que l'on peut déduire de chaque étape modélisée. L'exploration dans l'inconnu suppose des moyens classiques en conception innovante, néanmoins pas forcément attendus en usine : du temps, des acteurs réunis variés, potentiellement extérieurs à l'usine, un leader défixateur (Ezzat, 2017) etc. La

phase de validation mise en évidence dans le modèle suppose quant à elle une expertise du système de règles (ou des experts à disposition), des personnes choisies pour apporter la preuve de la faisceautisation, un comité de validation de cette preuve.

Discussion :

Cette modélisation complète d'abord la compréhension théorique des patrimoines de création appliqués jusqu'alors à d'autres domaines. Elle apporte en outre une modélisation de l'usine en tant que système de règles capable d'évolution et de régénération. En repartant d'un référentiel CK, on comprend que les topos permettent de modéliser plus finement la phase de conjonction (de K vers C) qui opère à la fin d'un processus de conception innovante lorsque l'on « tire » un nouveau concept de la base de connaissance.

De plus, ce modèle peut s'avérer utile quand il est appliqué à l'industrie 4.0. On peut comprendre plus clairement les fonctions que peuvent avoir les opérateurs 4.0 : l'évolution des règles résidera dans leur capacité à « naviguer » parmi les règles existantes pour en rechercher les règles clés, les tensions, les contradictions. Il s'agira en outre d'être en mesure de fonder la nouvelle règle par rapport au patrimoine, c'est-à-dire de trouver une stratégie de démonstration en mobilisant les ressources adéquates pour amener la preuve de la faisceautisation.

5.1.3. Compléments sur les formalismes CK-topos

Nous ajoutons ici, en complément de l'article et pour faciliter sa compréhension, un paragraphe explicatif des formalismes mobilisés dans le modèle : la théorie CK et les topos.

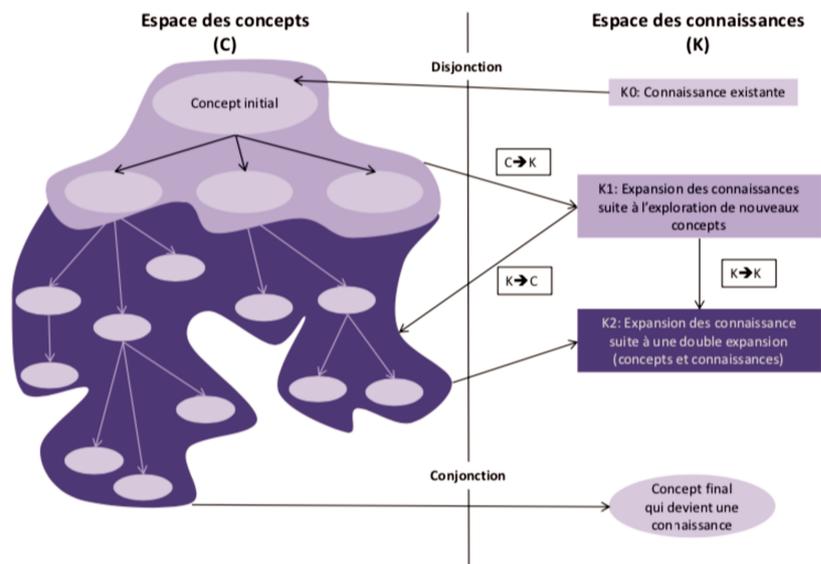
La théorie CK – rappels

La théorie CK (Hatchuel & Weil, 2003; Le Masson et al., 2017) fournit un formalisme décrivant le raisonnement de conception d'un produit, procédé, ou toute autre nouveauté, de façon générique (c-a-d. applicable à de nombreux objets) et générative (c-a-d. permettant d'accéder à des connaissances et des concepts inédits). Nous empruntons la présentation suivante de la théorie CK notamment à (Cabanès, 2017; Plantec, 2021).

La formulation de concepts nouveaux repose sur l'interaction et l'exploration entre deux espaces : l'espace des concepts (C) et celui des connaissances (K, pour *Knowledge*). Les concepts n'ont pas de statut logique : les connaissances ne nous permettent pas de dire s'ils sont vrai ou faux. À l'inverse, les connaissances disposent d'un statut logique (elles sont soit vraies, soit fausses), et regroupent un champ vaste de propositions, qu'elles soient règlementaires, scientifiques, techniques, etc. Les concepts sont K-dépendants : ils n'émergent pas *ex nihilo*, mais proviennent des connaissances rassemblées à un moment donné, tout en conservant une part d'inconnu. Présenté de façon très succincte, le raisonnement de conception repose ainsi sur la recherche de nouvelles connaissances (par expansion, opérateur $K \rightarrow K$) concernant un concept dont on ne sait pas s'il est vrai ou faux. Cette recherche de connaissances génère de nouveaux concepts (par disjonction, opérateur $K \rightarrow C$), aboutissant eux-mêmes à des sous-concepts (par partition, opérateur $C \rightarrow C$), aboutissant à de nouveaux concepts. Ceux-ci

gènèrent une nouvelle recherche de connaissances correspondantes, engendrant de nouvelles partitions, etc. L'itération s'arrête lorsqu'il y a conjonction (opérateur $C \rightarrow K$), c'est-à-dire lorsqu'un concept généré devient connaissance, acquérant par là même un statut logique. Ce raisonnement est présenté dans la figure ci-dessous. Il aboutit à une expansion conjointe et guidée de l'espace des connaissances (par les nouvelles connaissances qui ont été nécessaires à l'exploration), et de l'espace des concepts (par les nouveaux concepts générés).

Schéma 7 : La théorie CK : de la disjonction à la conjonction



source : (Cabanès, 2017)

Cette théorie permet corollairement de qualifier la nature d'une exploration et sa performance. Rester dans une voie connue correspond à l'amélioration, le raffinement, ou encore l'optimisation d'un concept initial. Au sens cognitif, c'est une « fixation » qui dépend d'un ensemble de connaissances cohérent et attendu pour le problème en question, à paradigme stable (Agogué et al., 2014). Au contraire, s'écarter d'une voie connue et générer de nouveaux concepts permet d'ouvrir de nouvelles poches de connaissances originales, et d'être davantage dans une logique d'innovation en rupture par rapport à la voie de conception communément empruntée. Dans la théorie CK, les partitions systématiques des concepts en lien avec les nouvelles connaissances permet ainsi de générer cette « défixation » vers des voies originales (Agogué, 2012; Camarda, 2017).

Pour revenir à notre problème de conception de nouvelle règle en usine, on comprend que la théorie CK peut nous aider à modéliser un raisonnement de conception en usine, et de nous aider à distinguer les voies optimisatrices des règles existantes des règles nouvelles et défixantes.

Toutefois cette théorie ne nous permet en l'état de comprendre comment on peut être innovant (concepts en défixation) tout en s'insérant dans la continuité de la production (qui inciterait plutôt à

rester dans une logique d'optimisation). À cet effet, nous convoquons un objet issu des mathématiques, les topos, que nous combineront avec la théorie CK.

Les topos et CK-topos

Objectif

Pour sortir de l'aporie entre innovation destructrice ou amélioration incrémentale, nous avons besoin d'un espace des connaissances (espace K) doté d'une structure adaptée. La théorie mathématique des topos permet justement d'appréhender des régimes d'innovation dans l'existant. Elle s'attache à décrire les conditions pour que la nouveauté soit préservatrice. Plus précisément, cette théorie permet de se doter d'un moyen de décrire ou de concevoir un évolution acceptable au regard d'une certaine tradition (Leveque, 2022).

Le but de ce paragraphe n'est pas de mobiliser des formalismes pointus mais de donner quelques éléments des topos dont on peut reprendre l'idée, pour enrichir la théorie CK de cette structure de connaissances qui nous intéresse.

Éléments d'explication

Nous abrégeons ici des explications plus détaillées et fournies de (Leveque, 2022). Les topos ont été formalisés par Grothendieck en 1957 (Grothendieck, 1957). (Prouté, 2011) donne des explications formelles et illustratives qui permettent d'en comprendre les ressorts et subtilités.

La théorie des topos repose sur la notion de catégorie. Une catégorie, notée C , est formée d'objets, par exemple X, Y, Z , (qui ne sont pas nécessairement des ensembles) et de morphismes, c'est-à-dire de liens entre ces objets.

Un topos est un type particulier de catégorie, avec sa structure (ses objets et ses morphismes, disons donc une structure ordonnée), mais également un mécanisme d'arpentage de la catégorie qui donne un moyen de valider ou non l'appartenance à la catégorie.

La topologie de Grothendieck, notée J , donne la façon d'arpenter cette catégorie. Dit simplement, selon sa nature, elle autorise ou non de rediscuter les interdépendances de la catégorie, tout en préservant sa structure.

La structure et le mécanisme d'arpentage (C, J) forment un site. Ce site accepte des pré-faisceaux, qui sont autant de descriptions possibles et locales de la catégorie C . Pour rendre ces descriptions opérantes et valides de façon générale, il faut transformer ces pré-faisceaux en faisceaux de la catégorie C , c'est-à-dire faisceautiser. Cela revient à enrichir la catégorie d'un nouveau langage de description tout en préservant sa structure. La topologie J permet d'indiquer quel degré d'interprétation de la structure est possible pour la catégorie C .

Cette topologie J peut être stricte, c'est-à-dire que pour valider le pré-faisceau comme faisceau, il faut vérifier un à un que la description proposée « colle » avec chacun des objets et des morphismes de la catégorie. Si le recollement n'opère pas, alors la faisceautisation ne s'opère pas, et la catégorie n'intègre pas un nouveau régime de description. On reste dans la « tradition ». Il faut éventuellement concevoir une nouvelle catégorie pour accepter cette description, dans une logique de destruction. J

peut également être dense, c'est-à-dire introduire une nouvelle description partiellement inconnue (le préfaisceau), mais introduire une condition restrictive de recollement pour qu'elle préserve la catégorie. Une topologie J dense peut encore opérer sur une description avec de l'inconnu mais sans contrainte, en révisant l'interprétation de la catégorie et en la retravaillant, tout en conservant sa structure. D'autres topologies (coarse ou canoniques) existent mais sortent de notre champ d'investigation direct.

Exemple

Pour illustrer notre propos, nous reprenons l'exemple de (Hatchuel et al., 2019) en le précisant.

Dans la gastronomie, un plat est composé d'une sauce et d'une viande. En termes de catégorie, on peut l'écrire : sauce \rightarrow viande. La catégorie « plat » a donc deux objets (la sauce et la viande) et un lien ordonné entre les deux : la viande ne peut pas exister sans sauce, mais la sauce peut se suffire à elle-même.

Si l'on propose un nouveau type de plat, le « plat végétarien » qui est alors un préfaisceau, une topologie J stricte nous dirait : « la sauce peut être végétarienne, mais la viande n'est pas végétarienne, donc un plat végétarien n'est pas un plat ». (c'est la tradition). Une nouvelle cuisine végétarienne devra être créée, et ne s'appellera pas « plat ». J peut aussi être « dense » : d'abord en acceptant par exemple une contrainte locale. La catégorie plat ne change pas, mais accepte la mention « plat végétarien » s'il n'y a pas de viande. On est dans le régime de la dérogation, et la catégorie n'a pas changé. Une autre façon d'être « dense » et de permettre la faisceautisation est d'accepter de rediscuter ce qui est de la viande. Par exemple, elle pourrait accepter beaucoup de plats sans viande mais avec un composant qui « fait viande » : par exemple, en composant des aliments dont la texture et l'allure du plat, l'apport protéiné, ou encore l'apport gustatif sont équivalents à la viande. Cette faisceautisation valide donc le plat végétarien comme « plat » de façon générale, et ouvre de nombreuses possibilités au plat végétarien.

Les topos permettent donc de donner un critère de validation, et surtout un statut à des situations qui sortent d'un jugement binaire (cela relève de la catégorie ou n'en relève pas ; il faut suivre la tradition ou la rompre). Cette branche des mathématiques nous apprend qu'il est possible d'enrichir une catégorie en en concevant de nouvelles interprétations. On comprend ainsi que « l'innovation dans la tradition » est permise, dans une logique de patrimoine de création.

5.1.4. Compléments

1. Modélisation de la règle, le système de règles, et sa gestion

Cette modélisation permet également de revenir sur la notion de règle, et de son rapport avec la conception. Le système de règles en usine sous-tend la production et en garantit ses performances et sa robustesse, mais sa gestion reste allusive : soit parce qu'il y a du « jeu » autour de la règle, qui est dans les faits entourée d'un certain flou ou d'une capacité adaptative (E. Reynaud & Reynaud, 1994) ; soit parce que quand la conception de nouvelles solutions se heurte au système de règles, il faut parfois

le réviser. L'usine n'a a priori pas cette prérogative : il n'est pas demandé ni permis à l'opérateur.rice de changer la règle mais seulement de l'appliquer en l'adaptant au mieux.

Or, la question de la règle en elle-même et de son évolution, est indissociable de la gestion du système de règles et du régime d'actions associé. On pourrait par exemple poser que la règle est un élément dans un ensemble plus large, ou une proposition en connaissance, sur lequel on peut agir de façon discrète. Les actions associées pourraient être : « on supprime l'élément gênant la conception », « on supprime l'élément et on le remplace », ou « on complète l'élément », ou encore « on le considère comme immuable et on conçoit sous contraintes, en s'appuyant dessus », mais aussi « on conserve l'élément et on lui change son sens ». Ces actions de paramétrage du système de règles sont autant de problèmes de gestion quand se posent les questions : qui doit-on aller voir pour changer la règle ? À quelles conditions ? Pourquoi la nouvelle règle fait-elle partie du système de règles ? Comment peut-on le démontrer ?

La modélisation CK-topos et la révision des règles par faisceautisation s'avèrent utile pour rendre compte de cette gestion du système. La représentation de la règle comme catégorie qui peut évoluer permet de mettre en lumière précisément ce moment où le sens de la règle bascule et ce qui s'y joue au niveau des actions et des acteurs.

2. Modéliser la gestion de l'évolution

Le recours à la modélisation toposique du système de règles permet d'ouvrir et de structurer un éventail de possibilités transformatrices du système de règles, et de dépasser l'opposition précédemment évoquée entre tradition et innovation. Deux modalités de conception s'ajoutent au cadre existant, en fonction du rapport à la règle envisagé. La première est de rester dans la tradition mais d'admettre localement des exceptions. C'est le régime dérogatoire, qui nécessite tout de même en amont d'avoir suffisamment exploré le système de règles pour repérer les règles qui font l'objet de la dérogation. Ça aurait été le cas du matelas de sécurité d'Airbus, si les responsables de l'usine avaient, tout en reconnaissant son interdiction dans le cas général, validé son utilisation sur certains travaux, pendant une certaine durée.

La deuxième modalité de conception qu'ouvre la structure toposique du système de règles est la validation par « faisceautisation ». Cette modalité retient l'attention sur deux points :

- D'abord elle permet de valider l'évolution de la catégorie – ici, la règle faisant obstacle- tout en conservant la cohérence avec le système de règles. Ainsi, la faisceautisation permet à la règle faisant catégorie à la fois de rester la même, cohérente avec le système, et en même temps de faire évoluer sa compréhension, en lui donnant un autre sens dont on a démontré sa pertinence en regard du système de règle en place. Du point de vue de la règle, il y a donc « innovation dans la tradition » ; pour cela, l'exploration dans le système de règles pour retrouver la catégorie, et la démonstration de la pertinence du pré-faisceau qui devient faisceau requiert une certaine ingénierie au service de la règle et de son rapport au système de règles.

-Ensuite, le résultat de la faisceautisation est plus général que la conception d'une solution particulière. En modifiant la compréhension de la règle, la faisceautisation valide l'ensemble des

nouvelles solutions (quelle que soit leur nature) qui respecte cette nouvelle modalité. Dans le cas des matelas Airbus, le travail mené sur la règle permet désormais de considérer les matelas comme une solution acceptable parmi de nombreuses autres

5.2. Article 2 : La mise en évidence d'un régime de conception à prescription extensive

5.2.1. Tableau de synthèse

Titre (traduit de l'anglais)	La conception innovante en production à l'usine Airbus de Saint-Nazaire
Auteur.rice.s	Honorine Harlé, Sophie Hooge, Pascal Le Masson, Kevin Levillain, Benoit Weil, Guillaume Bulin, Thierry Ménard
statut	Publié dans Research in Engineering Design (18 janvier 2022)
résumé	L'usine n'est habituellement pas considérée comme un lieu de conception mais plutôt au prisme de sa fonction d'exécution de la prescription qui rend la production possible. Toutefois, à travers des astuces, du bricolage, et des méthodes usuelles de résolution de problème en usine, les opérateur.rice.s conçoivent afin d'optimiser la prescription. Cependant, ce type de conception se fait dans le cadre de la règle et il paraît difficile de concevoir de façon innovante de nouvelles règles. La présente étude de cas met en lumière des cas de conception qui ont permis de faire évoluer le système de règles de l'usine. L'article s'appuie sur 30 cas d'amélioration continue menés à l'usine d'Airbus de Saint-Nazaire entre 2013 et 2018. Ils font l'objet d'un codage, d'une étude quantitative puis qualitative à travers deux exemples emblématiques de ces projets. Deux régimes de conception concomitants sont distingués, avec des effets différents sur le système de règles ainsi que sur la robustesse des solutions conçues.
Connaissances actuelles et limites	Un ensemble de pratiques et outils utilisés en production permettent d'adapter ou d'optimiser la prescription. Ces pratiques particulièrement mises en avant dans le toyotisme et les mouvements participatifs : chaque personne est susceptible d'améliorer la production par de la résolution de problème simple. L'utilisation de méthodes de conception innovantes et de résolution de problème complexes ne semble pas aller de soi en usine où l'innovation peut être vue comme dangereuse pour la production dans un monde complexe et très contraint. La littérature permet de donner 16 critères de conception qui caractérisent la conception à prescription fixe d'une part et celle à prescription évolutive d'autre part.
Questions de recherche	QR1 : quel est le niveau de performance de chacun des régimes, et comment co-existent-ils ? QR2 : Quelles sont les conditions d'existence du deuxième régime de conception ?
Méthodologie et matériau empirique	Étude de cas longitudinale basée sur l'analyse de 30 projets d'amélioration continue à l'usine d'Airbus de Saint-Nazaire ; Les 30 cas sont passés au crible des critères de conception, et d'une analyse quantitative ; 2 exemples illustrent les régimes de conception

résultats	R1. Les deux régimes de conception existent et co-existent au sein de l'usine. Le deuxième régime de conception existe malgré les contraintes inhérentes à la production. Il permet de faire évoluer le système de règles et a des résultats plus robustes. R2. Des ressources proches de celles de la conception innovante sont nécessaires, même si elles ne vont pas de soi en usine : du temps pour les projets, des personnes issues de la production disponibles, des capacités de prototypage, d'expérience et d'itération etc.
Discussion	L'approche en termes de patrimoine de création permet d'éclairer ce régime à prescription évolutive dans sa capacité à générer des nouvelles règles robustes (et non plus simplement innovantes) et cohérentes avec le système de règles en place. L'opérateur.rice est alors concepteur du système de règles et de son évolution, ce qui va au-delà de la participation à la définition de ses tâches, mais nécessite des compétences particulières en conception et de la disponibilité.

Tableau 10 : synthèse de l'article 2

5.2.2. Résumé développé

L'industrialisation d'un produit n'est pas entièrement prescrite par le bureau d'études et des méthodes : il reste à l'usine le soin d'adapter les règles, ou de les optimiser. Pour l'avion A320 d'Airbus, dont les plans ont été faits dans les années 1980, cela est d'autant plus vrai : les cadences, les normes, les outils ont changé, l'usine a dû s'adapter pour concevoir de nouvelles solutions pour répondre aux nouvelles exigences notamment dans le cadre de l'amélioration continue. Cependant, quand les contraintes de production s'infléchissent plus fortement (augmentation forte des cadences, nouvelles exigences en matière de qualité ou d'ergonomie) la simple adaptation de l'usine est-elle suffisante ?

La littérature rappelle que les principes et outils d'amélioration continue font partie intégrante du toyotisme dès les années 1950 puis du lean management. Ces doctrines engagent à soutenir une production « juste à temps » (à coût de production et stock minimal), notamment en mettant en œuvre des principes de maintenance productive totale ou de qualité totale. Pour cela, l'implication de tou.te.s les opérateur.rice.s est tournée vers l'amélioration des performances et la réduction des gaspillages (Iwao, 2017). Un ensemble d'outils et de méthodes sont à disposition pour cela : outils statistiques, méthodes de résolution de problème, valorisation des astuces, organisation du travail en groupe plus ou moins autonomes etc. Ces outils participatifs permettent de résoudre des problèmes bien identifiés et courants en production avec outils « prêts à l'emploi » et des solutions directement applicables. Ces doctrines productives largement diffusées valorisent donc fortement la conception sur la ligne de production mais une conception extrêmement contrainte pour optimiser la règle, et faire de la résolution de problème simple (Knol et al., 2018).

D'un autre côté, il existe des situations où la résolution de problème simple n'est pas suffisante, et il faut engager une démarche de conception plus approfondie et systématique pour répondre à la question posée (Schön, 1990). Ainsi, des méthodes de résolution de problèmes complexes existent (par exemple TRIZ (Shirwaiker & Okudan, 2006)). Cependant, le caractère innovant et génératif de leurs solutions pose question en usine au regard de la stabilité du système de règles en place. De plus, en termes d'organisation et de moyens mis à disposition, les méthodes de projet innovant, généralement l'apanage des ingénieurs et designers de métier, ne sont pas nécessairement attendues dans un univers productif contraint en termes de temps, d'espace, et de types d'expertises. Les théories et méthodes de la conception permettent de distinguer deux grandes classes de projets avec deux résultats différents attendus en usine sur le système de règles. La solution est soit inscrite dans le système de règles, soit

étend le système en y ajoutant de nouvelles règles ou en en changeant le sens (Le Masson & Weil, 2010).

Ainsi, pour exhumer et caractériser chacun des types de conception dans l'environnement productif, l'article propose une grille de 16 critères de gestion connus et caractéristiques du type de conception d'un projet (généralement réglée ou innovante) tirées de la littérature. Ces critères ne se veulent ni exhaustifs, ni exclusifs les uns aux autres, mais tentent de couvrir l'ensemble des facettes d'un projet, selon 4 dimensions : la formulation du problème, la constitution du collectif, la recherche de la solution, la mise en œuvre de la solution. Cette grille permet de trier les projets d'amélioration entre deux grands types, le premier classique au sens de la conception en usine, le deuxième s'apparentant plus à de la conception innovante et en prenant les atours. Ils seront appelés par la suite « régime » de conception. L'un est à prescription fixe, l'autre est à prescription évolutive.

Cependant, la littérature est silencieuse sur les résultats et conditions d'existence de ces régimes de conception en usine.

Questions de recherche

QR1 : quel est le niveau de performance de chacun des régimes, et comment co-existent-ils ?

QR2 : Quelles sont les conditions d'existence du deuxième régime de conception ?

Méthodologie

Au travers d'une étude de cas sur la conception à l'usine d'Airbus à Saint-Nazaire, une enquête longitudinale de 5 ans a été menée sur 30 projets d'amélioration continue de taille hétérogène. Un des auteurs praticien collectait le matériel empirique en même temps qu'il participait aux projets, et en rendait compte aux chercheurs impliqués à intervalle de temps régulier (tous les 6 mois environ) lors de réunions à Saint-Nazaire. Les cas ont par la suite été codés un à un avec la grille des 16 critères par le praticien chercheur et la doctorante, après entretiens sur ces cas, appels téléphoniques et consultation de matériel complémentaire utilisé pour les cas (présentations power points pour la validation des solutions par la hiérarchie de l'usine par exemple). Les cas ayant strictement plus que la moitié des critères (c.-à-d. au moins 9 critères) d'un même régime ont été considérés comme émanant dans leur globalité de ce régime. Un critère de performance a été ajouté pour chacun des cas, qui consistait en la durabilité de la solution (moins d'un an, plus d'un an). De plus, deux cas emblématiques de chacun des régimes de conception ont été choisis pour rendre la grille compréhensive, et illustrer le régime de conception et le type de résultat obtenu.

Après avoir codé les cas, le tableau suivant a été obtenu ; des tests statistiques ont été menés pour vérifier l'homogénéité des régimes de conception, et la corrélation du type de régime avec le résultat de conception (ici : la longévité des solutions).

crit.	3	5	7	10	12	14	17	22	23	28	29	30	1	2	4	6	8	9	11	13	15	16	18	19	20	21	24	25	26	27
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	
2	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
4	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	
13	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	
15	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
succ	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	

Tableau 11 Les 30 cas en fonction des 16 critères de conception et de performance.

Lecture : Les « 1 » sont en jaune et correspondent au régime 2. Les « 0 » sont en bleu et correspondent au régime 1

Deux exemples emblématiques ont été choisis pour illustrer chacun des régimes de conception.

Dans le premier exemple représentatif de la conception à prescription fixe, il s’agit de trouver une solution pour partager les outils sans les perdre. Les outils peuvent parfois tomber ou se perdre en production, ce qui présente un danger pour la phase d’exploitation de l’avion. De plus, les boîtes à outils de l’équipe du matin ne sont pas mises en commun avec l’équipe du soir, si bien que la moitié des outils n’est systématiquement pas utilisée. Les compagnon.e.s des deux équipes se sont réuni.e.s pour décider de la solution à apporter. Il a été décidé que la caisse à outils serait désormais partagée entre les deux équipes, et que toute perte d’outil entraînerait l’arrêt de l’équipe entière pour le retrouver. La solution a rapidement été abandonnée : en effet, les équipes prirent du retard, ne retrouvaient pas les outils perdus et s’accusaient mutuellement de les avoir perdus.

Dans le deuxième représentatif de la prescription évolutive, le projet consistait à éviter les accidents graves provenant de chutes de hauteur. Pour réduire les accidents de chute de hauteur qui entraînent souvent des accidents graves, un atelier de conception a été lancé par une équipe variée comprenant notamment des compagnon.e.s, des managers, des responsables de santé sécurité de l’usine, des ergonomes. A la fin du premier atelier, il advint que la voie classique était de renforcer le système de sécurité existant et déjà aux normes, c.-à-d. de mettre des barrières ou harnais plus robustes, de mieux former les compagnon.ne.s et de renforcer la signalisation là où les chutes étaient possibles. Une deuxième voie possible consistait à ajouter des matelas de sécurité pour éviter les chutes graves. Cependant, les experts en sécurité de l’usine de Saint-Nazaire avertirent que ces matelas étaient interdits dans la législation de sécurité de l’usine. S’en est suivie la poursuite de l’atelier de conception, avec un travail d’exploration des connaissances à l’extérieur de l’usine auprès d’acteurs connus pour « ne pas avoir droit à l’accident » : la rencontre avec un pilote de ligne, puis la visite d’une centrale nucléaire. L’ensemble de l’équipe découvrit (ou re-découvrit pour certains) alors deux types de connaissances. D’abord, la redondance (la deuxième ligne de défense indépendante de la première), qui constitue à la fois un des principes fondamentaux de construction et de pilotage d’un avion, mais aussi un des principes de sécurité de construction et de fonctionnement des centrales nucléaires. Ensuite, l’équipe (re)découvrit la différence entre conformité aux normes et garantie de la sécurité. Reprenant à son compte ces connaissances pour les chutes de hauteurs dans l’usine de Saint-Nazaire, l’équipe fit les calculs de probabilité et démontra que les matelas de sécurité permettaient d’éviter de

réduire la probabilité d'accident grave de 80%. Cette preuve a permis de valider la solution des matelas qui furent alors adoptés dans l'usine, en faisant évoluer la règle sur la sécurité du travail en hauteur.

Résultats :

Cet article démontre que les deux régimes de conception co-existent sans nécessairement être en concurrence. Le régime de prescription fixée permet d'optimiser le système existant tandis que le régime de prescription extensive a la capacité d'étendre les règles de l'usine. Ce dernier est notamment utile pour explorer les grandes questions adressées à l'usine, ou les problèmes qui n'ont pas trouvé de solution. Le régime à prescription fixée conserve toute sa valeur pour des solutions qui n'ont pas besoin de repousser les limites de la prescription, par exemple pour des problèmes connus, des mises en œuvre rapides et sans suivi, des axes d'amélioration classiques, connus et dont la pertinence n'est pas à démontrer.

Le cas Airbus montre également que les conditions et ressources pour permettre au régime de conception à prescription extensive d'exister ne sont pas aisées à rassembler en usine ; dans le cas Airbus, les managers avaient le soutien explicite de la direction de l'usine pour entreprendre des explorations et expérimentations en production. D'autres ressources étaient mobilisées. Elles étaient à la fois non surprenantes du point de vue des méthodes de conception innovante, mais spécialement aménagées dans l'usine de Saint-Nazaire pour ces projets. On peut citer par exemple : le temps des projets qui pouvaient durer plusieurs mois, des équipes disponibles pour les mener, comprenant des compagnons tirés de leurs tâches habituelles le temps des réunions, un espace spécial a été aménagé avec des capacités de prototypage rapide. En outre, la présence d'une personne habituée à la conception innovante qui a joué le rôle de leader défixateur (Ezzat, 2017) a permis aux projets de gagner en puissance d'exploration et en robustesse.

Discussion et conclusion :

Par rapport aux résultats connus de la conception innovante, il apparaît que l'impératif d'innovation et de générativité est en usine remplacé par celui de la robustesse et de la capacité à s'accorder avec le système de règle en place. Cela permet d'envisager la production comme un patrimoine de création qui doit gérer la tension entre conserver le système de règles en place et permettre son évolution.

Cette recherche contribue également au débat sur la définition de l'opérateur.rice en industrie 4.0. Plus qu'une participation à la définition de ses tâches ou à l'ergonomie de son poste de travail, l'opérateur.rice est ici concepteur.rice de règles nouvelles pour le système de production.

5.2.3. Compléments

Cet article a été le premier rédigé dans le cadre de cette thèse. Nous pourrions aujourd'hui l'écrire de façon différente. Nous sommes arrivés dans l'usine avec les lunettes de la conception innovante. Notre surprise et notre preuve portaient sur l'arsenal conceptif a priori non adapté au milieu productif mais plus attendu dans un écosystème d'innovation de produits par exemple. Pourtant, déployé pour des projets d'amélioration continue en usine, il produisait des résultats spectaculaires : arriver à trouver une règle pertinente qui vient répondre au problème, et la mettre en œuvre de manière durable. Aujourd'hui, nous aurions sans doute porté nos étonnements et notre enquête avec une focale

légèrement différente : la façon dont ces équipes ont validé leur projet, leurs difficultés dans cette tâche, le rapport au processus de validation des projets d'Airbus.

1. Suppléments empiriques sur la révision de la prescription :

Cet article met en lumière la question de la révision de la prescription : dans les cas de conception à prescription extensive, l'effort de conception portait non seulement sur la recherche d'une solution qui n'existait pas jusqu'alors, mais aussi sur la validation de la solution. Or, c'est par les mesures, les tests itératifs, les consultations d'experts que les équipes des projets ont pu se confronter au système de règles, le révéler, et dévoiler les éventuelles limites et contradictions.

Plusieurs exemples, tirés de cette recherche chez Airbus, peuvent étayer notre propos. En plus du projet des matelas de sécurité, nous ajoutons ici deux exemples qui ne sont pas développés dans l'article.

- Dans le cas des matelas de sécurité, une fois la solution des matelas envisagée, c'est la mise en œuvre et la validation à l'aide d'experts qui ont révélé cette règle de l'unique ligne de défense 100% robuste. C'est à ce moment qu'a commencé la documentation, la recherche de la preuve, etc. Cet exemple est d'ailleurs repris pour illustrer le mécanisme de faisceautisation dans l'article 1.

- Dans un projet, les problèmes de qualité en production étaient gérés trop lentement par un processus élaboré (contenant plusieurs étapes) sûr, et obligatoire de proposition et certification de solutions alternatives par le BE. Ce processus était saturé. L'amélioration du flux de traitement de ces problèmes aurait pu passer par l'amélioration de la vitesse de traitement de chacune des étapes du processus. Au contraire, l'équipe était constituée de personnes extérieures au service qualité qui a entrepris de comprendre le processus et ses règles, en mesurer l'efficacité, et observer les pratiques réelles. Ils ont pu mettre à jour que nombre de problèmes de qualité étaient courants et répétitifs, identifiés directement par le.a compagnon.ne, qui connaissait d'avance la solution certifiée qui allait être proposée. Cependant dans un tel cas, les nombreuses étapes du processus qualité devaient être terminées avant de pouvoir rectifier l'erreur sur l'avion. Dans ces cas précis, et a priori contre la règle en vigueur, l'équipe a décidé de permettre de mettre en œuvre la solution supposée, puis d'attendre la certification qui était alors réduite à une étape de validation de solution courante pour des problèmes connus. Cela a permis de désengorger l'ensemble du processus qualité, mais aussi de rendre les compagnon.ne.s expert.e.s non seulement de leur geste mais aussi de la variété des problèmes qualité pouvant advenir. Surtout, cela a rendu à du « hors process » acceptable dans certains cas identifiés, et après en avoir produit la démonstration documentée et chiffrée. Alors que l'autocontrôle est une pratique connue en qualité, elle était absolument prohibée pour ce processus, en raison d'un niveau de qualité très haut exigé pour les avions. Mais même dans ce cas de norme très stricte, l'équipe a démontré qu'un processus plus court était possible sans nuire à la qualité finale et reposait sur l'initiative du.de la compagnon.ne avant la certification (sans toutefois appliquer l'autocontrôle au sens strict).

- Dans un troisième exemple de projet d'amélioration (voir aussi le cas Flextrack dans (Gilain, 2021)), une équipe a été constituée pour robotiser une opération de perçage sur le fuselage de l'avion. Lorsque le meilleur robot a été choisi, un plan de financement a été établi avec notamment une estimation de coût par trou percé. Le projet ne pouvait pas être validé parce qu'il ne correspondait pas aux critères

économiques de l'usine. Au lieu de l'abandonner comme aurait dû impliquer un business plan défavorable, l'équipe a commandé un prototype afin de tester le robot, mais également de l'améliorer, d'en découvrir des aspects non visibles sur son utilisation par les compagnons, sa vitesse réelle, ses éventuels défauts, son adaptation à la tâche, son potentiel pour d'autres zones de perçage, etc. Un an plus tard, le plan de financement a été refait, les estimations de coût par trou percé avaient diminué, de même que l'incertitude liée à ces estimations. Dans le même temps, le seuil économique d'acceptation de l'investissement avait diminué, et le robot a pu être commandé et est utilisé depuis. Dans ce cas, la règle d'abandon du projet lorsque le plan de financement est défavorable a été nuancée par la possibilité de prendre un prototype afin de refaire le plan de financement avec plus d'informations. Ce prototype a également permis la mise en place d'une activité de conception innovante autour du robot qui a permis d'avoir une meilleure solution grâce à une investigation expérimentale du problème et des résultats de perçage du robot.

2. Compléments sur la performance de la conception et la validité de la solution : des solutions robustes et adaptées au système de règles

Dans l'article, la performance des projets se mesure en termes de longévité. Après relecture de notre cas, il nous semble important de souligner la différence qui se joue entre la théorie de la conception en toute généralité et la conception en usine, qui se heurte au système de règles et qui doit le réviser. L'article 2 souligne l'importance de la robustesse de la solution comme performance de la conception. Nous pouvons à présent détailler : la conception qui a abouti et a tenu longtemps est aussi celle qui a prouvé qu'elle s'intégrait bien dans le système de règles. D'une certaine façon, nous pouvons remarquer que la solution était robuste parce qu'il avait été prouvé (dans la conception) que le système de production serait lui-même robuste au changement.

La nature et la méthode de l'activité conceptrice elle-même expliquaient ce résultat : la démarche itérative, les expérimentations, les mesures et contrôles dans le temps de la solution permettent de vérifier sa validité dans un ensemble large de conditions particulières qui ne pouvaient se dévoiler que progressivement – et parfois tard – dans le processus. Cette explication est peu surprenante en soi ; elle est d'ailleurs un résultat de la théorie de la conception sur les POC (proof of concept). Un POC est à la fois la validation ou non d'hypothèses connues mais au résultat incertain, mais aussi le vecteur d'exploration et de révélation de l'inconnu, c'est-à-dire de tout ce qui n'est pas visible ni connu au moment de la conception de la solution (Jobin, 2022). Dans le cas de l'usine, une des caractéristiques de cette période de test est la validation de la solution par rapport au système de règles, ce qui revient à le révéler progressivement à démontrer que la nouvelle solution est cohérente avec la prescription en place.

Si les deux régimes de conception co-existent en usine, une contribution majeure du régime de conception à prescription extensive découle de notre discussion : ce type de conception est nécessaire quand le système de règle achoppe, est incohérent, où se contredit en ses termes : pour déterminer précisément où sont les limites et pour fournir la démonstration rigoureuse d'une règle « meilleure » pouvant adhérer à la prescription en place.

3. Complément sur les ressources pour la reconception du système de règles : les moyens et méthodes pour arpenter le système de règles et prouver la validité de la solution

Nous pouvons revenir sur les acteurs et leur formation nécessaire. Dans notre cas, un des acteurs marquants a été le manager de projets. Pendant son début de carrière passé au bureau d'études d'Airbus à Toulouse, il s'est intéressé aux questions de conception et plus particulièrement aux méthodes de la conception innovante. Il est à cette occasion devenu peu à peu expert en théorie CK, et s'est approprié au fil de son expérience professionnelle la méthode KCP (Le Masson et al., 2009) pour des projets d'ingénierie. Arrivé à l'usine de Saint-Nazaire, il a participé aux projets, dans lesquels il a pu mettre les équipes en position de concepteur.rice.s, jouant lui-même un rôle proche du « leader défixateur » (Le Masson et al., 2009): il a mis ses équipes en capacité de découvrir d'autres concepts différents du dominant design, c'est-à-dire à trouver des voies différentes voire originales de résolution de la solution par rapport aux solutions habituelles proposées. Pour cela il allait chercher des exemples défixants potentiellement à l'extérieur de l'usine, comme la visite du système de sécurité d'une centrale nucléaire pour découvrir le concept de lignes indépendantes. Il a également formé les équipes à la défixation par des petits ateliers, ainsi qu'à la mise en concept plutôt qu'à la recherche de solutions finies, ainsi qu'à la théorie CK. En expert de la conception innovante, il a également amené les équipes à avoir des questionnements, une démarche d'expérimentation, un recul sur les résultats etc. Ainsi, les équipes formées de managers, spécialistes ou opérateur.rice.s expert.e.s de production, ont reçu une formation à la conception innovante, qui a permis, en plus de motiver et d'impliquer les personnes, d'atteindre les performances escomptées.

Désormais, nous pouvons spécifier ce rôle de leader et formateur : il ne suffisait pas seulement de faire des solutions originales mais aussi productivement efficaces. Il ne fallait pas expérimenter la solution, mais repérer où la prescription pouvait s'y opposer. Il ne s'agissait pas seulement de trouver que la solution était bonne mais la rendre compatible avec la prescription, en faisant évoluer à la fois la solution et la prescription. Nous pouvons ainsi décrire plus finement le rôle essentiel mené par ce praticien : il a orienté et outillé la navigation dans l'espace des règles et géré son expansion.

5.3. Article 3 : que révèle la boîte à idée d'un centre de maintenance SNCF ?

5.3.1. Tableau de synthèse

Titre (Traduit de l'anglais)	Que révèle la boîte à idées de l'usine ? Une analyse des capacités conceptrices d'un centre de maintenance de trains à partir de son système de gestion d'idées
Auteur.rice.s	Honorine Harlé, Pascal le Masson, Benoit Weil, Tony Boulier, Yann Veslin
statut	Envoyé à Creativity and Innovation Management (juillet 2022, en attente de réponse)
résumé	Les boîtes à idées sont utilisées en usine pour améliorer la production à partir des suggestions des opérateur.rice.s. Outil très ancien de gestion des idées courant en usine, son principe a été largement répandu et étendu à d'autres domaines pour avoir de nouvelles idées et lancer de nouveaux projets ou produits. Cependant, en usine, ces boîtes sont employées pour récolter des solutions ou des astuces dont la mise en œuvre est immédiate. Pourtant, cet article offre à voir la boîte à idées d'un centre SNCF de maintenance de TER qui révèle une ingénierie au service des idées permettant de raffiner les idées, d'en vérifier le rapport à la prescription, ou encore

	de mobiliser des partenaires sur des nouveaux projets. A l'aide d'une analyse qualitative de 132 fiches-idée et des règles nationales encadrant précisant les conditions de la gestion de cet outil, une activité de conception spécifique apparaît et est décryptée, dans sa nature et ses conditions.
Connaissances actuelles et limites	Les boîtes à idées ont été utilisées en usine dès le 19 ^{ème} siècle, et ont été mobilisées pour améliorer la production à la fois pour améliorer la production et pour impliquer les opérateur.rice.s. Elles souffrent de plusieurs problèmes : abandon de l'outil, solutions inadaptées et améliorations seulement marginales qui ne peuvent transformer significativement la production. En usine, les boîtes ne filtrent que les idées directement applicables, contrairement à d'autres domaines où les solutions proposées sont retraitées, re-travaillées, et développées avant de voir le jour. Cela s'explique notamment par le caractère extrêmement contraint de la production c-à-d l'impératif de respecter la prescription en place et d'éviter les perturbations.
Questions de recherche	RQ1 : Quel est le critère adapté à une boîte à idées d'usine pour trier, différencier, et valider les idées afin de favoriser l'innovation dans l'atelier ? RQ2. Existe-t-il une façon de traiter les idées non abouties pour l'usine qui soit pertinente pour la production ? Quels moyens cela requiert-il ?
Méthodologie et matériau empirique	Analyse de 131 idées du centre de maintenance SNCF de TER de Nantes. Classement en fonction du type d'idées (avec ou sans design gap), avec étude des idées et des commentaires associés étude qualitative des règles nationales de la boîte à idées.
Résultats	R1. Mise en évidence d'une étape de conception supplémentaire pour les idées qui ne sont pas directement applicables, qui réside dans la finalisation des idées et dans la validation de leur conformité avec la prescription ; R2. Une ingénierie est nécessaire pour cela, ce qui mobilise des ressources matérielles (capacités de prototypage, temps, salle de réunion...) et humaines (opérateur.rice.s formé.e.s à la conception, experts techniques, connaissances de la prescription etc).
Discussion	Souligne que l'usine est un espace contraint mais dans lequel beaucoup d'idées de nature très différentes co-existent (de l'astuce au grand projet de long terme, en passant par la résolution de problème complexe). Enrichissement des oppositions entre amélioration continue et rupture, ou encore entre exploration et exploitation : l'activité de conception révélée et l'éventuelle exploration est ici au service du maintien du système de règles ou de son évolution. Rendre visible cette activité conceptive donne l'opportunité d'améliorer l'ingénierie associée et d'ouvrir l'usine à des ressources et connaissances extérieures.

Tableau 12 : Synthèse de l'article 3

5.3.2. Résumé détaillé

La littérature montre que les boîtes à idées sont historiquement un outil au service de la production, au moins dès le XIX^e siècle, chez Eastman Kodak (Carnevale & Sharp, 1993). Leur mise en place se répand avec les mouvements d'amélioration continue propre au système japonais dès les années 1950 puis au Lean Management dans les années 1980 (Moica et al., 2018; Recht & Wilderom, 1998). L'enjeu réside dans la récolte des idées du personnel au plus près de la ligne de production : c'est là que les problèmes et pertes adviennent, et les opérateur.rice.s sont les mieux placé.e.s pour les détecter et

apporter des améliorations. Cela permet à la fois d'espérer des gains de performance, mais aussi de stimuler démocratiquement l'implication du personnel dans le résultat global de l'entreprise. Cependant, la boîte à idées connaît différents problèmes lors de sa mise en place, et ses résultats ne sont pas toujours positifs. Par exemple, elles peuvent être utilisées puis petit à petit abandonnées, par oubli ou désintérêt (Buech et al., 2010). La fixation des récompenses associées aux idées est également un sujet de débat (Fairbank & Williams, 2001). Enfin, elles n'autorisent en usine que des gains marginaux (Carrier, 1998). Cela vient notamment du fait que les boîtes à idées filtrent les idées directement et rapidement applicables en production, sans faire appel à d'autres développements, expertises ou connaissances que celles déjà présentes en usine et dans la tête de l'opérateur. (Neagoe, 2009). Pour les autres idées, non directement transformables en solution, et potentiellement plus originales, un procédé différent est nécessaire et peut être mis en place, notamment pour les boîtes à idées concernant la conception de produits ; ainsi les idées mêmes non-abouties et très innovantes sont étudiées et le cas échéant abouties en s'appuyant sur les méthodes de la conception innovante (Herrmann et al., 2020). Toutefois, en usine, la vocation des boîtes à idées n'est pas de rechercher des solutions très nouvelles et éloignées de l'existant : cela serait très difficile à mettre en œuvre dans un système productif déjà en place, voire dangereux pour la stabilité du système. De plus, il n'existe généralement pas de moyens dédiés à la génération de projets innovants par les opérateurs, dont le temps et les compétences sont dédiés aux objectifs de production à remplir. Ainsi, les boîtes à idées d'usine ne seraient pas radicalement innovantes (Carrier, 1998).

Pour valider cette hypothèse, deux questions de recherche vont guider l'enquête :

RQ1 : Quel est le critère adapté à une boîte à idées d'usine pour trier, différencier, et valider les idées afin de favoriser l'innovation dans l'atelier ?

Cette question rend compte de la difficulté pour une boîte à idées d'usine de proposer une logique de validation qui va au-delà d'une décision « oui/non » en fonction de la facilité de mise en œuvre de la solution.

RQ2. Existe-t-il une façon de traiter les idées non abouties pour l'usine qui soit pertinente pour la production ? Quels moyens cela requiert-il ?

La question devient ainsi : que faire des idées non abouties, non applicables, trop révolutionnaires ? Peut-on les traiter et par quels moyens ? Peut-on les stimuler par la même logique de boîte à idées ?

Pour traiter ces deux questions, l'article conduit à une plongée au cœur de l'outil de collecte d'idées par excellence en usine : la boîte à idées du technicentre SNCF. Elle est mise en place depuis de nombreuses années et ancrée dans les pratiques de la SNCF. Celle du technicentre fait l'objet d'un programme pour tous les technicentres de France. L'analyse se fonde d'une part sur la série des 131 idées sur la période de janvier à septembre 2019 tirée de la boîte à idées. Elles constituent 131 « fiches idées » numériques sur un modèle pré-rempli. Ces idées sont toutes déjà traitées (validée ou non) lors de la lecture des fiches. D'autre part, l'analyse porte sur les règles édictées par l'encadrement national des boîtes à idées des technicentres SNCF, expliquées par l'interview semi-directif de la responsable de l'innovation participative des technicentres au niveau national.

À partir de ce matériau, l'investigation porte sur plusieurs volets :

- Lors de leur traitement, les fiches idées font l'objet de commentaires des responsables concernés par l'idée. Les fiches ont été triées entre celles sans commentaires ou dont les commentaires correspondent à une mise en œuvre directe, et les 31 restantes dont les commentaires démasquent la nécessité d'une investigation supplémentaire avant de considérer l'idée comme une solution adoptable.
- La nature des commentaires des 31 fiches a ensuite été analysée.
- Enfin, les règles de la boîte à idées émises au niveau national ont été analysées.

Résultats :

R1. L'article montre que la boîte renferme deux types d'idées : celles directement applicables, et celles nécessitant une investigation supplémentaire, qui ne sont pas pour autant écartées de la validation, par exemple lorsque la solution est incomplète, ou doit être vérifiée par un expert du technicentre. Ainsi, même dans une usine où la priorité est donnée aux idées directement applicables, il existe une forme d'ingénierie de l'idée qui vise à faire aboutir chacune d'entre elles, soit pour les compléter ou les optimiser dans leur principe, soit pour vérifier leur bonne intégration à la production, et la conformité avec la prescription.

R2. Les ressources en conception nécessaires pour cette opération sont à la fois classiques d'un point de vue de la conception et non nécessairement attendues en usine : la boîte à idées cache en effet des acteurs qui s'impliquent dans la réalisation collective de l'idée qui était jusque-là vue comme individuelle : managers cherchant à aider à l'opérationnalisation de l'idée, experts capables de remonter dans les prescriptions pour trouver la validation de la solution, mais aussi un directeur de l'innovation animant et soutenant tout le dispositif ainsi que sa mise en œuvre et mettant à disposition les moyens nécessaires à la conception, au prototypage, aux réunions, à la convocation d'acteurs extérieurs, à la formation des opérateurs à la défixation, etc. En outre, le directeur de l'usine favorisait financièrement les démarches de conception et participait aux projets de conception innovante (type KCP (Laousse, 2018)) engagés par le technicentre avec d'autres acteurs (bureau d'études ou encore université) pour le long terme.

Discussion et implications managériales

- La notion d'amélioration continue – et corolairement d'innovation radicale- est ici complétée : le degré d'innovation est souvent vu comme la distance avec l'existant. Or l'article démontre que la distance à prendre en compte n'est pas celle entre les idées mais celle entre la solution proposée et sa validation. La validation d'une nouvelle solution est aussi l'occasion d'un travail sur la règle : exhumer celles qu'on avait oubliées ou en créer de nouvelles. Ainsi, cette démarche cachée mais usuelle enclenchée par le traitement de la boîte à idées de l'usine n'entre ni vraiment de l'exploitation, ni de l'exploration, mais un déplacement de focale d'une solution particulière au système de règle.

- D'un point de vue managérial, rendre visible le travail d'évaluation de la distance entre les solutions proposées et le système de règles, ainsi que la conception nécessaire à la bonne intégration des solutions permet de rechercher les conditions matérielles de l'amélioration de ce processus. La

boîte à idées permet certes de collecter les solutions pour améliorer la production, mais elle engendre, même en usine pour des solutions locales et presque immédiates, une ingénierie à développer. Elle repose en outre sur la formation des équipes à la conception, et sur la mise à disposition d'experts, de lieux, de temps et d'espace pour expérimenter...

5.3.3. Compléments

L'écriture de ce chapeau témoigne de la dynamique de l'avancée des recherches, en figeant dans les articles certaines étapes traversées pour l'élaboration finale des résultats. Aujourd'hui, nous aurions peut-être déplacé nos questions, nos instruments, et nos observations sur la capacité donnée par la boîte à idées de re-parcourir le système de règles. Les commentaires suivants soulignent ce rapport entre la boîte à idées et la prescription.

1. L'élargissement du spectre des idées gérées par le technicentre

Au-delà du type d'idées pour lesquelles elle a été conçue (solutions concrètes et directement applicables), la boîte à idées permet de nourrir le champ des projets de plus grande ampleur. Ces derniers dépassent le cadre du technicentre seul et nécessitent davantage de temps, de moyens matériels, et d'ingénierie de la conception pour voir le jour. Ils se formulent sous la forme de concepts, c'est-à-dire d'inconnus désirables : par exemple, il peut s'agir de maintenance agile, de la voiture-vélo saisonnière, de la voiture motrice anti-choc etc. Ils pourraient être considérés comme n'étant pas du ressort du technicentre (mais plutôt du BE par exemple) et pourraient être abandonnés. Cependant l'ouverture de la boîte à idées à ces types de suggestion permet de considérer le potentiel ou non de l'idée, de faire éventuellement quelques ateliers préliminaires de conception au sein du technicentre pour valider la pertinence d'un concept, avant de lancer une démarche de conception élargie.

De fait, les derniers exemples précédemment cités ont été tirés de la boîte à idées, ou bien étaient des idées encore vagues dans le technicentre rapportées au responsable innovation. Elles ont fait l'objet de projets d'approfondissement (dans le technicentre, puis avec le bureau d'études de la SNCF, avec des universités, ou encore d'autres technicentre etc), et sont en cours de développement pour certaines.

2. Implications managériales : l'adaptation de l'outil et de la formation des employé.e.s en conséquence

Sur le plan managérial, ce travail a rendu visible les différentes activités conceptrices et a contribué à mieux les organiser. La découverte de l'existence d'idées qui n'étaient pas « calibrées » pour la boîte mais qui avaient une valeur pour le technicentre s'est traduite par un ajustement des paramètres de l'outil. Dans le traitement des idées, les projets de ce type sont désormais classés à part, et étudiés selon des critères différents après étude collective du concept au sein du technicentre réunissant les employé.e.s. Ils sont ensuite basculés vers des projets de plus grande envergure. Cela a nécessité un apprentissage collectif de la conception innovante.

Les efforts du technicentre pour comprendre et accroître les capacités d'innovation ont été déterminants : il existe par exemple un « responsable amélioration continue, innovation et digital » dont une des missions est de soutenir le bon fonctionnement de la boîte à idées et le traitement des

idées. Par ailleurs, il a organisé divers ateliers pour former les équipes (managers et opérateur.rice.s) à la défixation, et à des méthodes de créativité. Il a mis en place des partenariats avec l'université, ou encore le fab lab de Nantes, etc. Pourtant, les opérateur.rice.s de l'usine, travaillant en trois huit, n'avaient jusque-là que peu l'occasion de se rencontrer et de prendre le temps d'approfondir ces questions, d'améliorer les solutions, et les propositions pour le technicentre. Cet effort s'est aussi matérialisé par un nouveau lieu : une salle de créativité a été aménagée pour réunir les équipes, faire des plans, échanger sur les idées, se renseigner sur les méthodes de créativité, etc.

3. La boîte à idées comme outil de la validation par le système de règles

Nous comprenons d'abord que ce qui pouvait apparaître comme un outil de gestion de l'amélioration continue classique révèle à la fois une attention fine portée à la faisabilité technique de la solution mais aussi à la cohérence des solutions par rapport à la prescription. En cela, l'article rend compte de l'accès au système de règles par la boîte à idées. Cette dernière n'est alors plus seulement un outil d'« idea management », attisant l'inventivité des employé.e.s, ni un outil de démarche participative, visant l'implication et la motivation de l'opérateur.rice pour le processus collectif d'amélioration de l'usine. La collecte d'idées provoque l'occasion de retrouver les règles, de les réaffirmer ou au contraire de les faire évoluer si nécessaire. Cette boîte à idées donne l'occasion de constater que, comme dans le cas Airbus, la conception de la solution ne vise pas des critères d'originalité, de diversité des solutions, de grande nouveauté. La solution appliquée au système de production doit d'abord s'intégrer à la prescription pour pouvoir s'intégrer au système de production. L'article déplace donc la focale habituelle de l'innovation : au lieu de se concentrer sur la conception de l'idée et la créativité éventuelle, il met à jour la conception de la validation.

En effet, les commentaires ont montré trois possibilités de traitement des idées :

- Les idées sont adoptées immédiatement, sans hésitation. Ce cas correspond à des solutions dont les managers sont sûrs qu'ils sont dans le système de règles et que l'idée vient améliorer la prescription. L'immédiateté du jugement peut aussi correspondre, dans de rares cas, au rejet de l'idée pour différentes raisons (idée déjà faite ou proposée). Par exemple, allonger le manche d'une clé spécifique pour améliorer sa facilité d'usage.

- Les idées peuvent être validées après une investigation : la solution n'est pas finie (et donc ne peut pas encore être jugée par rapport aux règles), ou les managers ne savent pas si elle est conforme ou non aux règles. Pour cela ils doivent aller rechercher la règle correspondante et valider la solution si elle le permet. L'article relate ainsi la sablière non étanche, au-dessus de laquelle l'opérateur souhait rajouter une gouttière. Après investigations et consultation du mode d'emploi de la sablière, il a été découvert qu'elle devait avoir un joint qui n'était plus là. La solution retenue a été de retrouver le joint manquant et de vérifier ceux des autres sablières.

- Les idées peuvent être validées après investigation et phase conceptrice : si, après recherche dans le système de règle, il n'a pas été possible de valider la solution, il faut soit modifier la solution soit modifier la règle. Cette étape d'adaptation ou d'évolution requiert un effort de conception supplémentaire. Par exemple, la modification d'un escalier pour descendre d'une machine a nécessité plusieurs plans et visites avec le fournisseur et l'expert en sécurité du technicentre.

- Les idées peuvent aussi, lorsqu'elles sont trop éloignées de la validation, faire l'objet d'ateliers de conception élargis. Par exemple, la maintenance agile, ou encore la cobotisation.

Notons que ce travail de recherche dans le système de règles était déjà très présent dans la boîte à idées de Michelin dans les années 1930. En 1927, Michelin qui cherche alors à implanter le taylorisme dans ses usines, met en place une « boîte à suggestion » gérée par son responsable, « l'ingénieur suggestion ». Le rôle de ce dernier était d'abord, de façon attendue, l'animation de la boîte : s'assurer que les employé.e.s postent des idées, les aider à les formuler, à les mettre en place, gérer le système de récompenses, etc. Mais son rôle consistait également à former les employé.e.s au système de règles, à étudier la compatibilité des idées au système de règles et à le faire évoluer si nécessaire. Ainsi, le journal interne de Michelin « Prospérité » d'octobre 1933, témoigne de l'étude nécessaire à faire, du choix de la laisser à l'ouvrier.e, mais de la suivre. Sur l'examen des propositions par l'ingénieur suggestion, la revue précise : « Que la suggestion soit inutilisable, en partie bonne ou complètement bonne, il arrive qu'au cours de la conversation avec l'auteur, se révèle un aspect nouveau de la question, ou une solution qu'on n'avait pas envisagée. ». « Nous avons vite renoncé à la réponse écrite qui nous privait des réactions des auteurs. Le personnel exécutant a trop tendance à considérer un papier comme une décision à ne pas discuter. Nous avons au contraire intérêt à la discussion et le papier devient alors une dépense inutile »¹². Nous sommes dans un contexte taylorien, où l'usine a le besoin de maîtriser au mieux son industrialisation, d'en connaître les règles et leurs éventuelles contradictions, et de les faire évoluer au besoin. La « boîte à suggestions » et son ingénieur s'avèrent un bon outil pour cela.

5.4. Article 4 : L'amélioration continue chez STMicroelectronics.

5.4.1. Tableau de synthèse

Titre de l'article	Intégrer de nombreux changements à un rythme intensif en industrie 4.0 : une stratégie pour contrôler les paramètres connus et inconnus pendant la montée en cadence en combinant l'expertise et les données : le cas STMicroelectronics
Auteur.rice.s	Honorine Harlé, Pascal Le Masson, Benoit Weil
Statut	Soumis à CIRP Journal of manufacturing science and technology (septembre 2022)
Résumé	En industrie 4.0, la tendance à la personnalisation des produits et les évolutions technologiques rapides imposent aux systèmes de production d'évoluer en permanence. Cela implique de pouvoir intégrer des changements de façon continue sans entraver le bon fonctionnement du système, pourtant complexe et mal connu. La maîtrise des risques pendant la qualification des changements est donc un point critique. L'article étudie le cas de l'usine de semi-conducteurs STMicroelectronics et la stratégie mise en œuvre pour faire

¹² Revue Prospérité n°6, octobre 1933

	<p>l'analyse de risque des changements. Il s'appuie sur une modélisation théorique de deux stratégies possibles d'analyse de risque. À l'aide de l'observation de qualifications de changements et d'entretien avec les personnes impliquées dans la qualification, l'article montre que les ingénieurs et experts utilisent les qualifications passées pour structurer et interpréter les données de la production nécessaires à la qualification. Cette combinaison entre patrimoine des qualifications passées, données actuelles et expertises permet un apprentissage et une mise à niveau en continu du système de production.</p>
Objectif de recherche	<p>Modéliser le raisonnement dans l'inconnu des ingénieurs et experts et la structuration des données pour permettre de valider les changements à un rythme intensif et sans risque pour la production</p>
Connaissances actuelles et limites	<ul style="list-style-type: none"> - La montée en cadence est particulièrement délicate et risquée en industrie 4.0 à cause de la complexité et de la méconnaissance du système et de la rapidité des changements. Les méthodes traditionnelles de plans d'expériences sont caduques. - On peut alors anticiper ces risques en rendant le système de production adaptatif, en simulant l'implémentation du changement ou en co-concevant le changement et le système de production. L'anticipation des variables inconnues pouvant entrer en jeu lors d'un changement et présenter un risque pour la production n'est pas pensée. - On peut aussi user de techniques avancées de contrôle des procédés. Elles sont cependant uniquement basées sur des modèles connus du système de production et des failles. - Des outils de maîtrise de risque existent, comme l'AMDEC (ou FMECA en anglais). Là encore, les défaillances inédites ne sont pas prises en compte.
Questions de recherche	<p>QR1. Comment capturer les paramètres inconnus lors de la mise sous contrôle des changements, de façon robuste, en préservant le système de production en place, et à ressources limitées ?</p> <p>QR2. Dans cette visée, quelles organisations et ressources sont nécessaires afin de parvenir à la combinaison efficace des données et des expertises ?</p>
méthodologie	<p>Modélisation du raisonnement de conception dans l'inconnu des analyses de risques par les ingénieurs et les experts dans les comités de validation des changements</p>
Matériau empirique	<p>Cas d'étude chez STMicroelectronics (Crolles) sur les comités de validation des changements.</p>
Résultats	<p>R1. Les ingénieur.e.s et expert.e.s responsables structurent les données nécessaires à l'analyse de risque en retrouvant les analyses de risques passées et en les complétant en fonction de la nature des changements et des résultats issus des données.</p> <p>R2. L'article met en avant la stratégie et le rôle essentiel des responsables et expert.e.s de validation pour la mise à jour des modélisations du système de production grâce à la structuration des données et à l'interprétation des résultats.</p>
Discussion	<ul style="list-style-type: none"> - La conception d'un jumeau numérique évolutif des procédés combinant patrimoine et nouveautés issues des changements. - La réhabilitation de la capacité à apprendre durant la montée en cadence, même en industrie 4.0 - L'activité conceptrice des expert.e.s et responsables de production à mettre en rapport avec les systèmes « <i>smart</i> » (autoporteurs).

5.4.2. Résumé détaillé

Introduction :

L'industrie 4.0 se caractérise par l'intensité des changements de produits et de procédés qu'il faut intégrer au système de production. Durant les phases de montée en cadence (ramp-up), les risques liés aux changements sont maîtrisés par le contrôle des paramètres du système impactés par le changement. La liste des paramètres est composée de paramètres connus, grâce à la connaissance passée du système, mais aussi de paramètres inconnus, liés à la nature nouvelle du changement. Comment déterminer l'ensemble de ces paramètres connus et inconnus pendant la phase de montée en cadence du changement?

La littérature identifie les problèmes spécifiques à l'industrie 4.0 de la phase de montée en cadence: dans cette période, le système peut subir des pannes ou des baisses de qualité importante liées à des défaillances non anticipées, car inconnues jusqu'à présent lors d'introductions de changements (Basse et al., 2014). Cet aspect est amplifié par la complexité des systèmes de production 4.0 dont les interactions physiques ne sont que partiellement connues (Zio, 2016) et très nombreuses, ce qui rend les méthodes de plans d'expériences caduques.

Une première façon de gérer ce risque consiste à intégrer ce problème de ramp-up dès la conception du système de production, en rendant ce dernier agile et reconfigurable (Koren & Shpitalni, 2010) ou bien en permettant de modéliser à l'avance le système et l'impact du changement (Guo et al., 2019). Dans les deux cas, cela demande d'avoir une connaissance exhaustive du système pour connaître à l'avance l'ensemble des interactions critiques (pour configurer l'agilité ou pour modéliser le système), ce qui n'est pas le cas en réalité.

Une deuxième voie est de mettre en place un système de contrôle des procédés « avancé » (Azamfar et al., 2020), dans la mesure où de nombreux capteurs en ligne et sur des instruments de métrologie complémentaires viennent fournir et analyser en temps réel les données issues de la production. Le processus s'arrête ou se réajuste quand les limites programmées de dérive sont franchies. Ici encore, les limites autorisées sont fonction de l'état de la connaissance et de la modélisation antérieure du système de production. De nouvelles interactions entre les données des capteurs peuvent advenir sans que les données ne soient hors-limite, tout en impactant négativement la qualité. De même, les méthodes statistiques de détection de pannes reposent sur une logique d'apprentissage sur un jeu de données avant de pouvoir s'appliquer aux données de production. Or, cet apprentissage est précisément celui de la détection de pannes connues seulement.

Une autre façon de faire, complémentaire de l'analyse de données en temps réel, consiste à lister à l'avance les pannes et problèmes pouvant advenir lors de l'introduction du changement ainsi que leur lecture dans les données ou les tests statistiques spécifiques. L'AMDEC (Analyse des Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité – ou FMECA en anglais) est ainsi une méthode de gestion de risque classique qui peut s'appliquer à la montée en cadence d'un changement. Cependant, le problème de l'identification des risques inconnus demeure (Cabanès et al., 2021).

Questions de recherche

QR1. Comment découvrir les paramètres inconnus par le contrôle de la montée en cadence changements en étant économe en temps et en analyse de données, mais aussi robuste pour la préservation du système de production ?

QR2. Quelle organisation et ressources sont nécessaires pour cela ?

Méthodologie et matériau empirique

Pour répondre à ces questions, la doctorante s'est rendue à Crolles à l'usine de semi-conducteurs de ST Microelectronics. Elle a pu observer le processus de contrôle de risque accompagnant la montée en cadence des changements. Elle a ainsi assisté à 19 comités de 15 à 20 minutes chacun, et pu s'entretenir avec 9 responsables de changements pendant 30 minutes sur la façon de préparer la maîtrise des risques des changements, ainsi que 5 membres du jury chargé de valider les étapes de la montée en cadence.

L'article modélise les stratégies de mise sous contrôle d'un changement. Puis, les éléments empiriques récoltés sur le terrain permettent d'éclairer le modèle sur la situation rencontrée.

Modélisation

On suppose qu'un procédé fonctionne selon la relation : $y = f(x)$, où y est un vecteur de performance du procédé, et x un vecteur de facteurs causaux de la performance. La fonction f reliant x à y n'est que partiellement connue, selon la modélisation qu'ont les experts du procédé et des interactions entre les paramètres. Lors d'un changement, pour contrôler les paramètres du changement, on cherche une approximation f^* de la vraie fonction f .

Une première stratégie consiste à estimer f sans connaissance a priori, en utilisant simplement les données disponibles. On peut par exemple faire une approximation linéaire du type : $f^* = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum \alpha_{i,j} x_i x_j$. Où les α_i et $\alpha_{i,j}$ sont des paramètres à estimer. C'est le principe des plans d'expériences généralement utilisés lors de la mise sous contrôle d'un changement dans un environnement de production simple. Cependant dans notre cas, les facteurs causaux x_i sont nombreux et l'estimation d'un tel modèle paraît peu adaptée à notre système. Les algorithmes de machine learning permettent d'estimer f^* sous une forme non-linéaire, plus adaptée à la réalité. Cependant, ils sont d'une part entraînés sur les liens causaux connus du passé, ce qui empêche de détecter l'émergence de nouvelles interdépendances. De plus leur résultat n'explicite pas l'expression de la fonction f^* mais seulement des performances, ce qui rend la connaissance du système à l'état de « boîte noire ».

Une deuxième stratégie repose sur l'utilisation des analyses de risques passées. De façon itérative, f_t^* part de la précédente expression de f^* estimée $f_{t-1}^*(x_k)$ à partir de paramètres désormais connus et d'un ajout d'une fonction g^* reliant des paramètres inconnus. Ainsi :

$f_t^*(x_k, x_u) = \Delta f_{t-1}^*(x_k) + g^*(x_u)$, où x_k sont des facteurs causaux connus, x_u des facteurs causaux encore inconnus et Δ un coefficient de la part du passé encore valable dans l'expression de f_t^* .

L'observation des comités de changement et les entretiens montrent que les responsables de changements et les experts chargés de les valider utilisent l'une et l'autre de ces stratégies, mais se basent surtout sur la deuxième. D'une part, leur démarche est de faire la liste à partir d'une feuille blanche en fonction de ce qu'ils savent du changement et des habituels contrôles à faire. Cependant, ils vont aussi chercher le changement précédent se rapprochant du changement présent pour aller reconnaître l'analyse de risque validée alors et l'adapter à la situation. L'explicitation des interactions inconnues se fait à la fois par les experts ramenant leurs connaissances passées des crises même lointaines, mais aussi par le comportement des variables sous contrôle pendant la montée en cadence et par les éventuels tests supplémentaires requis. On assiste donc à un apprentissage tout au long de la montée en cadence, grâce à l'analyse des experts en temps réel, la comparaison avec leurs connaissances passées, et les données issues de la montée en cadence.

Résultats et discussion

Cet article montre donc une stratégie d'arpentage des données astucieuse et économe en se basant sur les analyses de risques passées, et en permettant une interaction entre expertise et données. De plus, l'article montre le fort niveau de modélisation et de structuration des données pour concevoir les analyses de risque. L'activité de conception des experts à partir des données et du patrimoine d'analyses de risques et de crises passées rend l'amélioration continue dans la production 4.0 possible.

La présente modélisation des raisonnements possibles lors de l'introduction d'un changement peut être vue comme une forme de « jumeau numérique » éclairant les variables et leurs interactions significatives lors d'un changement. Cependant, ce jumeau numérique est apprenant, et ne tombe donc pas dans l'écueil de la seule simulation des interdépendances connues et représentées. Cela éclaire également une facette peu étudiée des systèmes intelligents (smart systems). Les auteurs montrent en effet que le système de production ne se met pas à jour seul, mais nécessite une organisation conceptrice forte pour le soutenir : des comités de validation en trois étapes pour la montée en cadence, un.e responsable de changement qui s'attache à parer les risques du changement, des experts qui ne valident pas seulement, mais aussi amendent l'analyse de risque présentée, explorent l'inconnu et apprennent des précédentes analyses de risques et éventuellement des crises, etc. L'« intelligence » ne réside alors pas dans l'automatisation, mais dans l'intrication entre les données, les automatismes, et l'action humaine collective forte et rigoureusement organisée pour la comprendre et la piloter. Dans ce cas, « l'opérateur.rice 4.0 » permettant au système de fonctionner, de se rétablir de ses pannes, et de parer les risques, correspond ici à un collectif d'ingénieur.e.s hautement spécialisé.e.s dans les semi-conducteurs et capables d'interagir et de concevoir la maîtrise des risques de l'amélioration continue à partir des données de production et du patrimoine des comités de validation de changements passés.

5.4.3. Compléments

1.L'industrie 4.0 : Un patrimoine de création intensive

Ce travail de recherche montre un point limite de notre modèle : la révision intensive du système de règles. En effet, nous avons souligné que le système de production, bien qu'automatisé, était complexe et mal connu en même temps qu'il se doit d'être extrêmement évolutif pour suivre la vitesse de changement des produits et d'évolution des technologies. Cette évolution nécessite l'intégration des changements à la production et la révision de manière très rapide, massive, et robuste des règles du système.

Les moyens à disposition suivent cet objectif, avec de nombreuses données disponibles, et des expertises pour les traiter. Cet article souligne néanmoins qu'une stratégie rigoureuse est nécessaire pour régénérer le système. Elle s'appuie à la fois sur le patrimoine industriel (les données et les changements passés) et sur la détection et l'analyse du surgissement de l'inconnu. Les données en temps réels issues de la production et plus particulièrement des situations de montée en cadence sont donc d'une aide précieuse, mais ne peuvent être féconde sans leur structuration- toujours évolutive- par des ingénieur.e.s et expert.e.s connaisseur.euse.s des qualifications passées et de l'histoire des crises de l'usine.

2.La révision intensive des règles comme symptôme de la mutation des usines

Ce point extrême est peut-être le signe d'une mutation des systèmes productifs. Notre usine se caractérisait par l'omniprésence de la conception pour un environnement où la résolution de problèmes complexes demeure le quotidien de la production, et contrairement à ce que l'automatisation et l'apparent confinement de la production pourraient laisser penser.

Deux hypothèses peuvent être émises sur la compréhension d'un tel phénomène.

Premièrement on peut considérer que, d'une certaine façon, le BE et la production deviennent indissociables, et la distinction opérée au début de ce chapeau ne tient plus ; il faut la reconsidérer. L'usine est seulement le lieu physique de la fabrication, que les ingénieurs peuvent piloter à distance. D'ailleurs, l'organisation adoptée lors de la crise Covid19 renforce cette idée, puisque vidée de la grande majorité de son personnel, la fabrication continuait de s'opérer, avec un pilotage par les ingénieurs en télétravail.

Deuxième hypothèse, l'usine devient le lieu de la gestion routinisée des « crises ». Avec l'industrie 4.0, la production conserve une de ses caractéristiques, la résolution de problèmes, mais à laquelle s'ajoutent plusieurs composantes : la dispersion de l'inconnu, la vitesse d'apparition des problèmes, leur complexité, leur propagation rapide au système de production, etc. Ce n'est donc pas un bureau d'étude ou des méthodes, mais les capacités de conception des employé.e.s sont indispensables au bon fonctionnement, c'est-à-dire à la régénération rapide du patrimoine de création.

5.5. Tableau de synthèse

Nous résumons dans ce tableau les principales contributions de nos articles, par rapport à leurs propres questions de recherche (Tableau 15), puis dans un autre tableau, par rapport aux contributions aux questions de recherches du chapeau (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Tableau 14 : synthèse des articles

Article	Questions de recherche de l'article	Méthode et cas empiriques	Résultats de l'article
<p>1. La modélisation d'un patrimoine de création pour l'industrie: concevoir des règles nouvelles en préservant le système de règles existant</p>	<p>QR1 : Comment modéliser l'innovation en usine et les différents types d'interaction entre la nouvelle règle et les règles actuelles ? Notamment, comment une règle peut-elle être à la fois innovante et préservatrice ?</p> <p>QR2 : Quels sont les ressources, les acteurs, l'organisation et les moyens nécessaires à la conception d'une nouvelle règle (ou l'extension d'une règle existante) dans un patrimoine de création ?</p>	<p>Modélisation de la reconception d'un patrimoine de création avec CK-topos</p> <p>2 cas illustratifs</p>	<p>R1. modélisation de la validation de la nouvelle règle en cohérence avec le système existant ;</p> <p>R2. Le rôle des opérateurs et des managers. Ils doivent être en mesure de suivre les différentes étapes de la création et la validation de la nouvelle règle : un processus d'exploration dans l'inconnu dans le système de règles, la démonstration de la faisabilité et un organe de validation de la preuve.</p>
<p>2. La conception innovante en production à l'usine Airbus de Saint-Nazaire</p>	<p>QR1 : quel est le niveau de performance de chacun des régimes, et comment co-existent-ils ?</p> <p>QR2 : Quelles sont les conditions d'existence du deuxième régime de conception ?</p>	<p>30 projets d'amélioration de l'usine comparés dont le régime de conception est comparé sur leurs critères de conception</p> <p>Tests statistiques de contrôle</p> <p>2 cas illustratifs</p>	<p>R1. Les deux régimes de conception existent et co-existent au sein de l'usine.</p> <p>R2. Des ressources proches de celles de la conception innovante sont nécessaires, même si elles ne vont pas de soi en usine : du temps pour les projets, des personnes issues de la production disponibles, des capacités de prototypage, d'expérience et d'itération etc.</p>
<p>3. Que révèle la boîte à idées de l'usine ?</p> <p>Une analyse des capacités conceptrices d'un centre de maintenance de trains à</p>	<p>QR1 : Quel est le critère adapté à une boîte à idées d'usine pour trier, différencier, et valider les idées afin de favoriser l'innovation dans l'atelier ?</p> <p>QR2. Existe-t-il une façon de traiter les idées non abouties pour l'usine qui soit</p>	<p>132 idées de la boîte à idées du technicentre sont lues et classées en fonction de leurs commentaires de validation.</p> <p>Etude qualitative des règles de la boîte à idées.</p>	<p>R1. Mise en évidence d'une étape de conception supplémentaire pour les idées qui ne sont pas directement applicables, qui réside dans la finalisation des idées et dans la validation de leur conformité avec la prescription ;</p>

partir de son système de gestion d'idées	pertinente pour la production ? Quels moyens cela requiert-il ?		R2. Une ingénierie est nécessaire pour cela, ce qui mobilise des ressources matérielles (capacités de prototypage, temps, salle de réunion...) et humaines (opérateur.rice.s formé.e.s à la conception, experts techniques, connaissances de la prescription etc).
4. Intégrer de nombreux changements à un rythme intensif en industrie 4.0 : une stratégie pour contrôler les paramètres connus et inconnus pendant la montée en cadence en combinant l'expertise et les données : le cas STMicroelectronics	<p>QR1. Comment capturer les paramètres inconnus lors de la mise sous contrôle des changements, de façon robuste, en préservant le système de production en place, et à ressources limitées ?</p> <p>QR2. Dans cette visée, quelles organisations et ressources sont nécessaires afin de parvenir à la combinaison efficace des données et des expertises ?</p>	Modélisation du raisonnement de conception des analyses de risques lors des changements, à partir de l'observation des comités de validation et des interviews des différents acteurs.	<p>R1. La stratégie de validation des changements : retrouver les analyses de risques passées et les compléter</p> <p>R2. Le rôle essentiel des responsables et expert.e.s de validation pour la mise à jour des modélisations du système de production grâce à la structuration des données et à l'interprétation des résultats.</p>

Article N°	QR1- Comment modéliser le renouvellement d'un système de règles en usine ?	QR2- Quelles méthodes, organisations, et ressources sont nécessaires pour cela ?
1. La modélisation d'un patrimoine de création pour l'industrie: concevoir des règles nouvelles en préservant le système de règles existant	Modélise le renouvellement du système de règles avec CK-topos, illustré de 2 exemples (commentaire 1)	Le modèle donne des grandes classes d'action associées à la régénération du système de règles (faisceautisation, dérogation, tradition), qui requièrent des moyens différents. (commentaire 2)
2. La conception innovante en production à l'usine Airbus de Saint-Nazaire	Expose la nécessité de solutions robustes et adaptées au système de règles (commentaire 2); Donne des exemples de révision de la prescription (commentaire 1)	Montre les méthodes et moyens pour arpenter le système de règles et prouver la validité de la solution (commentaire 3)
3. Que révèle la boîte à idées de l'usine ? Une analyse des capacités conceptrices d'un centre de maintenance de trains à partir de son système de gestion d'idées	Met en évidence différentes formes de conception de règles (Commentaire 1) Montre comment la boîte à idée permet de re-parcourir et revalider le système de règles (commentaire 3)	La boîte à idée est un outil de coordination pour la validation des solutions au regard des règles. (commentaire 3) Implications managériales : l'adaptation de l'outil aux différentes formes de conception et la formation des employé.e.s en conséquence
4. Intégrer de nombreux changements à un rythme intensif en industrie 4.0: une stratégie pour contrôler les paramètres connus et inconnus pendant la montée en cadence en combinant l'expertise et les données : le cas STMicroelectronics	Modélise le raisonnement en révision intensive du patrimoine de création, notamment les stratégies de recherche de l'inconnu dispersé dans le système de production, la structuration des données, l'interaction avec les expert.e.s, et la mise à jour du patrimoine de création (commentaire 1)	Mise à jour d'une stratégie afin de systématiser la révision du système de règles, mêlant expertise, données et patrimoine de création

Tableau 15 : synthèse des contributions de chaque article aux questions de recherche de la thèse

6. Résultats généraux

Notre argumentation matricielle nous encourage à opérer deux axes de lecture : après avoir présenté les articles un à un et tissé leurs liens avec cette thèse (partie 5), nous pouvons désormais reprendre les questions de recherche générales et montrer comment le modèle et les situations empiriques y répondent. Rappelons les questions de recherche du chapeau : comment modéliser le renouvellement d'un système de règles en usine ? (QR1); quelles méthodes, organisations, et ressources sont nécessaires pour cela ? (QR2). Notre stratégie de réponse utilisera le modèle, mais cette fois-ci dans sa fonction prédictive. Que nous apprend le modèle, en toutes généralités, sur nos questions de recherche ? Quelles conditions de contingences tirons-nous parallèlement des cas empiriques ?

6.1. Résultat 1 : la modélisation de la régénération du système de règle en usine

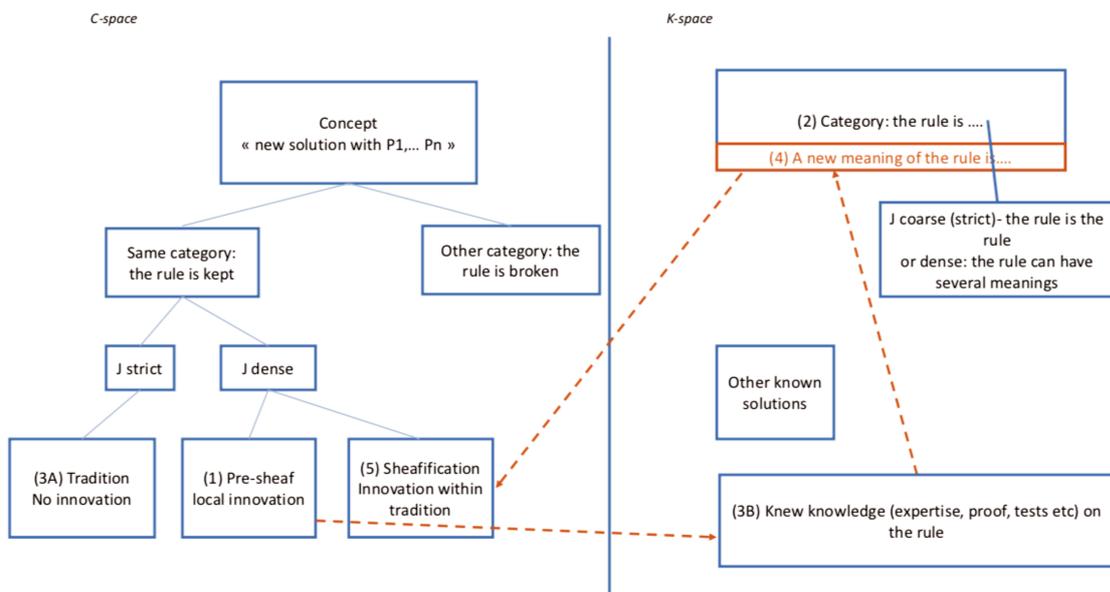


Schéma 8 : Modélisation générale de la régénération du système de règles en usine avec CK-topos (Extrait de l'article 1).

L'apport principal de cette question est donné par l'article 1 qui fournit notre modèle de régénération du système de règle (cf. Schéma 8). Déjà explicité dans l'article et la partie précédente (cf. partie 5), nous pouvons désormais aller plus loin, et nous demander ce qu'il dit plus généralement sur la révision des règles en usine. Pour cela, nous avons sectionné la question de recherche en sous-questions. Nous nous appuyerons donc conjointement sur le modèle et les cas empiriques pour y répondre.

Quelle est la spécificité de la révision du système de règles en usine ?

Nous avons vu que le système de règles en usine à la particularité d'évoluer tout en garantissant la préservation du système existant. Notre modèle mobilise par analogie le formalisme CK-topos, et contribue ainsi à rendre visibles les rouages de ce régime de création conservatrice (article 1). L'on y découvre que l'une des pierres angulaires de la révision de règle est la vérification de la compatibilité de la « nouvelle règle » au système existant. Pour ce faire, le modèle marque une étape de recherche rigoureuse de la règle à réviser (la catégorie), ainsi que d'apport de la preuve. Ces éléments viennent ainsi structurer l'espace « K » des connaissances (cf. Schéma 8, colonne de droite). Les cas empiriques nous montrent toutefois que cette étape est cruciale et peut s'avérer d'une grande finesse. En effet, le système de règles de l'usine est plus ou moins accessible. La boîte à idées de la SNCF permet d'instaurer une certaine systématique dans la recherche des règles. Les idées qui sont de façon « évidente » dans la règle peuvent être validées rapidement, tandis que d'autres doivent faire l'objet d'un supplément d'exploration avant leur validation (cf. Article 3). Dans l'usine d'Airbus de Saint-Nazaire, les équipes sont amenées à confronter la solution envisagée avec les règles, et à concentrer les efforts sur l'apport de la preuve de compatibilité de la nouvelle règle avec le système. Cette démarche est alors d'autant plus rigoureuse que les règles sont, du fait du secteur, extrêmement nombreuses et contraignantes. Nous avons ainsi pu montrer dans la partie 4 des exemples de révision de règles concernant un protocole de certification de la qualité ou la sécurité. Chez STMicroelectronics, la recherche de la règle et la validation de sa révision constituent le point central de discussion entre les ingénieur.e.s dans les comités de validation des changements. « Quelle était l'analyse de risque jusque-là ? Quelle modélisation du système amenait-elle ? Est-elle toujours pertinente ? » : voilà les questionnements qui surgissent dans la validation du changement entre le.a responsable du changement et les expert.e.s. Dans ce dernier cas d'industrie 4.0, où le système de production est méconnu et chaque changement est susceptible de révéler de nouveaux phénomènes, l'utilisation et le positionnement sur la base du « patrimoine » sont particulièrement manifestes : la stratégie pour valider les changements consiste à se fonder sur les analyses passées, voire ramener à l'analyse les incidents de production antérieurs, afin de pouvoir être extrêmement sensible aux phénomènes nouveaux pouvant advenir (Article 4).

Que conçoit-on lorsque l'on révisé le système de règles ?

Nous avons, pour une thèse portant in fine sur les transformations industrielles, très peu abordé les questions de choix de technologies, ou encore de solutions très innovantes pour l'usine. Nous avons au contraire déplacé l'attention sur le système de règles. Nous mettons ainsi en évidence, dès qu'il y a apport d'une solution nouvelle, une double conception propre à l'usine : premièrement la conception de la solution en elle-même, nécessitant une exploration plus ou moins innovante. Deuxièmement, la conception de la preuve que la nouvelle règle que la solution propose est bien conforme au système de règles en place. Cette deuxième activité de conception relative au renouvellement du patrimoine de création n'était pas visible avant de la mettre en évidence par notre modèle et avec nos cas empiriques. Dans le Schéma 8, le raisonnement de conception vis-à-vis de la prescription est particulièrement éclairé par le formalisme C-K rendant compte de l'alternance entre l'exploration et la structuration de l'espace des connaissances (les règles) et la conceptualisation associée. Nos recherches empiriques le montrent également. Ainsi, les équipes d'Airbus à Saint-Nazaire ont à la fois déployé des ateliers pour chercher des connaissances et explorer des concepts qui pourraient intégrer l'usine de façon bénéfique. Mais le régime de conception à prescription évolutive était également marqué par une étape spécifique

de validation de la solution, par les mesures, les calculs de probabilité, les tests des solutions, les résultats obtenus, etc. (Article 2). Notre expérience au technicentre a permis dans un premier temps de constater et de renforcer les capacités de conception de l'usine, et de s'emparer de projets habituellement laissés de côté: la conception de rames modulables pour les vélos et facilement maintenables, la maintenance agile, le technicentre vert, etc. Mais plus encore, la plongée dans le traitement des idées de la boîte à idées a montré un rapport constant à la prescription, et sa mise à jour dès que nécessaire, après avoir conçu des solutions le faisant évoluer (Article 3). La recherche sur validation des changements chez STMicroelectronics a presque éclipsé le premier type de conception, pour n'en retenir que quelques caractéristiques : des changements nombreux, complexes, et à cadence élevée. L'objet focalisant l'attention était ailleurs : la démarche conceptrice nécessaire à la maîtrise des risques, à la capacité à prouver que le changement s'intégrait au système de règles, et enfin à la révision continue de ce système.

Qu'est-ce qu'une régénération du système de règle réussie ? Existe-t-il des critères de performance associés à la révision du système de règles ?

Nous avons vu que la condition sine qua non de l'apport d'une solution en usine est qu'elle soit bonne pour le système de production ; pour cela, la solution doit être conforme à la prescription. Dans le cas où la prescription évolue, le premier critère de performance requis est l'innocuité (ou l'amélioration) de la nouvelle règle sur les performances de la production. C'est notamment pour cela que la révision des règles est très conservatrice et requiert un processus de faisceautisation qui part du patrimoine pour s'opérer (Article 1). Airbus souhaitait faire de l'amélioration continue tout en respectant les objectifs fixés par les règles (Article 2). STMicroelectronics devait intégrer des changements tout en étant sûr de ne pas provoquer de défaut qui serait rapidement devenu systémique pour la production (Article 4).

Une autre performance pourrait être la cadence de la révision, c'est-à-dire, sur le Schéma 8, la vitesse à laquelle s'opère l'opération dans l'espace K de recherche de la catégorie, de l'apport de la preuve que la nouvelle règle appartient bien à la catégorie, et in fine de la faisceautisation, c'est-à-dire de la validation que la nouvelle règle appartient bien à la catégorie et du retour dans l'espace C (Article 1). Or, nous montrons dans les paragraphes précédents comment ce processus peut s'avérer délicat, notamment la recherche dans le système de règles. STMicroelectronics, pour soutenir une cadence de révision très élevée (15 à 20 changements par semaine étaient soumis à une des trois étapes de validation), a élaboré une stratégie de mise à jour du patrimoine de règles. La stratégie est soutenue d'une part par les données massives issues de la production, et d'autre part par l'expertise des ingénieur.e.s de l'usine. Néanmoins, le raisonnement, basé sur les validations antérieures, permet un arpentage et une structuration très rapide des données. Cela permet une validation en temps très limité par rapport à la quantité de données disponibles et au degré d'inconnu dans le système de production (Article 4). Finalement, la cadence élevée de révision des règles permet d'atteindre, non pas des innovations de rupture -qui s'opposeraient à de l'innovation incrémentale et de l'amélioration continue-, mais une forme d'amélioration continue intensive, avec des changements devenus à la fois routiniers (très courants) et massifs (en grand nombre).

La régénération du système de règles dépend-elle des usines ? Y-a-t-il des usines au système de règles plus stable que d'autres ?

Dans notre modèle, le crible J détermine la possibilité ou non de s'écarter de la première interprétation de la catégorie. Avec un crible « strict », la révision de la catégorie n'est pas possible, et seul le maintien de la tradition garantit le bon fonctionnement de la production. Au contraire, avec un crible « dense », les régimes de dérogation ou de révision de la prescription sont permis. En particulier, la faisceautisation devient possible dès lors que le crible autorise un enrichissement du sens à donner à la catégorie. Que signifie pour l'usine ce crible ? On peut y accéder de deux façons. D'une part, il peut être assimilé à la gestion du patrimoine de création : une gestion orientée vers la régénération des règles est à même d'évaluer les pré-faisceaux, et de les valider. Elle permet également un travail autour de la règle en laissant entrer dans l'usine une activité de conception, dont les modalités feront l'objet de la réponse à la question de recherche 2. L'usine d'Airbus est illustrative d'un crible dense : dès 2013, l'état-major de l'usine a encouragé, à son plus haut niveau, des formes d'expérimentations pour renforcer la puissance de l'amélioration continue. Dans le même temps, l'usine s'ouvrait à une activité de conception innovante où les équipes, du de la compagnon.ne au manager, allait pouvoir retrouver, re-questionner la règle et en proposer d'autres formes (Article 2). Nous pouvons également interpréter la remarquable organisation de STMicroelectronics autour de la régénération du système de règles comme un crible très dense. À Crolles, la révision est devenue une routine et constitue une part de l'activité de l'usine : les comités de validation se tiennent 4 jours par semaine, toute l'année, une équipe de membre du board se relaye pour valider les changements, les responsables de changement ont dans leur mission d'intégrer les changements, etc. Au contraire, lors de la recherche de terrains pour la thèse, certains managers d'usine se sont montrés hermétiques à l'introduction d'une activité conceptrice et à la révision des règles par l'usine. On peut faire l'hypothèse que crible strict a plus de probabilité d'advenir lorsque les contraintes extérieures sur la production sont extrêmes (normes, réglementations, etc.). La deuxième façon de capturer le crible est de le constater a posteriori dans la stabilité ou non du système de règles. Un système de production aux règles stables sera de facto de crible strict tandis que la régénération du système de règles démasquera un crible dense. Le cas de STMicroelectronics nous apprend qu'un système de production 4.0, perçu comme extrêmement stable, dont l'évolution est conçue en amont par le bureau d'études, pour une production entièrement automatisée, repose dans les faits sur un système de règles extrêmement évolutif, et finalement très peu auto-générateur : ce sont les ingénieur.e.s de production, organisés rigoureusement, qui pilotent finement l'évolution du système de règles (Article 4).

Adapter localement ou régénérer les règles?

Une usine peut-elle faire sans faisceautisation tout en se laissant assez de degrés de liberté pour s'adapter aux évolutions nécessaires de la production ? Si l'on suit le modèle, l'autre régime possible pour le système de règle est le régime de la préservation sans évolution. Or si l'on veut pouvoir s'adapter dans un tel cas, deux possibilités s'ouvrent : accepter les dérogations, ou avoir des règles incluant en elles-mêmes une variété de modalités et d'interprétations (Article 1, et Schéma 8). La dérogation a l'avantage d'éviter un processus long de conception de nouvelle règle, et peut suffire localement pour dépasser les incohérences du système de règles. Cependant, ses points forts font aussi ses limites : la dérogation n'a pas de valeur générale, et ne peut ouvrir à un ensemble large de nouvelles solutions ; elle doit être re-négociée à chaque nouveau cas similaire. De plus, l'interprétation de « locale » prête à

flottement : qui fixe la durée, le temps d'utilisation ? selon quels principes ? On peut cependant admettre que le statut de dérogation pourrait être avantageux pour nourrir le processus de conception de la nouvelle règle et de faisceautisation, autorisant un certain nombre de tests et de mises à l'épreuve de nouvelles solutions. D'un autre côté, avoir un système de règles fondé sur des catégories comprenant de nombreuses modalités laisse assez de degrés de liberté pour l'adaptation et l'optimisation selon les situations. Cependant, la prescription confine la production et rend systématique ses performances production, en la préservant des crises. Une prescription « permissive » serait plutôt adaptée à un atelier artisanal, ou à des cadences très faibles. Nous pouvons cependant remarquer que ce régime existe au sein de productions très prescrites, pour des métiers qui ne sont pas compris par d'autres que ceux qui les font, et dont les gestes sont encore trop énigmatiques pour envisager une automatisations. C'est par exemple le cas des compagnon.e.s chez Airbus, appelés ainsi en raison de leur savoir-faire peu prescriptible.

6.2. Résultat 2 : les ressources, les méthodes, et l'organisation de la régénération du système de règle en usine

Quelles sont les conditions d'opérationnalisation de la régénération du système de règles ? Comment gérer le patrimoine de création des règles de l'usine ? Quelles sont les ressources, les méthodes et l'organisation du système de règles en usine ? Une fois dévoilée et explicitée à l'aide d'un modèle, l'activité de révision des règles peut être renforcée en l'outillant.

Le modèle permet de comprendre comment organiser la révision du système de règles, et les cas empiriques offrent à voir des dimensions contingentes.

Quelle organisation pour la révision des règles en usine ?

Le modèle (cf. Schéma 8) met à jour les actions sous-tendant la révision des règles en usine: cette dernière se caractérise par une exploration et une structuration particulières de l'espace des connaissances (colonne de droite du schéma). Ainsi, de façon générale, le raisonnement de conception que nous avons modélisé suggère une organisation en quatre étapes :

- Étape 1 : La recherche de la catégorie, c'est-à-dire l'exploration dans le système de règles pour en exhiber la règle qui constitue la pierre d'achoppement, et qu'il s'agit de réviser.
- Étape 2 : La proposition d'une nouvelle règle (le pré-faisceau) qui permet d'intégrer la nouvelle solution dans l'usine.
- Étape 3 : La constitution d'une démonstration visant à montrer que la nouvelle règle est bien compatible avec le système de règle : elle appartient bien à la catégorie, et éventuellement en élargit le sens.
- Étape 4 : La validation (la faisceautisation) qui valide la preuve et « enregistre » l'évolution de la règle ; elle autorise alors un ensemble de solutions correspondant à la nouvelle règle.

Nous nous attendons donc à avoir une organisation correspondant à ces étapes. Notons toutefois l'apparente linéarité de ces étapes ne doit pas masquer l'effort intense de conception nécessaire à chacun des stades. De plus, selon l'intensité de l'activité de révision des règles, elle peut être faite au cas par cas ou de façon systématisée afin de rendre cette activité endogène à la gestion productive. L'usine STMicroelectronics de Crolles avait mis en place un processus de révision de règles qui permettait de traiter plusieurs règles simultanément, à différentes étapes de la révision : les comités de préparation, de validation et de mise à l'épreuve de l'analyse de risque avaient un format pré-défini, des supports standardisés et adaptés au raisonnement, des rôles clairs attribués aux différents protagonistes etc (cf. Article 4).

Pour chacune des étapes de cette organisation, nos terrains ont déployé des outils et des méthodes variées, selon leur rapport au système de règles et à sa révision.

Quelles méthodes et outils viennent soutenir cette organisation ?

Reprenons les étapes de révision de la règle décrites ci-dessus et observons comment nos terrains les ont instrumentées.

Étape 1 : La recherche de la catégorie.

Dans le technicentre SNCF, la boîte à idées constitue un outil de recherche dans le système de règle. Il peut s'agir de vérification de la conformité en cas de doute (est-on autorisé à enlever ce garde-corps gênant pour y mettre un escalier pivotant?), ou bien de recherche de la règle à mettre en œuvre (si l'on veut changer l'organisation des voies pour faire une voie spécifique de remisage, quelle règle doit-on suivre ?). Les commentaires des fiches idées ainsi que nos entretiens avec le responsable de la boîte à idées montrent également que les expert.e.s techniques de l'usine ou plus largement de la SNCF peuvent être mobilisés quand il y a un doute sur la règle et son interprétation. Ainsi, le technicentre est doté d'un service de soutien à la règle avec des « experts référentiels » qui sont spécialistes du sens de la règle et de leur contenu (Article 3). L'usine d'Airbus de Saint-Nazaire a quant à elle développé pour cette étape une certaine expertise d'exploration dans le système de règles. Au moyen d'ateliers de conception guidés par la théorie CK, l'étape d'exploration dans l'espace des concepts (C) et des connaissances (K) pour la solution s'accompagnait de la navigation dans le système de règles, mêlant ainsi l'étape 1 et l'étape 2. De fait, c'est la recherche de connaissances et la conceptualisation progressive qui permettait de découvrir au fur et à mesure les règles d'application en usine. Enfin, chez STMicroelectronics, notre modélisation du raisonnement de conception des analyses de risques a montré que la recherche dans le système de règles se faisait en exhumant les analyses de risque passées, c'est-à-dire en ramenant l'extrait du patrimoine qui va servir à sa régénération.

- Étape 2 : La proposition d'une nouvelle règle.

Dans ce chapeau, nous avons peu détaillé cette étape, pour nous pencher sur le rapport au système de règles. Nos résultats empiriques montrent néanmoins que cette étape prend des formes variées. À l'usine d'Airbus de Saint-Nazaire (Article 2), la proposition d'une nouvelle règle émanait d'une démarche qui s'appuyait sur la théorie C-K pour guider le raisonnement de conception et permettre la défixation des solutions habituelles en usine qui avaient jusque-là échoué. L'exploration en K était particulièrement cruciale, avec par exemple, des mesures fines et spécifiques au problème (ex : la mesure du nombre de dossiers et du temps de passage dans chacune des commissions qualité, la nature des problèmes qualité

et leur fréquence) , ou encore une recherche des connaissances au-delà de l'usine (ex. : la rencontre avec le BE pour comprendre comment celui gère la qualité, la consultation d'expériences sur la norme et son efficacité) etc. Cette étape était souvent concomitante avec la première étape (recherche de la règle) puisque l'exploration conduisait simultanément à chercher des concepts nouveaux (espace des concepts) et à rechercher les conditions de possibilité (espace des connaissances). À la SNCF, cette étape était, pour la plupart des idées, gérées de façon endogène, dans l'atelier. Seules les solutions retravaillées après recherche dans le système de règles devaient faire l'objet d'ateliers collectifs de conception à partir de la boîte à idées. Chez STMicroelectronics, la proposition de la nouvelle règle relevait d'une étape clairement distincte des trois autres. Elle revenait au.à l'ingénieur.e responsable du changement, et s'effectuait avant les comités, en vue de leur préparation. Cette personne devait mener une enquête pour produire une nouvelle analyse de risque : elle était en charge de retrouver l'analyse de risque du changement antérieur le plus proche, et de la mettre à jour. Pour cela elle s'appuyait sur les spécificités du nouveau changement par rapport à l'ancien, mais aussi sur la consultation d'ingénieurs spécialistes des machines, ou d'autres ingénieur.e.s de l'usine dont l'expertise était impliquée dans le changement.

Étape 3 : La constitution d'une démonstration

Chez Airbus, cette étape prenait la suite de l'exploration et correspondait dans la théorie CK à une forme de conjonction. Pour prouver que le changement de règle était valable et compatible avec le système de règles, plusieurs moyens ont été employés : le calcul et la simulation (ex. : le calcul de probabilités sous différentes hypothèses dans le cas des matelas de sécurité), le prototypage (ex. : cas du robot Flextrack dont les paramètres d'intérêt ont été découverts par expérimentation), une approche incrémentale avec la considération des résultats intermédiaires pour changer la règle (très lié au prototypage), et de façon plus générale, la mesure des résultats et la conception de l' « appareil » de mesure adapté (ex : cas du processus de qualité fluide). Ces éléments ne sont pas surprenants et se retrouvent dans les critères de conception du régime à prescription évolutive; leur intérêt a été démontré dans la littérature de gestion de projet innovant (cf. Article 2). Cependant, ils servent dans le cas Airbus un autre dessein : non pas seulement celui de faire une « bonne » solution – par exemple fiable, adaptée aux utilisateurs, de maintenance facile, etc. – mais aussi d'apporter la preuve de la compatibilité avec le système de règles. A la SNCF (Article 3), si un doute advenait sur la compatibilité d'une règle ou la nécessité d'en faire évoluer une, les experts de la prescription du technicentre ou de l'ingénierie SNCF étaient consultés et donnaient leur avis. La grande majorité des idées faisaient l'objet d'une vérification que la solution proposée était soit l'amélioration de la prescription (ex : améliorer l'affichage des stocks), soit une prescription indépendante (mettre des prises pour voitures électriques sur le parking du technicentre ; mettre des poubelles sélectives accessibles depuis la plateforme, etc.). Dans certains cas, comme celui de la sablière, il fallait redécouvrir une règle intéressante (dans l'exemple, l'existence d'un joint). Chez STMicroelectronics, l'apport de la preuve était là aussi une étape bien définie : celle des tests déterminés par l'analyse de risque et de la montée en cadence, contrôlée et parfois infléchie par les 3 comités qui l'organisaient. De plus, la preuve était discutée entre la personne responsable du changement et les experts du board. Un dialogue s'instaurait lors des comités pour attester de la robustesse de la preuve. Chaque expert, voyant les résultats des tests, posait les questions relatives à son domaine de compétence. Les questions en comités des membres du board à l'ingénieur.e responsable du changement étaient alors du type « As-tu bien pensé à faire [tel] test, avant ? », « sur combien de lots tu testes ? » , « Comment expliques-tu les défauts que tu montres [sur la photo

projetée] ? », « As-tu cherché des effets sur [tel phénomène] ? », « Selon toi, qu'est-ce qui explique cette tendance, dans les résultats du test ? ». Cette dimension de mise à l'épreuve de l'analyse de risque lors des comités a également été très soulignée par les membres du board, lors des entretiens réalisés pour l'enquête. Ce moment - le passage par les trois comités de validation- a également la fonction de renforcer la preuve disponible : les experts tentaient de déceler et d'expliquer les anomalies pouvant survenir, et demandaient des tests supplémentaires au besoin.

Étape 4 : La validation qui « enregistre » l'évolution de la règle

Enfin, l'étape de validation variait elle aussi selon les enjeux. Chez Airbus (Article 2), nous ne nous sommes pas attardés sur les moyens de validation des projets, mais ils correspondaient à une validation de projets classiques avec différentes étapes à franchir selon l'avancement du projet sous la forme de présentations de l'équipe projet devant les managers décideurs, pour démontrer l'intérêt et la viabilité de la solution, et le cas échéant, de la nouvelle règle. Les décideurs devaient notamment donner leur accord pour l'expérimentation, et pour l'adoption de la règle, qui pouvait après être utilisée pour d'autres projets. A la SNCF (Article 3), la boîte à idée était en elle-même organisée pour valider les projets par les managers et le directeur de l'innovation et de l'amélioration continue, avec un expert du référentiel si nécessaire. Notre recherche a cependant permis de distinguer les validations rapides, des validations « en attente » qui se faisaient après un travail de re-conception de la solution et/ou de la règle. Chez STMicroelectronics (Article 4), la validation était également très structurée, et se faisait en trois temps avec les trois comités (validation de l'analyse de risque et premiers tests, observation des premiers résultats et montées en cadence, validation finale). La validation finale du changement était également l'occasion, pour l'ingénieur.e responsable, d'archiver la nouvelle analyse de risques pour la rendre accessible lors du prochain changement semblable. Pour les experts du board, la validation était le moment de l'apprentissage, c'est-à-dire de la mémorisation des anomalies qui ont pu avoir lieu pendant la montée en cadence et qu'il a fallu couvrir par des tests. Le modèle et la connaissance des phénomènes évoluaient alors. Cela se faisait également de façon officieuse et collective, par les conversations entre experts en dehors des comités de validation.

Tableau 16 : Synthèse du résultat 2 : les outils et méthodes, selon les cas empiriques

	Étape 1 : recherche de la règle	Étape 2 : proposition d'une nouvelle règle	Étape 3 : apport de la preuve	Étape 4 : validation et mise en oeuvre
Article 2 Airbus	exploration en conception innovante avec CK	exploration en conception innovante avec CK	mesure, expérimentation, prototypage, calcul.	Validation de projet classique
Article 3 SNCF	outils : boîte à idées + acteurs: experts	Endogène aux opérations	Recherche dans le système de règle : l'adéquation ou l'indépendance avec la règle, ou retrouver les anciennes règles	Par manager connaissant les règles, ou expert de la règle

Article 4 STMicroelectronics	ingénieur.e responsable du changement se basant sur les anciennes analyses de risque	enquête de l'ingénieur.e responsable éventuellement auprès d'expert.e.s	passage dans les 3 comités, renforcement de la preuve, dialogue ingénieur.e et expert.e.s	3 comités, archivage pour le changement suivant, et apprentissage
---------------------------------	---	---	--	---

Quelles sont les ressources et les compétences nécessaires à la révision du système de règles ? Finalement, cette description du processus de révision du système de règles permet de retenir un ensemble de ressources génériques favorisant l'exploration dans le système de règles, la formation de la preuve, et la validation.

La capacité à arpenter le système de règles peut être encouragée par des personnes compétentes en exploration dans le système de règles et en défixation : dans le cas d'Airbus Saint-Nazaire, le rôle de leader défixateur qu'a joué un des managers a permis aux équipes de rebondir sur les connaissances rencontrées et les concepts discutés. En tant que leader défixateur, il a mis son équipe en capacité de défixer, c'est-à-dire de ne pas rester dans le spectre de solution couramment utilisées en usine (Ezzat, 2017). De plus, dans nos trois cas empiriques, les expert.e.s de la production et du système de règles ont été d'un précieux recours pour les équipes en train de reconcevoir la règle.

Les compétences en conception ont également été importantes pour la réussite des projets dans les trois terrains. En particulier, la capacité à rendre robuste la nouvelle règle, à la tester, et démontrer qu'elle s'intègre bien au système nécessite une attention particulière à la phase d'expérimentation, au prototypage, tests, de mise au point de mesures, etc. Cela plaide pour la formation des équipes dans l'activité de conception de révision de la règle.

Par ailleurs, pour réaliser ces étapes, des ressources physiques sont nécessaires : lieu de réunion et d'expérimentation, disponibilité des opérateur.rice.s sur leur temps de travail, capacités de prototypage, possibilité de déplacement pour aller acquérir des connaissances hors de l'usine, etc. Le soutien du management est donc un préalable indispensable à l'intensification de la révision du système de règles. Dans le cas de l'usine Airbus, les ateliers ont également été facilités par la présence d'un climat propice à l'implication de tou.te.s dans l'activité conceptrice, via un management responsabilisant

6.3. Tableau de synthèse

Les résultats de cette partie sont synthétisés selon les contributions de chaque article aux questions générales (Cf. Tableau 18).

Tableau 17 : Synthèse des contributions des réponses aux question de recherche générales

Article/terrain/apport principal	Contribution à la question de recherche 1 Comment modéliser le renouvellement d'un système de règles en usine ?	Contribution à la question de recherche 2 Quelles méthodes, organisations, et ressources sont nécessaires pour cela ?
ARTICLE 1 modélisation d'un système de règle faisant patrimoine de création et de son évolution, avec CK-topos	Mise en modèle du processus de régénération du patrimoine de création des règles	4 étapes mobilisant chacune un effort de conception : Recherche de la catégorie ; proposition d'une nouvelle règle ; démonstration ; validation
ARTICLE 2 Airbus Mise en évidence un régime de conception en usine modifiant les règles tout en s'insérant dans le patrimoine existant	Visibilisation de la conception de la preuve de l'adéquation de la nouvelle règle au patrimoine	Etapes de la recherche de la catégorie et de la démonstration très visible Mise en place de moyens issus de la conception innovante mais adapté au système de règles: leader défixateur pour arpenter le système et trouver des solutions, mesure, expérimentations, prototypage, ressources en dehors de l'usine.
Article 3 SNCF Mise en évidence du rapport à la règle lors de l'amélioration continue via la boîte à idées et des différents types de conception que l'outil permet	Rapport à la règle dans la conception particulièrement manifeste ; Régimes de conception différents dans la même usine Système de règles relativement stable	Étape de la recherche dans le système de règle et de la preuve très visible . régime de reconception de la règle pour certains cas, mais dans la grande majorité, validation au regard du système pour optimiser la règle ou pour en créer une indépendante au système. La boîte à idées explicite le rapport à la règle. Elle permet de voir s'organiser la validation simple pour les cas d'amélioration de la règle ou d'indépendance, et les cas plus subtils où il faut retrouver la bonne règle et parfois la réviser
ARTICLE 4 STMicroelectronics Mise à jour de la stratégie d'évolution des règles et des logiques de patrimoine de création pour rendre routinière l'évolution du système de règles	Mise en évidence du régime de la preuve par conception à partir du patrimoine. Performance de la révision du système de règles : rapide et fiable Révision devenue routine	Processus intensif de révision de règles Les quatre étapes sont organisées, standardisées, et comportent un fort degré de conception. Le patrimoine de création et son écart guide le raisonnement sur la base des données de production et de l'expérience des expert.e.s

7. Discussion

Cette partie reprend dans un premier temps les questions et les résultats de la thèse, avant de ré-ouvrir certaines hypothèses que nous avons fermées en introduction.

7.1. Reprise de l'argumentation et des apports de la thèse

Dès l'introduction, les impératifs contemporains des transformations de l'industrie nous ont amené à interroger les rouages de l'évolution des systèmes de règles de l'usine. Dès lors, nous avons envisagé le dépassement du modèle des rapports de prescription réciproque, et formulé la question de l'existence d'un modèle de révision des règles alternatif. Tout en esquissant son principe dans un postulat hypothétique – l'usine pourrait se passer des organes prescripteurs habituels et reconcevoir elle-même ses propres règles – nous ne connaissions ni le réglage fin de la re-conception de règles par et pour l'usine, ni les conditions d'existence d'un tel modèle. Deux énigmes se posaient en particulier à nous : la possibilité de concevoir des règles nouvelles qui soient compatibles avec le système de règles en place, et les conditions de déploiement d'une activité conceptrice en usine.

La revue de littérature nous a permis de retrouver les rapports entretenus par l'usine avec la prescription, et les modalités de révisions des règles déjà identifiées par la littérature. Il nous a également fallu reprendre la littérature en théorie de la conception pour retrouver des traces de modélisation d'une forme de conception préservatrice du patrimoine sur lequel elle s'échafaude.

Pour aller plus loin dans l'investigation, nous avons posé une question principale : [QR principale] Comment renouveler un système de règles en usine ? Nous avons choisi de traiter cette question sous deux axes, correspondant aux deux questions de recherche. Premièrement, la modélisation de la révision des règles : Comment modéliser la reconception d'un système de règles en usine ? [QR1]. Deuxièmement, les conditions de son opérationnalisation : Quelles méthodes, organisation et ressources pour cela ? [QR2].

Notre approche s'est fondée sur une recherche-intervention entre nos trois terrains de recherche, qui présentaient chacun des caractéristiques industrielles propres : l'usine Airbus à Saint-Nazaire, le technicentre SNCF à Nantes, et l'usine STMicroelectronics à Crolles. La constitution progressive d'un modèle général de révision des règles en usine a instrumenté notre démarche et faisait progresser nos enquêtes sur les terrains, en même temps qu'il mutait peu à peu vers sa forme finale. De nos investigations, quatre articles ont été écrits correspondant aux problématiques locales que nous avons rencontrées. Ces articles nous permettent de répondre à nos deux questions de recherche générales. La thèse apporte ainsi un modèle de la re-conception du système de règles mobilisant le formalisme CK-topos pour représenter les différents régimes de conception dans un patrimoine de création [Résultat 1]. Pour rendre l'usine conceptrice de son patrimoine de création, l'organisation doit permettre de

réaliser les moments-clé de la re-conception des règles : la recherche dans le système de règle, la proposition d'une nouvelle règle, la preuve que cette nouvelle règle est bien compatible avec le système, et la validation. La réalisation de ces moments clés est favorisée par des compétences en conception des équipes, le guidage du processus par un leader défixateur, l'accessibilité des experts de la règle, et des moyens matériels nécessaires à l'activité de conception (temps, moyens de prototypage et d'expérimentation, soutien du management, etc.) [Résultat 2].

A l'aune de ces résultats, nous pouvons à présent ré-ouvrir certaines questions théoriques et conditions empiriques que nous avons fermées dès l'introduction pour cibler notre propos.

7.2. Les rapports entre l'usine et le bureau d'études

Nous avons focalisé notre recherche sur la re-conception des règles par l'usine. Nous cherchions à connaître le potentiel de l'usine pour faire ce qui est traditionnellement réservé au bureau d'études. Nous pouvons désormais reprendre les cadres classiques et la séparation entre BE et usine, et comprendre ce que nos résultats peuvent en dire.

Nous avons interprétations possibles de nos expériences et de ce qu'elles en disent sur l'évolution des rapports entre BE et production. L'usine conceptrice peut être vue comme une usine capable de prescrire son BE et d'entretenir une relation de prescription réciproque très intense, bien au-delà de la simple amélioration de la prescription (évolution 1). On peut aussi voir dans l'usine conceptrice une évolution de la production vers une fonction de plus en plus conceptive, une usine de plus en plus BE elle-même (évolution 2).

Avec l'évolution 1, nous restons dans un cadre classique, avec néanmoins une division du travail entre conception et exécution moins stricte que de coutume : le BE conçoit les produits et l'industrialisation, l'usine exécute la prescription, mais aussi conçoit et reconçoit son industrialisation. Les cas empiriques à la SNCF et Airbus vont dans ce sens : pour certains sujets, l'usine peut faire mieux qu'améliorer les règles, et s'emparer elle-même de champs d'exploration pour faire évoluer son système de règle. Le BE peut prendre place au processus de conception de la règle, par la participation d'experts de la règle par exemple (chez Airbus et SNCF) dans le processus de conception, pour une consultation sur des questions particulières lors de la recherche de solution, ou encore par la participation à des ateliers de conception innovantes où l'usine et le BE sont parties prenantes dans un processus plus générale (pour les ateliers KCP sur la maintenance agile à la SNCF par exemple). Si on pousse cette logique à l'extrême, on retrouve la lignée de ce que la littérature nomme le co-design des systèmes de production : en tant qu'utilisatrice du système, l'usine connaît mieux ses besoins, les potentiels défauts des systèmes, les problèmes techniques ou d'organisation pouvant advenir, etc. Elle a donc sa place dans la conception du système de production, afin d'avoir une meilleure intégration des

contraintes de la production dans la prescription (Lumsakul et al., 2018). Les ergonomes ont notamment souligné l'intérêt de cette approche pour avoir des systèmes de production 4.0 adaptés physiquement et cognitivement aux opérateurs (Kadir et al., 2019). Toutefois, la littérature s'intéresse à la question de la nouvelle industrialisation, sans patrimoine. Nos résultats donnent à voir comment la collaboration usine-BE pourrait s'organiser pour la révision du système de règles. Notre modèle permet notamment de rendre visible un processus, que les acteurs (l'usine et le BE, mais aussi les autres parties prenantes éventuelles, fournisseurs, clients, organismes normalisateurs, etc.) peuvent saisir collectivement. Si notre travail a porté sur le rôle de l'usine dans ce processus ; d'autres recherches théoriques et empiriques pourraient mettre l'accent sur le potentiel du modèle à soutenir une conception collaborative pour la révision du système de règles.

Dans le cas de l'évolution 2, le pas théorique est sans doute plus grand : l'usine deviendrait elle-même un BE. Chez STMicroelectronics, la reconception des règles était devenue routinière, remarquablement organisée et efficace (puisqu'elle permettait d'atteindre simultanément un fort degré de changement du système productifs et un niveau de défaillance extrêmement faible). Elle ne concernait pas seulement quelques ingénieurs spécialistes en changement, mais était le quotidien de tous les ingénieurs de production. L'usine s'occupe non plus seulement d'exécuter, mais aussi d'organiser et d'opérer son évolution, et de réagir aux crises : concevoir des modes d'enquête sur les crises pour comprendre les pannes nouvelles, remodeler le système de production, et enfin retrouver le mode nominal des opérations. La production devient alors le lieu de la gestion du patrimoine de création, soutenant l'exécution des opérations par les machines et la reconception du système de règle par les humains. Cela précise la littérature sur les activités des opérateurs 4.0. Si le travail d'exécution physique tend à disparaître, il n'en reste pas moins une activité intense de résolution de problèmes complexes et de mise à jour de l'inconnu dispersé dans le système de production et ses données. L'industrie 4.0 augmente l'avènement de situations imprévisibles et de phénomènes pas encore connus. Le travail « non routinier » devient la gestion courante de l'usine (Böhle & Milkau, 1988; Dregger et al., 2016; Pfeiffer, 2018). La littérature met l'accent sur le besoin d'expérience des opérateurs, qui se comprend comme le nombre élevé de fois où ils ont dû faire face à des situations inédites et se traduit par une habilité à être « créatif » face au problème, à avoir des intuitions, ou encore à avoir développé une certaine sensibilité au comportement des machines (Böhle & Milkau, 1988; Pfeiffer, 2016). Notre recherche précise les contours de cette « expérience » et l'explique par la capacité de re-conception de règles des acteurs, notamment leur habilité à parcourir le système de règles, à le remodeler, à rendre la règle compatible avec le système, etc.

7.3. Les compétences et les formations, et les leviers institutionnels pour l'usine conceptrice

En introduction, nous avons d'emblée limité notre périmètre d'analyse aux systèmes de règles qui donnaient des signes d'évolution, avec une activité de conception de règles perceptible, une volonté des managers de transformer l'usine. Nous avons exclu les systèmes qui ne semblaient pas prêt à évoluer en dehors de la prescription du BE. Nous avons remarqué que la rigidité du système de règles était difficilement prédictible. Par exemple, nous ne nous attendions pas à voir une usine du secteur aéronautique pourtant très normée expérimenter des démarches conceptrices innovantes.

On peut maintenant ré-ouvrir la question aux systèmes contraints, ou encore non conceptifs, et se demander quels enseignements peuvent fournir notre travail ? Comment rendre conceptrice une usine ? Et plus largement, au sein d'un collectif (une filière, une région, un pays), comment organiser la montée en compétence des équipes pour des usines conceptrices ?

Le résultat 2 nous donne des pistes pour l'opérationnalisation de la reconception du système de règles. Mais quel impact aurait notre recherche sur les formations à donner aux opérateur.ice.s ainsi qu'aux ingénieur.e.s ?

Nous pouvons d'ores et déjà mentionner que nos résultats s'appliquent peuvent s'appliquer qu'à des portions limitées de l'usine : si le système de règles est hétérogène, on peut s'attendre à voir s'implanter l'usine conceptrice par émergence, pour certaines activités sans nécessairement se généraliser à l'ensemble de la production. Comme Airbus Saint-Nazaire, la démarche de reconception de se prête certainement mieux à certains sujets, ceux que les outils habituels en production n'arrivent pas à résoudre.

Par ailleurs, sur la formation et les compétences à acquérir pour rendre l'usine conceptrice, deux niveaux peuvent être distingués.

D'une part, au niveau individuel, il s'agit de former les opérateur.ice.s ainsi que les ingénieur.e.s de production. Comme nous l'avons vu en revue de littérature, (Pfeiffer, 2016, 2018) indique, dans la lignée des travaux sur l'automatisation des années 1980 (Böhle & Milkau, 1988), que les opérateur.ice.s doivent avoir de l'expérience, de l'intuition et de la créativité pour affronter l'inconnu. Notre travail renforce ce constat, en précisant toutefois que cette capacité à raisonner dans l'inconnu des systèmes de règles est caractéristique de la démarche conceptrice mise à jour dans la thèse. Cependant, la conception est ici d'un type particulier : elle se fait sous la contrainte de l'omniprésence de la règle, qu'il s'agit d'explorer, de remettre à jour, de faire évoluer. Quant aux ingénieurs, il s'agirait de les rendre capables d'être prescripteurs d'acteurs concepteurs, s'ils doivent générer et soutenir une activité de conception dans l'usine. Par exemple, ils pourraient comprendre quelles seraient les

machines à fournir, l'organisation, les moyens pour favoriser une telle activité. De plus des futures recherches pourraient être conduites sur le management qui permettrait de renforcer ces pratiques.

D'autre part, au niveau collectif, nous avons montré dans nos résultats que l'usine conceptrice ne se limite pas à la somme de capacité individuelles. Elle nécessite une organisation, des procédés plus ou moins standardisés, des moyens de coordination, etc. La formation pour l'usine conceptrice devrait donc également prendre en compte ce volet.

Enfin, au niveau des leviers institutionnels, on peut constater que faire advenir une usine conceptrice est bien différent d'en faire revenir une. Les procédés, les compétences, les façons d'évoluer seront sans doute différentes. Pour renforcer ce mouvement, la puissance publique pourrait non pas financer l'achat de technologies existantes, mais plutôt être attentive à la dimension conceptrice, à la nature du système de règles et à sa capacité à se transformer et à éventuellement à donner des objectifs à ces systèmes de règles afin d'orienter les choix des industriels. Sur le plan de la formation des futures opérateur.rice.s et ingénieur de l'usine à l'échelle d'un pays, (Pfeiffer, 2018) souligne l'intérêt du « dual system » allemand, qui institutionnalise et valorise un double parcours de formation, comportant une filière technique mêlant apports théoriques de haut niveau et rapport étroit au terrain, aux machines et aux données, et aux expérimentations.

Bibliographie

Aggeri, F. (2016). 4. La recherche-intervention: Fondements et pratiques: In *À la pointe du management* (pp. 79–100). Dunod. <https://doi.org/10.3917/dunod.barth.2016.01.0079>

Aghion, P., Antonin, C., & Bunel, S. (2021). The power of creative destruction. In *The Power of Creative Destruction*. Harvard University Press.

Ahire, S. L., Landeros, R., & Golhar, D. Y. (1995). Total Quality Management: A Literature Review and an Agenda for Future Research. *Production and Operations Management*, 4(3), 277–306. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.1995.tb00057.x>

Alter, N. (1999). La gestion du désordre en entreprise. *La Gestion Du Désordre En Entreprise*, 1–208.

Azamfar, M., Li, X., & Lee, J. (2020). Deep Learning-Based Domain Adaptation Method for Fault Diagnosis in Semiconductor Manufacturing. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 33(3), 445–453. <https://doi.org/10.1109/TSM.2020.2995548>

Babeau, O., & Chanlat, J.-F. (2008). La transgression, une dimension oubliée de l'organisation. *Revue française de gestion*, 34(183), 201–219. <https://doi.org/10.3166/rfg.183.201-219>

Babeau, O., & Chanlat, J.-F. (2011). Déviance ordinaire, innovation et gestion. L'apport de Norbert Alter. *Revue française de gestion*, 210(1), 33–50.

Barker, M., & Neailey, K. (1999). From individual learning to project team learning and innovation: A structured approach. *Journal of Workplace Learning*, 11(2), 60–67. <https://doi.org/10.1108/13665629910260752>

Barney, H., & Kirby, S. N. (2022). *Toyota Production System/Lean Manufacturing*. 17.

Basse, I., Schmitt, S., Gartzén, T., & Schmitt, R. (2014). Solution Principles for Managing Instabilities in Ramp-up. *Procedia CIRP*, 20, 93–97. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.154>

Boenisch, G. (2014). Fabien Eychenne, Fab lab. L'avant garde de la nouvelle révolution industrielle. *Questions de communication*, 25, 433–434.

Böhle, F., & Milkau, B. (1988). Computerised manufacturing and empirical knowledge. *AI & SOCIETY*, 2(3), 235–243. <https://doi.org/10.1007/BF01908546>

Boileau, A., & Joyal, A. (1981). La logique des topos. *The Journal of Symbolic Logic*, 46(1), 6–16.

Borzèix, A., & Linhart, D. (1988). La participation: Un clair-obscur. *Sociologie Du Travail*, 30(1), 37–53.

Bourgeois III, L. J. (1981). On the measurement of organizational slack. *Academy of Management Review*, 6(1), 29–39.

Brossard, M. (2005). Les limites du modèle-type du fonctionnement des cercles de qualité. *Relations industrielles*, 44(3), 552–568. <https://doi.org/10.7202/050514ar>

Büchi, G., Cugno, M., & Castagnoli, R. (2020). Smart factory performance and Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 150, 119790. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119790>

Buech, V. I. D., Michel, A., & Sonntag, K. (2010). Suggestion systems in organizations: What motivates employees to submit suggestions? *European Journal of Innovation Management*, 13(4), 507–525. <https://doi.org/10.1108/14601061011086311>

Cabanes, B., Hubac, S., Le Masson, P., & Weil, B. (2021). Improving reliability engineering in product development based on design theory: The case of FMEA in the semiconductor industry. *Research in Engineering Design*, 32(3), 309–329. <https://doi.org/10.1007/s00163-021-00360-1>

Cahier, M.-L., & Pellerin, F. (2019). *Organisation et compétences dans l'usine du futur* (Les Notes de La Fabrique, Vol. 28). Presses des Mines.

Caillé, A. (2020). *Innovation managériale au sein d'une industrie aéronautique: Étude de l'effet des pratiques managériales habilitantes sur le bien-être et la performance des salariés*. Nantes.

Caloghirou, Y., Kastelli, I., & Tsakanikas, A. (2004). Internal capabilities and external knowledge sources: Complements or substitutes for innovative performance? *Technovation*, 24(1), 29–39.

Carnevale, D. G., & Sharp, B. S. (1993). The old employee suggestion box: An undervalued force for productivity improvement. *Review of Public Personnel Administration*, 13(2), 82–92.

Carrier, C. (1998). Employee Creativity and Suggestion Programs: An Empirical Study. *Creativity and Innovation Management*, 7(2), 62–72. <https://doi.org/10.1111/1467-8691.00090>

Carvajal Pérez, D., Le Masson, P., Weil, B., Araud, A., & Chaperon, V. (2020). Creative heritage: Overcoming tensions between innovation and tradition in the luxury industry. *Creativity and Innovation Management*, 29, 140–151.

Carvajal perez, D., Masson, P. L., & Weil, B. (2018). *Managing Dom Pérignon's creative heritage: Modelling and organising the transmission of knowledge for generativity* [Université Paris sciences et lettres]. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03092291>

Charue-Duboc, F., Aggeri, F., Chanal, V., & Garel, G. (2010, May 19). *Managing exploratory innovation*. Back to the Future. <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00496341>

Cheref, A. (2017). *Méthodes de recherche opérationnelle pour la résolution de problèmes intégrés d'ordonnement de la production et de distribution* [Theses, Université de Tours - LIFAT]. <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-03578035>

Chevalier, F. (1989). *L'histoire véritable des cercles de qualité-cinq ans d'enquête*. HEC PARIS.

Chukwuekwe, D. O., Schjøberg, P., Rødseth, H., & Stuber, A. (n.d.). *Reliable, Robust and Resilient Systems: Towards Development of a Predictive Maintenance Concept within the Industry 4.0 Environment*. 11.

Coenen, L., & López, F. J. D. (2010). Comparing systems approaches to innovation and technological change for sustainable and competitive economies: An explorative study into conceptual commonalities, differences and complementarities. *Journal of Cleaner Production*, 18(12), 1149–1160.

Crama, Y. (2002). *Gestion de La Production*. <https://fdocuments.fr/document/gestion-de-la-production-yves-crama.html>

Crama, Y., & Dupont, L. (n.d.). *RECHERCHE OPERATIONNELLE ET GESTION DE LA PRODUCTION*. 16.

Crozier, M., & Friedberg, E. (1977). *L'acteur et le système*.

Cyert, R. M., & March, J. G. (1963). *A behavioral theory of the firm* (Vol. 2). Englewood Cliffs, NJ.

David, A. (2012). *La recherche-intervention, cadre général pour la recherche en management?*

Decréau, L. (2018). Tempête sur les représentations du travail. *Manuel-Intellectuel, Voie pro-Voie Générale, Col Bleu-Col Blanc, Presses Des Mines, Paris*.

Dejours, C., & Molinier, P. (1994). Le travail comme énigme. *Sociologie du travail*, 36(1), 35–44. <https://doi.org/10.3406/sotra.1994.2147>

Denis, J. (2007). La prescription ordinaire. Circulation et énonciation des règles au travail. *Sociologie du travail*, 49(4), 496–513. <https://doi.org/10.4000/sdt.22973>

Detchessahar, M., & Honoré, L. (2002). Fonctionnement et performance des équipes autonomes: Le cas d'un atelier de soudure des Chantiers de l'Atlantique. *Finance Contrôle Stratégie*, 5(1), 43–75.

Dewar, R. D., & Dutton, J. E. (1986). The Adoption of Radical and Incremental Innovations: An Empirical Analysis. *Management Science*, 32(11), 1422–1433. JSTOR.

Dorst, K. (2006). Design Problems and Design Paradoxes. *Design Issues*, 22(3), 14.

Dregger, J., Niehaus, J., Ittermann, P., Hirsch-Kreinsen, H., & ten Hompel, M. (2016). The digitization of manufacturing and its societal challenges: A framework for the future of industrial labor. *2016 IEEE International Symposium on Ethics in Engineering, Science and Technology (ETHICS)*, 1–3.

Ellegård, K., Jonsson, D., Engström, T., Johansson, M. I., Medbo, L., & Johansson, B. (1992). Reflective Production in the Final Assembly of Motor Vehicles – An Emerging Swedish Challenge. *International Journal of Operations & Production Management*, 12(7/8), 117–133. <https://doi.org/10.1108/EUM0000000001307>

Engwall, M., & Svensson, C. (2004). Cheetah teams in product development: The most extreme form of temporary organization? *Scandinavian Journal of Management*, 20(3), 297–317. <https://doi.org/10.1016/j.scaman.2003.05.001>

Ezzat, H. (2017). Leader for creativity: Modelling and experimenting defixation-oriented leadership. *PSL Research University, Paris*.

Fairbank, J. F., & Williams, S. D. (2001). Motivating Creativity and Enhancing Innovation through Employee Suggestion System Technology. *Creativity and Innovation Management*, 10(2), 68–74. <https://doi.org/10.1111/1467-8691.00204>

Flatscher, M., & Riel, A. (2016). Stakeholder integration for the successful product–process co-design for next-generation manufacturing technologies. *CIRP Annals*, 65(1), 181–184. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.055>

Forty, A. (1986). *Objects of desire*. Pantheon.

Gebbe, C., Hilmer, S., Götz, G., Lutter-Günther, M., Chen, Q., Unterberger, E., Glasschröder, J., Schmidt, V., Riss, F., Kamps, T., Tammer, C., Seidel, C., Braunreuther, S., & Reinhart, G. (2015). Concept of the Green Factory Bavaria in Augsburg. *Procedia CIRP*, 32, 53–57. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.214>

Gerber, A., Derckx, P., Döppner, D. A., & Schoder, D. (2020). *Conceptualization of the human-machine symbiosis—A literature review*.

Getz, I., & Carney, B. M. (2012). *Liberté & Cie: Quand la liberté des salariés fait le bonheur des entreprises*. Fayard.

Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869.

Gilain, A. (2021). *Economic evaluation of designing in the unknown: Design theory-based models beyond decision theory under uncertainty*. Université Paris sciences et lettres.

Gilbert, P., Raulet-Croset, N., & Teglborg, A.-C. (2017). «L'entreprise libérée»: Analyse de la diffusion d'un modèle managérial. *Revue Internationale de Psychosociologie et de Gestion Des Comportements Organisationnels*, 56, 205–224.

Graves, S. C., Kan, A. H. G. R., & Zipkin, P. H. (1993). *Logistics of Production and Inventory*. Elsevier.

Griffin, M. A., Neal, A., & Parker, S. K. (2007). A new model of work role performance: Positive behavior in uncertain and interdependent contexts. *Academy of Management Journal*, 50(2), 327–347.

Groux, G., Lévy, C., & Levy, C. (1985). Mobilisation collective et productivité économique: Le cas des " cercles de qualité " dans la sidérurgie. *Revue Française de Sociologie*, 26(1), 70. <https://doi.org/10.2307/3321804>

Guo, J., Zhao, N., Sun, L., & Zhang, S. (2019). Modular based flexible digital twin for factory design. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(3), 1189–1200.

Hatchuel, A. (1996). Coopération et conception collective. Variété et crises des rapports de prescription. *Coopération et Conception*, 1996, 101–122.

Hatchuel, A. (2001). Towards Design Theory and expandable rationality: The unfinished program of Herbert Simon. *Journal of Management and Governance*, 5(3/4), 260–273.

Hatchuel, A., & Chen, M. K. (2017). Creativity under Strong Constraints: The Hidden Influence of Design Models. *European Review*, 25(2), 194–207. <http://dx.doi.org/10.1017/S1062798716000557>

Hatchuel, A., Masson, P. L., 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. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.160>

Hatchuel, A., & Weil, B. (2003). A new approach of innovative Design: An introduction to CK theory. *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm*.

Herrmann, T., Roth, D., & Binz, H. (2020). FRAMEWORK OF AN AMBIDEXTROUS PROCESS OF IDEA MANAGEMENT SUPPORTING THE DOWNSTREAM PRODUCT DEVELOPMENT PROCESS. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, 587–596.

Hooge, S., Dalmaso, C., & Garcias, F. (2018). Is intrapreneurship scalable? The challenge of managing a massive internal startup call. *R&D Management Conference 2018*.

Hooge, S., Pezaku, K., Dalmaso, C., & Levillain, K. (2022) Piloter le patrimoine industriel pour gérer la transformation « 4.0 » : le cas de la Haute Horlogerie, ST-AIMS 03 : Industrie du futur : vers un nouveau paradigme industriel ? Actes de XXXI^{ème} conférence de l'AIMS, Annecy, 1-3 juin 2022.

Iwao, S. (2017). Revisiting the existing notion of continuous improvement (Kaizen): Literature review and field research of Toyota from a perspective of innovation. *Evolutionary and Institutional Economics Review*, 14(1), 29–59.

Janssoone, D. (1999). De la boîte à idées... à l'innovation. *Revue Generale Des Chemins de Fer*, 1999(9), 11–19.

Jobin, C. (2022). *La preuve de concept comme outil de développement des capacités de générativité collective: Modélisation, expérimentation et conditions de performance*. Université Paris sciences et lettres.

Kaasinen, E., Schmalfuß, F., Öztürk, C., Aromaa, S., Boubekour, M., Heilala, J., Heikkilä, P., Kuula, T., Liinasuo, M., Mach, S., Mehta, R., Petäjä, E., & Walter, T. (2020). Empowering and engaging industrial workers with Operator 4.0 solutions. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105678. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.052>

Kadir, B. A., Broberg, O., & Conceição, C. S. da. (2019). Current research and future perspectives on human factors and ergonomics in Industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106004. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106004>

Kidder, T. (2011). *The soul of a new machine*. Hachette UK.

Kim, W. C., & Mauborgne, R. (2019). Nondisruptive creation: Rethinking innovation and growth. *MIT Sloan Management Review*, 60(3), 46–55.

Knol, W. H., Slomp, J., Schouteten, R. L. J., & Lauche, K. (2018). The relative importance of improvement routines for implementing lean practices. *International Journal of Operations & Production Management*, 39(2), 214–237. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-01-2018-0010>

Kohler, D., & Weisz, J.-D. (2016). *Industrie 4.0: Les défis de la transformation numérique du modèle industriel allemand*. La Documentation française Paris.

Kohler, D., & Weisz, J.-D. (2018). Industrie 4.0, une révolution industrielle et sociétale. *Futuribles*, 424(3), 47–68. <https://doi.org/10.3917/futur.424.0047>

Kong, X. T., Luo, H., Huang, G. Q., & Yang, X. (2019). Industrial wearable system: The human-centric empowering technology in Industry 4.0. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30(8), 2853–2869.

Koren, Y., & Shpitalni, M. (2010). Design of reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 29(4), 130–141. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.01.001>

Krishnan, V., & Ulrich, K. T. (2001). Product development decisions: A review of the literature. *Management Science*, 47(1), 1–21.

Lallé, B. (2004). Production de la connaissance et de l'action en sciences de gestion. Le statut expérimenté de « chercheur-acteur ». *Revue française de gestion*, 158(1), 45–65. <https://doi.org/10.3166/rfg.148.45-65>

Lamonde, F., & Montreuil, S. (2005). Le travail humain, l'ergonomie et les relations industrielles. *Relations industrielles*, 50(4), 695–740. <https://doi.org/10.7202/051051ar>

Lamouri, S., & Thomas, A. (2019). Juste à temps et qualité totale: Concepts et outils. *Logistique*. <https://doi.org/10.51257/a-v2-ag5190>

Laousse, D. (2018). *L'institutionnalisation de l'innovation intensive dans les transports publics. Industrialiser, métaboliser, et gouverner l'innovation*. Mines ParisTech-PSL University.

Lawvere, F. W. (1964). An elementary theory of the category of sets. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 52(6), 1506.

Le Masson, P., Hatchuel, A., & Weil, B. (2009). Design Theory and Collective Creativity: A Theoretical Framework to Evaluate KCP Process. *DS 58-6: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 6, Design Methods and Tools (Pt. 2), Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08.2009*, 277–288.

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*, 1, 51–73.

Lenfle, S., & Midler, C. (2009). The launch of innovative product-related services: Lessons from automotive telematics. *Research Policy*, 38(1), 156–169. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2008.10.020>

Leveque, J. (2022, March 30). *Concevoir la mission comme un engagement génératif: Enjeux, écueils et principes de formulation pour les sociétés à mission*. [Http://Www.Theses.Fr](http://www.theses.fr). <http://www.theses.fr/s185432>

Li, Y., Vanhaverbeke, W., & Schoenmakers, W. (2008). Exploration and Exploitation in Innovation: Reframing the Interpretation. *Creativity and Innovation Management*, 17(2), 107–126. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8691.2008.00477.x>

Lumsakul, P., Sheldrick, L., & Rahimifard, S. (2018). The Sustainable Co-Design of Products and Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 21, 854–861. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.193>

Mattsson, S., Fast-Berglund, Å., Li, D., & Thorvald, P. (2020). Forming a cognitive automation strategy for Operator 4.0 in complex assembly. *Computers & Industrial Engineering*, 139, 105360. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.08.011>

Moica, S., Harea, C. V., & Marian, L. (2018). Effects of suggestion system on continuous improvement: A case study. *2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 592–596.

Nahavandi, S. (2017). Trusted autonomy between humans and robots: Toward human-on-the-loop in robotics and autonomous systems. *IEEE Systems, Man, and Cybernetics Magazine*, 3(1), 10–17.

Nara, L. A. (2013). The importance of considering the highly improbable (aka Black Swan Events). *Chemical Engineering Progress*, 109(2), 20–20.

Neagoe, L. N. (2009). *EMPLOYEE SUGGESTION SYSTEM (KAIZEN TEIAN) THE BOTTOM-UP APPROACH FOR PRODUCTIVITY IMPROVEMENT*. 10(3), 6.

- Nelles, J., Kuz, S., Mertens, A., & Schlick, C. M. (2016). Human-centered design of assistance systems for production planning and control: The role of the human in Industry 4.0. *2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2099–2104. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2016.7475093>
- Osterrieder, P., Budde, L., & Friedli, T. (2020). The smart factory as a key construct of industry 4.0: A systematic literature review. *International Journal of Production Economics*, *221*, 107476. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.08.011>
- Paton, B., & Dorst, K. (2011). Briefing and reframing: A situated practice. *Design Studies*, *32*(6), 573–587.
- Pessot, E., Zangiacomì, A., Battistella, C., Rocchi, V., Sala, A., & Sacco, M. (2020). What matters in implementing the Factory of the Future: Insights from a survey in European manufacturing regions. *Journal of Manufacturing Technology Management*.
- Pfeiffer, S. (2016). Robots, Industry 4.0 and humans, or why assembly work is more than routine work. *Societies*, *6*(2), 16.
- Pfeiffer, S. (2018). The `Future of Employment` on the Shop Floor: Why Production Jobs are Less Susceptible to Computerization than Assumed. *International Journal for Research in Vocational Education and Training*, *5*(3), 208–225. <https://doi.org/10.13152/IJRVED.5.3.4>
- Recht, R., & Wilderom, C. (1998). Kaizen and culture: On the transferability of Japanese suggestion systems. *International Business Review*, *7*(1), 7–22. [https://doi.org/10.1016/S0969-5931\(97\)00048-6](https://doi.org/10.1016/S0969-5931(97)00048-6)
- Reynaud, E., & Reynaud, J.-D. (1994). La Régulation Conjointe Et Ses Dérèglements. *Le Travail Humain*, *57*(3), 227–238.
- Reynaud, J.-D. (1995). *Le conflit, la négociation et la règle*. Octares Ed.
- Rhodes, L., & Dawson, R. (2013). Lessons Learned from Lessons Learned. *Knowledge and Process Management*, *20*(3), 154–160. <https://doi.org/10.1002/kpm.1415>
- Roethlisberger, F. J. (1939). And WJ Dickson. *Management and the Worker*.
- Romero, D., Bernus, P., Noran, O., Stahre, J., & Fast-Berglund, Å. (2016). The Operator 4.0: Human Cyber-Physical Systems & Adaptive Automation Towards Human-Automation Symbiosis Work Systems. In I. Nääs, O. Vendrametto, J. Mendes Reis, R. F. Gonçalves, M. T. Silva, G. von Cieminski, & D. Kiritsis (Eds.), *Advances in Production Management Systems. Initiatives for a Sustainable World* (pp. 677–686). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51133-7_80
- Romero, D., Stahre, J., Wuest, T., Noran, O., Bernus, P., Fast-Berglund, Å., & Gorecky, D. (2016). *TOWARDS AN OPERATOR 4.0 TYPOLOGY: A HUMAN-CENTRIC PERSPECTIVE ON THE FOURTH INDUSTRIAL REVOLUTION TECHNOLOGIES*. 12.

Roucoules, L., Yahia, E., Es Soufi, W., & Tichkiewitch, S. (2016). Engineering design memory for design rationale and change management toward innovation. *CIRP Annals*, 65(1), 193–196. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.046>

Rumpala, Y. (2014). « Fab labs », « makerspaces »: Entre innovation et émancipation ? *Revue internationale de l'économie sociale: Recma*, 334, 85. <https://doi.org/10.7202/1027278ar>

Sanchez, L., & Blanco, B. (2014). Three decades of continuous improvement. *Total Quality Management & Business Excellence*, 25(9–10), 986–1001.

Sanchis, R., García-Perales, Ó., Fraile, F., & Poler, R. (2019). Low-code as enabler of digital transformation in manufacturing industry. *Applied Sciences*, 10(1), 12.

Sandberg, Å. (1995). *Enriching Production: Perspectives on Volvo's Uddevalla plant as an alternative to lean production* [MPRA Paper]. <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/10785/>

Sandstrom, C., & Bjork, J. (2010). Idea management systems for a changing innovation landscape. *International Journal of Product Development*, 11(3/4), 310. <https://doi.org/10.1504/IJPD.2010.033964>

Scheuermann, C., Verclas, S., & Bruegge, B. (2015). Agile Factory—An Example of an Industry 4.0 Manufacturing Process. *2015 IEEE 3rd International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications*, 43–47. <https://doi.org/10.1109/CPSNA.2015.17>

Schmidt, J. B., Sarangee, K. R., & Montoya, M. M. (2009). Exploring new product development project review practices. *Journal of Product Innovation Management*, 26(5), 520–535.

Schön, D. A. (1990). The design process. *Varieties of Thinking: Essays from Harvard's Philosophy of Education Research Center*, 110–141.

Schumpeter, J. (1942). Creative destruction. *Capitalism, Socialism and Democracy*, 825(82–85).

Schwartz, Y. (1989). « C'est compliqué ». Activité symbolique et activité industrielle. *Langages*, 24(93), 98–109. <https://doi.org/10.3406/lgge.1989.1540>

Scott-Young, C., & Samson, D. (2008). Project success and project team management: Evidence from capital projects in the process industries. *Journal of Operations Management*, 26(6), 749–766.

Shingo, S. (1986). *Maîtrise de la production et méthode Kanban: Le cas Toyota*. Les Ed. d'organisation.

Shirwaiker, R. A., & Okudan, G. E. (2006). TRIZ and axiomatic design: A review of manufacturing case-studies & their compatibility. *2006 Technology Management for the Global Future-PICMET 2006 Conference*, 6, 2510–2520.

Simonsen, J., & Hertzum, M. (2012). Sustained participatory design: Extending the iterative approach. *Design Issues*, 28(3), 10–21.

Taylor, F. W. (1919). *The principles of scientific management*. Harper & brothers.

Taylor, M. P., Boxall, P., Chen, J. J., Xu, X., Liew, A., & Adeniji, A. (2020). Operator 4.0 or Maker 1.0? Exploring the implications of Industrie 4.0 for innovation, safety and quality of work in small economies and enterprises. *Computers & Industrial Engineering*, *139*, 105486. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.047>

Teiger, C., Barbaroux, L., David, M., Duraffourg, J., Galisson, M.-T., Laville, A., & Thareaut, L. (2006). Quand les ergonomes sont sortis du laboratoire... À propos du travail des femmes dans l'industrie électronique (1963–1973). Rétro-réflexion collective sur l'origine d'une dynamique de coopération entre action syndicale et recherche-formation-action. *Perspectives Interdisciplinaires Sur Le Travail et La Santé*, *8–2*.

Terressac, G. de, Soubie, J.-L., & Neveu, J.-P. (1988). Systèmes experts et transferts d'expertise. *Sociologie du travail*, *30(3)*, 461–477. <https://doi.org/10.3406/sotra.1988.2418>

Tesi, F. (2008). Michelin et le taylorisme. *Histoire, économie & société*, *27e année(3)*, 111–126. Cairn.info. <https://doi.org/10.3917/hes.083.0111>

Tupa, J., Simota, J., & Steiner, F. (2017). Aspects of Risk Management Implementation for Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, *11*, 1223–1230. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.248>

Veile, J. W., Kiel, D., Müller, J. M., & Voigt, K.-I. (2019). *4.0 implementation in the German manufacturing industry*. 21.

Weil, B., & Hatchuel, A. (1992). L'expert et le système. *Revue Française de Gestion Industrielle*, *11(2)*, 79–81. <https://doi.org/10.53102/1992.11.02.1049>

Weil, T., & Dubey, A.-S. (2020). *Au-delà de l'entreprise libérée* (Vol. 32). Presses des Mines.

Wheelwright, S. C., & Clark, K. B. (1992). *Revolutionizing Product Development: Quantum Leaps in Speed, Efficiency, and Quality*. Simon and Schuster.

Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (1990). The machine that changed the world, Rawson Associates. *New York*, *323*, 273–287.

Xu, Z., Elomri, A., Kerbache, L., & El Omri, A. (2020). Impacts of COVID-19 on Global Supply Chains: Facts and Perspectives. *IEEE Engineering Management Review*, *48(3)*, 153–166. <https://doi.org/10.1109/EMR.2020.3018420>

Zio, E. (2016). Some Challenges and Opportunities in Reliability Engineering. *IEEE Transactions on Reliability*, *65(4)*, 1769–1782. <https://doi.org/10.1109/TR.2016.2591504>

Table des schémas

Schéma 1 : rapport de prescription unilatéral	13
Schéma 2 : Le rapport de prescription réciproque.....	15
Schéma 3 : Plan du chapeau	19
Schéma 4 : Extrait de (David, 2012) – Formalisation et contextualisation du changement dans les quatre démarches de recherche.	40
Schéma 5 : Représentation schématique de la trame argumentative matricielle.....	62
Schéma 6 : la reconception d’une nouvelle règle en cohérence avec un patrimoine de création..	68
Schéma 8 : La théorie CK : de la disjonction à la conjonction	70
Schéma 7 : Modélisation générale de la régénération du système de règles en usine avec CK-topos (Extrait de l’article 1).....	97

Liste des tableaux

Tableau 1: Synthèse des modalités du rapport de prescription	16
Tableau 2 : Les interactions avec les trois partenaires industriels (hors comités de pilotage)	41
Tableau 3 : Composition des comités de pilotage	42
Tableau 4 : Présentations à la communauté académique	42
Tableau 5 : Tableau des critères caractérisant les deux régimes de conception extrait de l'article 52	
Tableau 6 Les 30 projets d'amélioration codés selon les 16 critères de conception, le régime de conception et la performance	54
Tableau 7 : Résumé des types de commentaire par idée	59
Tableau 8 : Articles présentés par ordre d'apparition dans l'argumentation de la thèse	63
Tableau 9 : synthèse de l'article 1	65
Tableau 10 : synthèse de l'article 2	75
Tableau 11 Les 30 cas en fonction des 16 critères de conception et de performance.	77
Tableau 12 : Synthèse de l'article 3	82
Tableau 13 : Synthèse de l'article 4	89
Tableau 14 : synthèse des articles	94
Tableau 15 : Synthèse des contributions des articles.....	95
Tableau 16 : Synthèse du résultat 2 : les outils et méthodes, selon les cas empiriques	104
Tableau 17 Synthèse des contributions des réponses aux question de recherche générales.....	106

A MODEL OF CREATIVE HERITAGE FOR INDUSTRY: DESIGNING NEW RULES WHILE PRESERVING THE PRESENT SYSTEM OF RULES

**Harlé, Honorine;
Le Masson, Pascal;
Weil, Benoit**

MINES ParisTech

ABSTRACT

In industry, there is at once a strong need for innovation and a need to preserve the existing system of production. Thus, although the literature insists on the necessity of the current change toward Industry 4.0, how to implement it remains problematic because the preservation of the factory is at stake. Moreover, the question of the evolution of the system depends on its innovative capability, but it is difficult to understand how a new rule can be designed and implemented in a factory. This tension between preservation and innovation is often explained in the literature as a process of creative destruction. Looking at the problem from another perspective, this article models the factory as a site of creative heritage, enabling creation within tradition, i.e., creating new rules while preserving the system of rules. Two case studies are presented to illustrate the model. The paper shows that design in the factory relies on the ability to validate solutions. To do so, the design process can explore and give new meaning to the existing rules. The role of innovation management is to choose the degree of revision of the rules and to make it possible.

Keywords: Industry 4.0, Design theory, Innovation

Contact:

Harlé, Honorine
MINES ParisTech
Centre de Gestion Scientifique
France
honorine.harle@mines-paristech.fr

Cite this article: 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', in *Proceedings of the International Conference on Engineering Design (ICED21)*, Gothenburg, Sweden, 16-20 August 2021. DOI:10.1017/pds.2021.15

1 INTRODUCTION

Industry 4.0 has been described as industry that relies on Cyber-Physical Systems (CPS) (Thoben et al. 2017) and in which production is supported by sensors, the Internet of things (IoT), automation, big data, etc. (Lu 2017) so as to acquire desirable properties such as agility in dealing with complexity, modularity, connectivity, process integration, autonomy, high reliability, and robustness (Culot et al. 2020) for mass customization (Aheleroff et al. 2019). In such a highly complex and constrained system, the question of designing new solutions and causing the system to evolve inevitably comes up. At first glance, the production appears to be fully determined and prescribed: all the rules are given and the factory is simply a place for their execution. However, when an improvement in the production process is desired, or when a new and badly understood problem occurs, the operator will intervene and design a new solution. This new rule will need to fix or complete the existing system of rules without perturbing it, in spite of its complexity and uncertainty. Thus, in a factory, and especially in a 4.0 factory, the problem is how to innovate while at the same time preserving the system.

This paper deals with the characteristics of and the means for the design of new rules in the factory. How is one to design a solution that will be integrated into the system and will be valid for all conditions without perturbing or destroying the system? How is one to design something new in the factory while relying upon and preserving its system of rules?

This tension between the old and the new is often presented as a dilemma between tradition and innovation. Innovation is usually presented as “breaking the rules” and as being in contradiction with the past (Aghion et al. 2019; Christensen et al. 2018). However, in an industrial context, especially in Industry 4.0, this dualism does not apply. The alternative seems to be a compromise between innovation and tradition. Innovation of a lower degree can be “non-destructive” or only “incremental,” according to the well-known typologies of innovation (Coccia 2017; Hervas-Oliver et al. 2019). However, the factory does not correspond exactly to this view. The factory needs to be a place of conservatism and of tradition to keep the manufacturing system reliable and efficient. At the same time, it is also a place that faces unsolved or new problems.

The literature admits another perspective that sheds new light on the question: creative heritage allows for innovation within tradition (Hatchuel et al. 2019). Creative heritage has the two properties of preserving tradition and of “breaking” traditional rules. A factory can be considered as a place of creative heritage in which the design activity can be presented as a way of innovation. Hence, this paper models the design of a rule in a set of rules seen as creative heritage. Two case studies are presented to illustrate the model. The paper gives a new theoretical framework for understanding design activity in the factory. It shows that the crucial point in a design approach in the factory is the validation of the solution and its robustness. It sheds light on how it is possible to have innovation within tradition and on the means by which this can be achieved. It furthers our understanding of both management and design-oriented activity in the factory.

2 LITERATURE REVIEW

2.1 The factory is rule-based and preserves its system of rules. At the same time, the factory constantly innovates.

The factory is a system geared toward preservation, as stability of production and robustness of new solutions are essential. It has, however, a tendency to become more and more complex and, thus, constrained; moreover, with greater complexity, the risk of a systemic problem arising that would prevent the manufacturing system from working reliably increases. The unsolved problems and challenges of industrial activities are numerous, and the ability to design and innovate is crucial to the good operation, improvement, and transformation of the factory. The anticipated effects of Industry 4.0 are numerous: to have a dynamic manufacturing system, to increase connectivity, to be smarter, etc. (Wichmann et al. 2019). However, there are still great challenges in the implementation of Industry 4.0 in terms of how to face the increased complexity and find an appropriate means of standardization (Wan et al. 2016; Wichmann et al. 2019). Other issues have been raised, such as the need to move industry toward a responsible model (Liu and De Giovanni 2019; Martinuzzi et al. 2018). There is no single solution to these challenges and, hence, innovation is needed to tackle them. As a symptom of this tension and these dual aims, studies have argued for the need for higher skill levels not only to maintain the system (technical and social skills) but also to improve it and to deal

with uncertain and unknown situations (skills in complex problem-solving, creativity) (Hecklau et al. 2016; Pfeiffer 2016; Veile et al. 2019).

2.2 The various ways of considering the relationship between tradition and innovation

2.2.1 Innovation as a dilemma between preservation and novelty

Since the beginning of innovation theory in Economics, the destructive phase has been presented as a famous effect of innovation (Aghion et al. 2019; Huffman 2020). According to the Schumpeterian theory, an innovation is adopted, adapted, replicated by others, completed, brings a cluster of innovation, and finally chases away the existing system (Schumpeter 2013; Wadhvani 2020). This theory was first used to explain the economic cycles observed. However, it has been used more widely to describe the innovation process in several fields and according to various interpretations (Xing and Sharif 2020), e.g., in the sciences (Tierney et al. 2020), in transportation (Kim et al. 2018; Schwalbe 2018), and in the media (Aubert-Tarby et al. 2018). Linked to this theory, the degree of innovation is often measured as the gap between the innovation and the state-of-the-art, suggesting the obsolescence of the latter. An innovation is radical if it adds new value for customers or encapsulates new knowledge (Tiberius et al. 2020). Following this line of argument, an innovation that belongs to the “disruptive” category has the potential to bring about the end of the existing market. According to this view, the wish to innovate faces a dilemma between two extreme positions: preserving the past or entering upon a new path of innovation.

2.2.2 Innovation as a trade-off between preservation and novelty

As a possible way to avoid the destruction following innovation, the degree of novelty can be moderated. An incremental innovation is the result of a compromise between conservation and novelty. The lower the degree of innovation is, the more the state-of-the-art will be preserved. A marginal innovation will preserve the system (it will remain almost the same), whereas a “radical” innovation—one significant enough to change the system—will be destructive. Thus, the famous adjective “incremental” qualifies an innovation that does not call into question the existing system but adds a marginal touch of newness (Dewar and Dutton 1986). A “non-destructive” innovation is explicitly conservative and will have a low degree of impact on the existing system (Kim and Mauborgne 2019).

2.2.3 Innovation within tradition

Beyond these two positions, the idea of “creative heritage” suggests how innovation can emerge within tradition. In gastronomy, this means creating novelty while relying on and preserving the culinary tradition (Carvajal Perez et al. 2018; Hatchuel et al. 2019). Drawing on the topos and the CK theories, Hatchuel et al. (2019) modeled this particular phenomenon, which is both innovative and conservative.

Finally, there are two extreme positions: creative destruction (rule-breaking) or conservation without novelty. There is an intermediate position: a compromise between innovation and tradition. There is also another original position: innovation within tradition. These regimes can all be found in design activity in certain factories.

3 RESEARCH QUESTIONS AND METHODOLOGY

The literature review leads to the following research questions:

RQ1. How should we model innovation in the factory and the various types of interaction between the existing rules and the new one? How is it possible for a new rule to at once preserve the system and cause it to evolve?

With this research question, the paper investigates the evolution of a system of rules and the interaction with the heritage of rules during the design phase of the new rule.

RQ2. What are the specific resources, actors, organizations, and means devoted to the design of a new rule—or the extension of an existing one—in creative heritage?

This question is intended to shed light on management needs for innovation within tradition in the factory.

The literature review mentions a model of creative heritage for innovating within tradition. This framework seems to be well suited to the factory setting. Hence, the authors propose a theoretical model for understanding in a new way the various types of design activity that occur in a factory and specifically those that foster creative heritage. Then two case studies drawn from different industrial fields—aeronautics and railway maintenance—are presented to illustrate the model.

4 THE MODEL

The model relies on [Hatchuel et al. \(2019\)](#), in which the creative heritage of gastronomy is modeled using a CK-topos formalization that uses the CK theory ([Hatchuel et al. 2018, 2011](#)) in combination with the topos theory. The usual cases are explored: orthodoxy (the tradition is kept), innovation (the tradition—or the rules—is broken), and compromise (a new local rule). The application of the CK-topos reveals a new case: innovation within tradition, i.e., how creation can emerge from tradition without contradicting it. In the model and throughout the paper, the definition of a “rule” is taken in its large sense as a logical link between two objects, based on the definition commonly used in the IA field: “In a rule-based system, much of the knowledge is represented as rules, that is, as conditional sentences relating statements of facts with one another” ([Buchanan and Duda 1983](#)). In a factory, it can have several meanings but concerns all the actions prescribed to the operators: it can be a process, a sub-part of a process, a legal rule for manufacturing, a guideline from the engineering department, etc.

4.1 Preliminary elements

The following formal elements are taken from [Hatchuel et al. \(2019\)](#) and adapted to the factory context:

- The tradition of the firm is seen as a set of rules. The rules belong to the knowledge (K-space) of the factory. However, because they are numerous, complex, and aggregated across time, the whole system of rules is not known.
- The building category can be understood as an ideal model, expressed in terms of rules and their interaction. The translation to the rules is not perfect, and sometimes a rule is missing, or there is a contradiction between the rules.
- In the factory, a pre-sheaf on the category is a local solution (i.e., for a particular product or process, for a limited time and set of conditions) which is at the step of concept and which is not validated as a general solution. Hence, the pre-sheaf belongs to the concept space (C-space).
- The sub-object classifier J defines what makes the category stable. J appears to be essential: it defines the possibility of making the rules evolve. J can be interpreted as design-oriented management.

As [Hatchuel et al. \(2019\)](#) noted, the particularity of the model relies on the process of “sheafification,” i.e., when a pre-sheaf becomes a sheaf. The category is stable (hence the tradition is kept), and J controls the expansion and enables a new meaning—or an extension of the meaning—for the rule, keeping the tradition. In the factory, sheafification corresponds to the process of validation of a solution or a family of solutions thanks to the new meaning of the rule designed.

4.2 The CK-topos model of the factory

We can derive a model for the factory seen as creative heritage with the CK-topos model. In the C-space, the initial concept corresponds to the search for a solution with the properties (P_1, \dots, P_n) to tackle a problem that is as yet unsolved. The K-space contains the rules corresponding to the problem and the solutions in the factory (the category) and the known solutions in the manufacturing field. The first partition (in the C-space) is whether or not to keep the category. If the category is not kept, there is a case of radical innovation, i.e., the rules are broken. If the category is kept—in other words, if the rules remain stable—the second partition relies on J : if it is *coarse*, then the rule will be applied literally and the tradition will be kept; if it is *dense*, then another sense of the rule can be unearthed. In this case (J dense), the innovation can be local and the system of rules can admit one exception: it is a compromise between tradition and innovation. If the rule admits an extended meaning, a range of new robust solutions appears, in accordance with the heritage that has evolved. For that, in the K-space,

other knowledge, expertise, skills in various fields are gathered to validate the new meaning of the rule in the general case.

Reasoning: The reasoning is explained in Figure 1.

1. A solution is found for a given problem. At first, it is not validated for a wide variety of conditions; hence, it is called a local innovation.
2. To extend the validity of the solution (for instance, to be sure that it will be valid over the long term, under various physical conditions (temperatures, pressures), for various kinds of users, etc.) and to ensure the robustness of the solution, the rules corresponding to the solution and especially the rules against the solution are exhibited in the K-space: after investigation, the category and its rules become known.
3. Two possibilities: A) The rule is a rediscovered rule. There is already a known solution to the problem. The tradition is maintained.
(or) B) To validate the new local solution, the category has to evolve and the rule should have a new meaning. For this, a validation of the new meaning of the rule is required.
4. The original rule admits a variation in its interpretation. A new meaning comes up. The local solution is now in accordance with the heritage.
5. The pre-sheaf becomes a sheaf (that is, the so-called sheafification): the solution is one particular solution out of a set of new solutions validated by the new meaning of the rule.

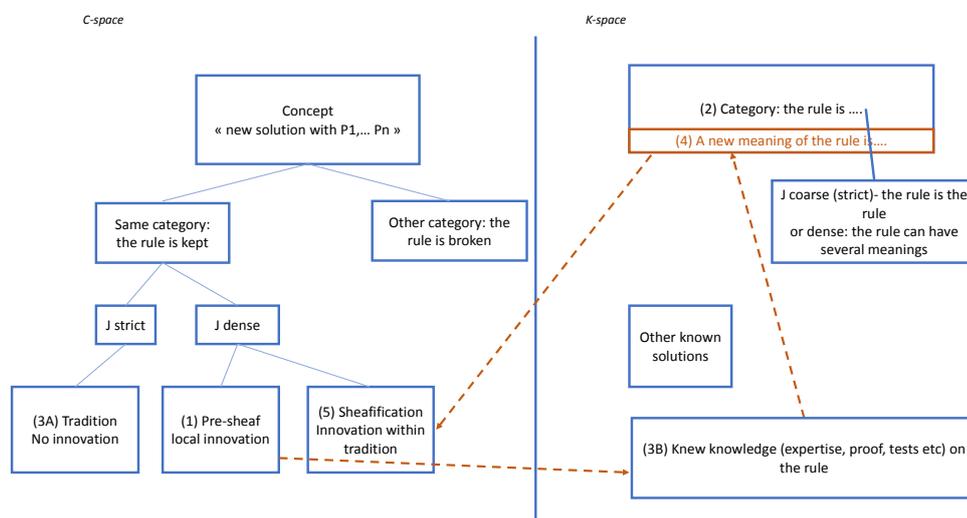


Figure 1. Designing new rules within the tradition: the factory as creative heritage

Caption (figure 1 and the following): The blue boxes refer to the CK theory. The brown box illustrates the process of sheafification in the case of creation heritage. The arrows indicate the sequence of reasoning.

4.3 Learnings and comments

The validation at stake: Understanding the factory as a site of creative heritage seems at first to offer a counter-intuitive general result. The model shows that the crucial issue is to validate the solution according to the system of rules, which is not known before. This will ensure that the solution does not perturb the system and that it will be robust. The reasoning starts from an *a priori* solution, and the exploration in K depends on this solution. Designing new solutions in a system of rules like those in a factory does not consist of listing all the rules in the set of existing rules and imagining and implementing a solution. The system of rules is *a priori* unknown. The design process rediscovers it. It starts with a problem that can be seen as a symptom of a local crisis in the set of rules. From that point, a pre-solution is more or less immediately designed and alternatives are generated. The pre-solution sheds light on the rules impacted. Then an interaction takes place between the rules to validate it and explore possible concepts. The validation comes from the cross between the solution and the rules that it rediscovers or re-designs. Hence, the generation of a solution is closely linked to the exploration of the corresponding set of rules. This marks a significant difference from the design approach typically

found in an engineering office, in which an already-known frame is used to design: the set of functions, requirements, limits of conditions, knowledge of the behavior of the components within these limits, etc., is given.

The prediction of the strength and intensity of the adapted management: In this model, “J” is crucial and determines the type of design and the means devoted to it. It can be a management more (J dense) or less (J coarse) devoted to design. For J coarse, the means are limited to the factory and to the ability to look after the rules. J dense can require time, teamwork, and knowledge from fields other than manufacturing. It can also require an ability to sort the project in terms of the scope of its functions and the domain of validity wanted. For example, one might consider a given project as being “local” and thus not requiring a re-consideration of the system of rules, but want a systematic and very robust solution for another project.

The preservation and extension of heritage: According to our model, the notion of “preservation” is wider than mere conservation of the existing rules. It also encompasses a re-discussion of the rules to find a sense that preserves the initial principle of the rule while admitting another dimension.

5 TWO CASE STUDIES

Two case studies are presented here to illustrate and enrich our understanding of the model. They are taken from two different industrial fields: a railway maintenance center and an aeronautical plant.

5.1 The sandbox

5.1.1 The case

At a maintenance center for French regional trains located in Nantes, a virtual suggestion box is used to collect ideas from the operators. One of the suggestions concerned the train’s sandbox. This is a box containing some sand to put between the rail and the wheel to increase the adherence of the rail in case of an emergency stop or wet conditions. The sandbox is made of a filler door to put the sand in, a hull to keep the sand, and a pipe from the hull to the rail.

The operator who suggested the idea had observed that the sand in the sandbox tended to become wet and consequently obstruct the mechanism. The operator discovered that the water came from a leak on the filler door of the sandbox. His idea consisted of adding a gutter over the filler door to avoid the rain entering the sandbox. The managers read the problem and the solution. However, in contrast to the immediate validation that occurred in most cases, the managers took some time to answer. Indeed, other possible solutions were investigated because no one could tell if the gutter was the better solution. During this phase, the managers carefully read the engineering rules concerning the sandbox and discovered that there was a seal missing on the filler door. Finally, they decided to add the corresponding seal.

5.1.2 Analysis using the model

The case is illustrated in Figure 2. The starting point was the proposal of the water gutter as a local solution (A). The managers and the operator then carefully investigated the maintenance rules for the sandbox and other possible solutions that they could imagine (B). Then they discovered an ongoing but forgotten rule (the category) that was not being applied. Finally, they chose the solution indicated by the rule and came back to the seal (C).

5.1.3 Comments

The first solution proposed by the operator was the starting point of the reasoning. The next step consisted of discovering other solutions and at the same time looking for the rules and the blocking points that prevented one of the solutions from being chosen. Finally, the re-discovery of the maintenance rule guided the choice for the solution that had already been validated.

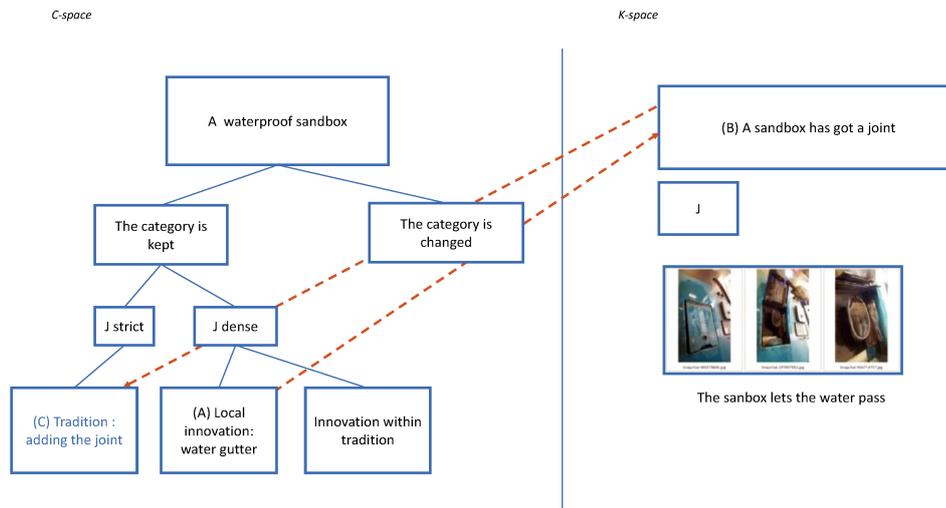


Figure 2. Reasoning to rediscover the rules to solve the leak in the sandbox

5.2 The safety mattresses

5.2.1 The case

In the Airbus factory in Saint-Nazaire, several workshops were held to improve the safety of the factory. The team first considered ways to improve safety by complying with the usual processes and norms. Then an innovative design approach led to the solution of using safety mattresses, even though the safety norms usually forbade this solution. In our case, the team in charge of the problem proved that adding a second independent line was a better solution than the one in place. The mattresses were accepted.

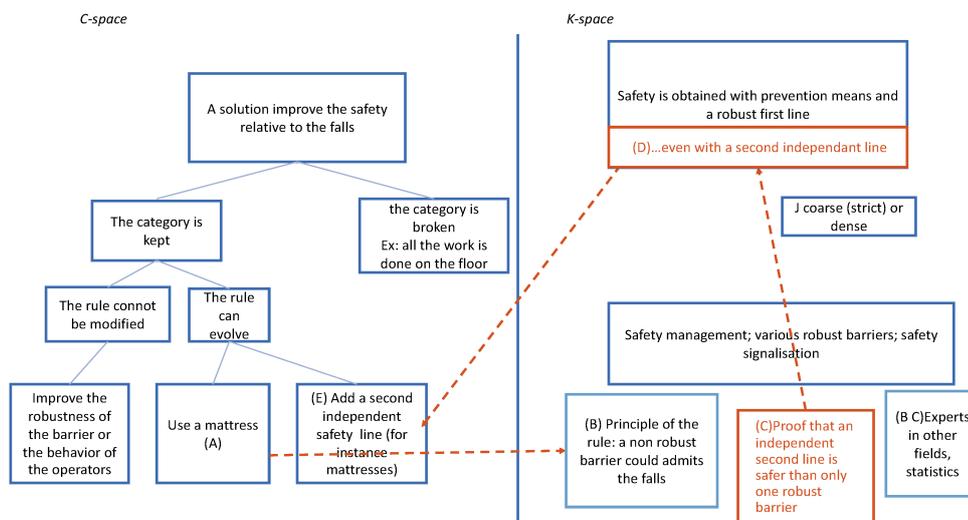


Figure 3. Reasoning for the validation of the safety mattresses: a case of sheafification

5.2.2 Analysis using the model

The reasoning is illustrated in Figure 3 and can be described as follows: to improve safety, the team explored other fields (nuclear and airplane safety) and came across the concept of the second independent line. They thought about using a safety mattress to prevent injuries after a fall (A). They consulted the experts, who answered that safety mattresses were forbidden in the factory. The rules only allowed for a robust first line to prevent falls and a few other means that had been adopted (warning signs, safety training, instruction, etc.) (B). Indeed, a second independent safety line would suggest that the first line allowed falls and was not robust. They investigated the principle of the norm, produced new statistical calculations, and proved that an independent second line added to a robust first line was indeed safer than one robust first line (C): it drastically reduces the risk of heavy injury

in case of falls. Then the original rule was expanded to admit the second line (D). This validated all the particular solutions referring to a second independent line (E).

5.2.3 Comments

As the proof of the consistency of the new sheaf was valid in the general case, all the particular solutions corresponding to the definition of the “independent second line” became valid. The mattresses appeared to be one of the possible solutions. Taken as a general rule, the solution could be applied not only locally but also in all circumstances where there was only a robust barrier.

6 RESULTS

6.1 Result 1: The type of innovation depends on the interaction with the system of rules

Modeling the possible interactions between the new solution and the heritage of rules makes various types of innovation appear.

- On the one hand, the solutions can fall under the tradition: in this case, there is no new rule. The validation of the solution revealed that it complied with the existing system of rules (the tradition) or—in the sandbox case—rediscovered the existing rules. This type of innovation is well known in the factory. The solutions are generally quickly validated and implemented. An intense rhythm of new solutions like this is often encouraged, especially in a continuous improvement approach. Tips, tricks, and bricolage most of the time belong to this category.
- On the other hand, the solutions can appear to be totally new and without any link to the existing system of rules. The new rule breaks and replaces the system of rules, as is the case in a revolutionary production system or in a new way of manufacturing. This type of project requires a wide and deep design process that can include the factory but also concerns the engineering department and potentially other organizations, for instance, the company’s strategy team.
- The solutions can be validated locally for a small range of validity (for instance, for a particular product or for one machine during a determined time). In the factory, this status is a sort of derogation, as the solution is only robust within a small perimeter for a short time.
- Lastly, there is a class of solutions that neither comply with the existing rules nor break them. They re-interpret the rules or extend them, which means that they give them a new sense or a new meaning that has not been seen before. This type of solution is subtler to validate, and the engineering department can potentially support the design process and its validation. The organization for that process is developed in the next paragraph.

6.2 Result 2: The management and skills for creative heritage

The role of the management and the designers in this type of innovation is to guide the interaction between the new solution and the tradition. In terms of resources, it can be very useful to have access to experts who know perfectly what the exact sense of the rule is, what is admitted or forbidden, and what was the original reason for the rule. However, this condition is not sufficient. The critical point is not only to know the rules but also to guide the search through all the rules of the system to determine which one is problematic and should be rethought or extended. An investigation to find the critical one is required. Furthermore, to design the proof to validate the rule in the general case or to design other strategies to validate a claim involves bringing new measures, developing prototypes, and running tests. As it involves various skills, the design and validation process must be done in a team that has the specific qualities required to know how to “interact” with and revise the rules.

All these conditions require time and space that is not necessarily allocated for smaller innovations, as easiness to implement is usually one of the criteria for success of an innovation in the factory. Finally, the managers of the factory have to support this design effort to make it possible and to make the heritage “creative.”

7 DISCUSSION AND CONCLUSION

A modeled example of creation within tradition in the factory: The model and the case studies show the mechanism behind a site of creative heritage such as a factory. This offers a new perspective

on the interaction between innovation and tradition. The sheafification allows a very different phenomenon than the usual antagonism of creation vs. destruction. The rules can evolve without any contradiction with the heritage of rules, and the design of the solution does not “destroy” or negatively impact the system of rules. In the same way, in this frame, the idea of innovations being either “incremental” or “radical” loses its meaning. In a creative heritage context, an “incremental” innovation could belong to the tradition and comply with the rules. It could also—but very differently—belong to the tradition but expand its rules. On the contrary, the sheafification process suggests that an innovation can be “radical” by virtue of the newness of the new meaning of the rule, without breaking the rules or destroying the tradition.

A new model for understanding the factory: Moreover, this paper models the factory as a system of rules constituting creative heritage. This gives a new perspective on the innovation process, as the stake in the innovation process in creative heritage is to validate the solution and to make it robust and not necessary to be strongly innovative. One can also notice that in our model, the “conjunction phase” mentioned in the CK theory (Hatchuel et al. 2011) corresponds here to the validation of the solution (the *pre-sheaf*) regarding the rules, the careful adequacy between the system of rules and the solution.

A model relevant to Industry 4.0: Automation makes the rules numerous and the system fully deterministic. Moreover, the variety and nature of technologies increase the complexity of the system (Brocal et al. 2019) and its evolution is problematic: an improvement can put the system at risk if it is not robust, but at the same time, the system (hence the category) is less and less easy to understand. Hence, the model shows that the validation of a new solution is particularly crucial and informative regarding the conditions of the validation. In particular, the role of operators in Industry 4.0 becomes clearer: the literature already underlines the need to have technical and social skills, but also the need for skills in creativity and problem-solving (Hecklau et al. 2016; Pfeiffer 2016; Veile et al. 2019). The model presented in this paper refines the operators’ role: they need to acquire a sort of agility to be able to “navigate” the system of rules, investigate the rules that are re-questioned and the rules that present obstacles to improvement, call the right experts, or venture beyond the factory into related fields to gain access to new knowledge about the question. The operator is in charge of demonstrating rigorously that the improvement does not put the system at risk.

A comprehension of the evolution of a rule: This paper shows how a rule – in a broad meaning - evolves and contributes to our understanding of what “expanding the rule” involves. It gives insights into the apparition of new “interpretations” or “meanings” that can give rise to a paradoxical situation in which a “new” rule that gives a totally new meaning to the whole system of rules can appear. At the same time, this new rule emerges from tradition and from the system of rules itself.

ACKNOWLEDGMENT

We thank David Mulrooney, Ph.D., from Edanz Group (<https://en-author-services.edanz.com/ac>) for editing a draft of this manuscript.

REFERENCES

- Aghion P, Bergeaud A, Boppart T., Klenow PJ, Li H (2019) Missing growth from creative destruction. *Am. Econ Rev* 109:2795–2822. <https://doi.org/10.1257/aer.20171745>
- Aheleroff S, Philip R, Zhong RY, Xu X (2019). The degree of mass personalisation under Industry 4.0. *Procedia CIRP* 81:1394–1399. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.050>
- Aubert-Tarby C, Escobar OR, Rayna T (2018). The impact of technological change on employment: The case of press digitisation. *Technol Forecast Soc Change* 128:36–45. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.10.015>
- Brocal F, González C, Komljenovic D, Katina PF, Sebastián MA (2019) Emerging risk management in Industry 4.0: An approach to improve organizational and human performance in the complex systems. *Complexity* 2019:e2089763. <https://doi.org/10.1155/2019/2089763>
- Buchanan BG, Duda RO (1983) Principles of rule-based expert systems. In: Yovits MC (ed) *Advances in Computers*. Elsevier, pp. 163–216. [https://doi.org/10.1016/S0065-2458\(08\)60129-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2458(08)60129-1)
- Carvajal Perez D, Masson PL, Weil B (2018) Managing Dom Pérignon’s creative heritage: Modelling and organising the transmission of knowledge for generativity. *Université Paris Sciences et Lettres*.
- Christensen CM, McDonald R, Altman EJ, Palmer JE (2018) Disruptive innovation: An intellectual history and directions for future research. *J Manag Stud* 55:1043–1078. <https://doi.org/10.1111/joms.12349>

- Coccia M (2017) Sources of technological innovation: Radical and incremental innovation problem-driven to support competitive advantage of firms. *Technol Anal Strateg Manag* 29:1048–1061.
- Culot G, Nassimbeni G, Orzes G, Sartor M (2020) Behind the definition of Industry 4.0: Analysis and open questions. *Int J Prod Econ* 226:107617. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107617>
- Dewar RD, Dutton JE (1986) The adoption of radical and incremental innovations: An empirical analysis. *Manag Sci* 32:1422–1433.
- Hatchuel A, Le Masson P, Reich Y, Subrahmanian E (2018) Design theory: A foundation of a new paradigm for design science and engineering. *Res Eng Des* 29:5–21. <https://doi.org/10.1007/s00163-017-0275-2>
- Hatchuel A, Le Masson P, Reich Y, Weil B (2011) A systematic approach of design theories using generativeness and robustness. In: *DS 68-2: Proceedings of the 18th international conference on engineering design (ICED 11), Impacting society through engineering design, Vol. 2: Design theory and research methodology, Lyngby/Copenhagen, Denmark, pp. 87–97.*
- Hatchuel A, Masson PL, Weil B, Carvajal-Perez D (2019) Innovative design within tradition: Injecting topos structures in C-K theory to model culinary creation heritage. *Proc Des Soc Int Conf Eng Des* 1:1543–1552. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.160>
- Hecklau F, Galeitzke M, Flachs S, Kohl H (2016) Holistic approach for human resource management in Industry 4.0. *Procedia CIRP* 54:1–6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.102>
- Hervas-Oliver JL, Sempere-Ripoll F, Estelles-Miguel S, Rojas-Alvarado R (2019) Radical vs incremental innovation in Marshallian Industrial Districts in the Valencian Region: What prevails? *Eur Plan Stud* 27:1924–1939.
- Huffman GW (2020). An analysis of the importance of both destruction and creation to economic growth. *J Monet Econ* 116:166–183. <https://doi.org/10.1016/j.jmoneco.2019.08.008>
- Kim K, Baek C, Lee JD (2018) Creative destruction of the sharing economy in action: The case of Uber. *Transp. Res. Part Policy Pract* 110:118–127. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.01.014>
- Kim WC, Mauborgne R (2019) Nondisruptive creation: Rethinking innovation and growth. *MIT Sloan Manag Rev* 60:46–55.
- Liu B, De Giovanni P (2019). Green process innovation through Industry 4.0 technologies and supply chain coordination. *Ann Oper Res* 1–36.
- Lu Y (2017) Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *J Ind Inf Integr* 6:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2017.04.005>
- Martinuzzi A, Blok V, Brem A, Stahl B, Schönherr N (2018) Responsible research and innovation in industry—Challenges, insights and perspectives. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute.*
- Pfeiffer S (2016) Robots, Industry 4.0 and humans, or why assembly work is more than routine work. *Societies* 6:16.
- Schumpeter JA (2013) *Capitalism, socialism and democracy.* Routledge.
- Schwalbe U (2018) Schneider Henrique: Creative destruction and the sharing economy: Uber as disruptive innovation. *J Econ* 124:93–96. <https://doi.org/10.1007/s00712-017-0589-6>
- Thoben KD, Wiesner S, Wuest T (2017) “Industrie 4.0” and smart manufacturing – A review of research issues and application examples. *Int J Automation Tech* 11:4–16. <https://doi.org/10.20965/ijat.2017.p0004>
- Tiberius V, Schwarzer H, Roig-Dobón S (2020) Radical innovations: Between established knowledge and future research opportunities. *J Innov Knowl* <https://doi.org/10.1016/j.jik.2020.09.001>
- Tierney W, Hardy JH, Ebersole CR, Leavitt K, Viganola D, Clemente EG, Gordon M, Dreber A, Johannesson M, Pfeiffer T, Uhlmann EL (2020). Creative destruction in science. *Organ Behav Hum Decis Process* 161:291–309. <https://doi.org/10.1016/j.obhdp.2020.07.002>
- Veile JW, Kiel D, Müller JM, Voigt KI (2019) Lessons learned from Industry 4.0 implementation in the German manufacturing industry. *J Manuf Tech Manag* 31:977–997. <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2018-0270>
- Wadhvani RD (2020) Gales, streams, and multipliers: Conceptual metaphors and theory development in business history. *Enterp Soc* 21:320–339. <https://doi.org/10.1017/eso.2019.56>
- Wan J, Tang S, Shu Z, Li D, Wang S, Imran M, Vasilakos AV (2016) Software-defined industrial internet of things in the context of industry 4.0. *IEEE Sens J* 16:7373–7380.
- Wichmann RL, Eisenbart B, Gericke K (2019) The direction of industry: A literature review on Industry 4.0. *Proc Des Soc Int Conf Eng Des* 1:2129–2138. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.219>
- Xing JL, Sharif N (2020) From creative destruction to creative appropriation: A comprehensive framework. *Res Policy* 49:104060. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2020.104060a>



Innovative design on the shop floor of the Saint-Nazaire Airbus factory

Honorine Harlé¹ · Sophie Hooge¹ · Pascal Le Masson¹ · Kevin Levillain¹ · Benoit Weil¹ · Guillaume Bulin² · Thierry Ménard²

Received: 24 December 2019 / Revised: 18 November 2021 / Accepted: 20 November 2021 / Published online: 18 January 2022
© The Author(s), under exclusive licence to Springer-Verlag London Ltd., part of Springer Nature 2021

Abstract

In this study, we examine innovative design practices on the Saint-Nazaire Airbus factory shop floor. The engineering and manufacturing engineering departments are in charge of the design of products and their industrialization, even though the factory is usually seen as a place for manufacturing, rather than design. However, there is also design activity in a factory that is devoted to the optimization of manufacturing processes. In this study, we highlight an alternative form of design that relies on a collective exploratory approach. A total of 30 projects from the Saint-Nazaire Airbus factory were selected and analyzed. Of these, two were selected as case studies to illustrate the factory's different design methods. Subsequently, quantitative analysis provided evidence of the existence of two design regimes: closed prescription and expandable prescription. The resulting solutions were examined, and it was found that designs under the expandable prescription regime provided more robust long-term solutions. This study offers new perspectives for reexamining innovation in manufacturing and exploring design activity on factory shop floors.

Keywords Design theory · Manufacturing · Factory · Industry 4.0 · Innovative design

1 Introduction

The factory is generally seen as a place where plans are executed. The plans for products, processes, tools, and more generally, all of the rules (e.g., routines, instructions, gestures, and processes) used on the production line are predefined before production commences. In the Saint-Nazaire Airbus factory, production relies on numerous routines, controls, and standards, which are not designed on the shop floor, but rather are developed earlier in the company's engineering or manufacturing engineering departments (Polacsek et al. 2017). Traditionally, manufacturing operations are included only during the implementation phase, which is the final step in the design process (Pfeiffer et al. 2019). However, generally the engineering department's instructions are not perfectly aligned with the target or are

not fully specified. Moreover, the designs, plans, and tools used in aircraft manufacturing were developed many years ago in accordance with the prevailing practices and production rates. For instance, the A320 was designed in the 1980s. Given subsequent increases in production rates and the removal of various constraints, norms, and standards in the aeronautical field, the challenge has been to improve production processes. In addressing this challenge, two compatible strategies are possible. First, the aircraft and the production process can be designed simultaneously (Polacsek et al. 2017). There is a higher priority allocated to involving the manufacturing operators earlier in the production design process, for instance through design-oriented thinking (Cross 2011; Johansson-Sköldberg et al. 2013) when they are viewed as users of the processes, and agile project management methods (Campanelli and Parreiras 2015). Second, the existing production line can be improved. The aforementioned design methods can be incorporated into the production line, even though the literature does not offer many examples of this occurring. Other methods can be used to enrich the factory's design and innovation activity through continuous improvement (from the original Japanese term "kaizen"), with the potential for the workers' participation in teams or semi-autonomous groups. In this study, we focus

✉ Honorine Harlé
honorine.harle@mines-paristech.fr

¹ GCS—Centre de Gestion Scientifique, i3UMR CNRS, MINES ParisTech, PSL Research University, 60 Bd St Michel, 75006 Paris, France

² AIRBUS, 60 Rue Anatole France, 44550 Montoir-de-Bretagne, France

on the latter approach, which relies on the operators of the manufacturing process to detect and overcome any emerging problems. They must modify, eliminate, or improve the proposed methods for manufacturing the products. Thus, a variety of gestures, habits, and techniques are introduced at the operator level to enable the engineering department's plans to be executed in a better way. Design activity is present at the operator level in relation to several manufacturing streams (Iwao 2017). The majority of these design activities rely on decision-making and problem-solving processes (Fujimoto 2012) to detect and overcome problems. The design practices used on the shop floor have a local and controlled impact, and do not require significant resources. The identified solutions can be implemented quickly, thereby optimizing performance.

The Saint-Nazaire Airbus factory has designed and implemented significant changes to its production lines. However, the design approach was not limited to problem-solving, but rather incorporated uncommon forms in unusual arrangements. The performance resulting from these experiments differed from that using local solutions generally obtained when adapting the manufacturing process using bricolage or idea collection. The factory has developed the ability to design its own rules, that is, it can create general rules for production using a wide range of applications that are sufficiently robust to accommodate the various conditions and changes in the environment.

In this study, we examined the design practices on the shop floor of the Saint-Nazaire Airbus factory using a sample of 30 innovative projects. We analyzed the types of design observed and the factory's ability to overcome its problem-solving paradigms. How did the factory go beyond mere optimization of its manufacturing rules in relation to designing on the shop floor?

The authors conducted a longitudinal study at the Saint-Nazaire Airbus factory with the aim of investigating innovation and design at the shop-floor level. From this perspective, the Airbus factory can be considered a very relevant research opportunity because innovative practices were observed despite the high level of constraints presented by the aeronautical manufacturing context. Moreover, the coexistence of several projects in the same factory enabled a comparative analysis of design activities.

This study makes several contributions to the literature. First, empirical evidence of a regime of innovative design was observed at the Saint-Nazaire Airbus factory in addition to the usual design regime that occurs during production. Second, positive and innovative effects on performance were observed. Third, the results show how a factory can establish its own rules in response to manufacturing constraints and standards to enable performance to evolve.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 presents a literature review of the common methods used in

design processes in factories, and two design regimes are identified. Section 3 presents the research questions. Section 4 presents the methodology used. Section 5 presents the results of a quantitative study examining the relationship between the design regimes and performance. The two case studies presented in Sect. 6 illustrate the design regimes observed at the factory. The results are discussed in Sect. 7. Section 8 presents a discussion of our findings and our conclusion, focusing on the main results and implications of this study and presenting suggestions for future research.

2 Literature review

This literature review explores the types of design activities that generally occur in a factory setting.

2.1 The history of design in the manufacturing process during the twentieth century

The Toyota Production System (TPS) of the 1950s was followed by lean manufacturing, both of which developed principles to improve the rules (e.g., processes, organization, gestures) at the shop-floor level. These widely adopted approaches to manufacturing, which have continued to shape factories and their work organization to the present day, see the factory as responsible for its continuous improvement (i.e., *kaizen*) with the aim of improving productivity and quality, and reducing lead times and costs (Iwao and Marinov 2018; Anand et al. 2009). During daily production, operators are required to detect problems, wastage, and potential savings in an effort to improve manufacturing quality (Knol et al. 2019). To achieve this objective, crucial design activity is performed on the shop floor.

2.1.1 Methods and tools used for designing during production

Many concepts, processes, and tools, often inherited from Toyota manufacturing system or lean management, have been developed to improve manufacturing performance, and numerous examples have been presented in previous studies. Some tools provide means to pass information from the operators to the design department. For instance, QFD tools are used to collect feedback from the shop floor for their re-use in future design projects (Fargnoli et al. 2018). Value stream mapping is the “collection of all actions (value added as well as non-value added) that are required to bring a product (or a group of products that use the same resources) through the main flows, starting with raw material and ending with the customer” (Grewal 2008). Other tools enable more explicitly the operators to design themselves. The principle of total preventive maintenance relies on shop-floor

workers performing preventive maintenance and detecting anomalies. Following the 5S principles facilitates the efficiency and standardization of the workplace (Abdulmalek and Rajgopal 2007). Beyond these examples, several other tools (Vijayakumar and Robinson 2016; Shah et al. 2015) are available to guide shop-floor workers in improving performance in relation to various criteria.

2.1.2 Teamwork for collective design

In addition to tools, work organization and management were also adapted to meet the objective of improved performance (Duymedjian and Rüling 2010). Collective organizations support the improvement of performance and foster the workers' involvement and interest. For instance, in the TPS, quality circles were one method used to encourage employee participation. Manufacturing operators met regularly in these quality circles to analyze emerging problems (Rafaeli 1985). In addition to the TPS, the sociotechnical approach insists on teamwork and autonomous groups, which encourages team development (Kuipers et al. 2004). The term "teamwork" covers a broad range of processes. Among them, autonomous groups are responsible for the continuous improvement of manufacturing processes and the redesign of the production process (Thompson and Wallace 1996).

2.1.3 The collection of individuals' spontaneous ideas and the innovative behavior on the shop floor

Design activity includes the collection of ideas from individuals with design skills on the shop floor. Previous studies have described employees' innovative behavior as the "intentional creation, introduction, and application of new ideas within a work role, group, or organization to benefit the performance of the role, group, or organization" (West and Farr 1989). In this type of design, the production operators acquire a new dimension: they have the potential to exercise creativity that can benefit manufacturing performance. They have various ideas and techniques that can be used to solve the problems that he or she face. In this perspective, the operators do not only provide solutions but also carry innovation in their behavior, which, even in manufacturing, cannot be completely ruled. Employees' innovative behavior is encouraged under the TPS and lean management through practices such as the recognition of bricolage or improvisation as a way of improving the production line, or suggestion systems that systematically collect employees' ideas.

Bricolage was used by Lévi-Strauss to explain how the bricoleur offers a new solution by rearranging the available resources. Lévi-Strauss classified bricolage as "unselfconscious design" (Lévi-Strauss 1962). The terms "bricolage" and "improvisation" are often used interchangeably. However, both bricolage and improvisation can suffer from a lack

of recognition, especially in a normalized sector in which processes are highly standardized (Cunha 2005).

Design activity is also supported by suggestion systems, which can be institutionalized and become routine in the organization (Ikävalko and Lempiälä 2019). Indeed, during the innovation process, the ideation phase is viewed as particularly important, and thus one that justifies the involvement of all employees. Places devoted to the collection of ideas (e.g., boxes or Intranet forms), rewards, and contests (Adamczyk et al. 2012) are some of the elements used to support this phase of design activity. Various types of suggestion systems can be used to gather employees' ideas (Vanharanta 2018) on ways to solve an identified problem or, more generally, to stimulate innovation (Bullinger et al. 2010).

Interpreted through the lens of design, the plethora of tools, methods, and organizations used to support the manufacturing process constitutes a type of design approach. This approach exhibits several characteristics that make it applicable within the industrial manufacturing context: it requires a scarcity of resources (e.g., time and means), and the effects of the solution are controlled and restricted to local improvements. It is generally based on a problem-solving approach in response to well-defined problems. This identifies a design regime that occurs when the problem has already been identified and the aim is to quickly find a solution while minimizing the resources used (Schön 1990; Dorst 2006). In this study, this regime is called the closed prescription regime. In such a regime, the prescription or rules remain unchanged and the rules are not reviewed. The adjective "closed" stresses the conservative effect of the regime on the system of rules, which is considered as given.

2.2 An alternative design regime

Other characteristics can be identified among the various design practices used in manufacturing, and the design theory literature also depicts generative design, which is an iterative process that can be used to expand the rules or create new ones.

2.2.1 From simple problem-solving to complex, innovative problem-solving

In addition to simple problem-solving, design theory describes a more complex approach to problem-solving, that is, a generative approach. Under this approach, the problem-solving process only emerges once the problem has been well defined and several possible solutions have been proposed (Schön 1987). Hence, design implies that first, the problem must be interpreted, which is a continuous effort. The designer's perspective leads to a coevolution of the framing of the problem and the design of the solution

(Dorst 2006; Maher et al. 1996). Then, the design of solutions is not limited to choices between options based on the available criteria, but rather encompasses the generation of further possible solutions (Lu and Conger 2007). Thus, it is possible to go beyond optimization, and beyond the range of existing solutions (Hatchuel 2001; Hatchuel et al. 2013, 2018).

It can be seen that these two types of problem-solving approaches, simple and complex, or innovative, are complementary, as they address different types of problems and exhibit different degrees of elaboration in the resolution of the problem.

2.2.2 Examples of methods used for complex problem-solving

Various well-known methods can be used to define the problem and generate a range of possible solutions. They are examples of this alternative type of design.

The theory of inventive problem-solving (TRIZ) emerged in Russia in the 1940s. This theory suggested that “inventive problems can be codified, classified and solved methodically, just like other engineering problems” (Kaplan 1996). The aim is to arrive at inventive solutions using a structured process (Stratton and Mann 2003). TRIZ is mainly used by engineers, but is also used in manufacturing contexts (Rantanen et al. 2002).

Other innovative methods consider the end user earlier in the design process, which is one of the pillars of design thinking (Micheli et al. 2019) and enables the design and industrialization of products to occur simultaneously (Polacsek et al. 2017). The agile method is a project development approach that is used to overcome the difficulty of developing inventive solutions in complex, fixed, or standardized environments. It involves the use of short iterative loops between the designers of the new product and the customer, and relies on principles such as self-organized teams, simplicity, and continuous improvement (Campanelli and Parreiras 2015).

These methods are used in factories. They insist on the generation of innovation alternative solutions, or on the complete user-adapted solutions. However, one of the main characteristics of the manufacturing context is the constraints and complexity of the environment. In addition to being innovative, solutions designed in the factory context must comply with numerous constraints, and retain their validity in a wide variety of contexts, that is, not just for one process, one product, or one operator. Numerous studies have outlined how a robust system should be designed, as this is a crucial feature of an industrial system (e.g., Chen and Chen 1996; Sharda and Banerjee 2013; Realff et al. 2004), without explaining how such a system can evolve and adapt to new rules.

2.2.3 A second type of design is possible

These practices are characteristics of another type of design. This second type of problem-solving exhibits several common characteristics in terms of the methods used and the types of results obtained, such as the definition of the problem, the use of an iterative approach, and the generation of new solutions. Seen through the design lens, this exploratory approach, implying new measures, partial and iterative testing, the use of external resources (e.g., science, technology, and people that are not usually present in a manufacturing environment), and the introduction of new concepts and principles can be interpreted as another general design type that differs from the one presented previously. Generally speaking (i.e., in contexts beyond manufacturing), in contrast to the first paradigm of stable rules, this design approach generates new rules. The rules are modified or enriched, and continue to change during the design process. This design regime is termed an “expandable prescription regime,” which refers to the ability of the regime to expand the prescription (i.e., generate new rules for the system). In other words, this regime concerns the design of new rules despite the fact that the system already exists. Thus, a solution designed in the expandable prescription regime will be a new process, a new internal standard, or a new organization that does not exist elsewhere in the factory or in other factories. The solution is more than an adaptation of a known tool or a known method used in other contexts. It comes from the deep understanding of the problem and emerge from an original design approach.

In relation to manufacturing, it could be considered that this design regime relies on specific conditions. For example, it supposes that the operators are aware of the opportunities available to them and have high-level design skills. Moreover, the range of situations over which the solution is valid could increase. For example, these solutions should consider a maintenance plan, as well as the impact on suppliers, clients, and stocks of various materials. Thus, this regime, which is well known in relation to new product development, is less prevalent in manufacturing.

2.3 Two regimes of design, their observation and their coexistence

In a factory, the first type of design regime (see Sub-Sect. 2.1) has been set up in the factory, and is fully adapted. The second type of design regime (see Sub-Sect. 2.2) is more innovative and can exist in the factory, but has some significant implications. It expands the system of rules by adding new rules to an already stable manufacturing system. In the factory, the second type of design regime can take several forms. It can be combined with the first type of design,

it can be used in relation to only a few aspects of a project, or it can be fully deployed.

To observe the prevalence of the two types of design regimes, we needed a set of criteria with which to differentiate them. These criteria were derived from the project management and product development criteria that generally oppose two types of approaches and efficiency of design. There are numerous criteria, and they are not necessarily independent, enabling the properties of an innovative design approach to be captured as fully as possible. The categories (e.g., organization, composition of the team, and testing) are general, and not specific to the design process; they could be used to describe various types of projects.

The criteria were divided into four categories: collective organization, characterization of the problem, problem-solving approach, and characterization of the solution.

- **Collective organization**

The criteria 1–4 are simultaneously derived from the literature on the team organization for project or innovative projects. In the closed-prescription regime, the solution can be chosen among the existing knowledge (Wheelwright and Clark 1992) the team is organized as a classical cross-functional team (Scott-Young and Samson 2008). The team, organized like a commando (or task force) team gathers experts of the sub-problems and is coherent with the subject and the production organization (Engwall and Svensson 2004) (criteria 1–4). In the expandable prescription regime the distance with the known knowledge (Li et al. 2008) requires a collective approach by a team composed by specialists and non-specialists of the problem (Hatchuel et al. 2001) (criteria 1–4). The size of the team is not a criterion of the regime: it depends on the size of the project and appears not to be directly determining of the collective organization.

- **Characterization of the problem**

There are two ways of considering the problem: the problem is not ambiguous, is well defined and well known in the sector, and well measurable, or the problem is poorly understood, has to be investigated, measured, considered under various perspectives, and iteratively reconsidered (Dorst 2006; Paton and Dorst 2011) (criteria 5–7). The problem should be viewed as a wide question, and can be highlighted by less common sciences in the sector (Hooge et al. 2018) (criteria 5 and 8). □□□□□□□□□□

- **Problem-solving approach**

Under the first design regime, the problem is covered and can be solved by usual disciplines (Li et al. 2008) (criterion 9). The project was driven without any iterations or tests during the process, which was linear with a succession of phases and decisions. The test concerns the final solution in a validation logic, without considering

the potential side results and new phenomena (Schmidt et al. 2009) (criteria 10–12). The approach uses only internal knowledge (Caloghirou et al. 2004) (criterion 9).

Under the second design regime, the approach is exploratory; tests (partial or total) were performed to discover new potential action parameters and to improve on the solution (Simonsen and Hertzum 2012; Charue-Duboc et al. 2010). External knowledge and science can be used into the exploration (Caloghirou et al. 2004) (criteria 9–12).

- **Characterization of the solution**

In the closed prescription regime, the final step of the project is its ramp-up. The design stops at the launch of the solution (Krishnan and Ulrich 2001). In the expandable prescription regime, the launch and the exploitation are occasions to learn and to design improvements on or around the solution (Lenfle and Midler 2009) (criterion 13).

The solution is rule-based, and does not change the rules in the first regime, whereas it breaks and generates new rules in the second one (Hatchuel and Chen 2017) (criterion 14).

In the first regime, the solution is adopted, the project ends, but there is no tracks or memory of the design process after its life (Rhodes and Dawson 2013; Kidder 2011). In the second regime, the design process, the solution, and the knowledge created are memorized and could be reused in future projects (Roucoules et al. 2016; Barker and Neailey 1999) (criterion 15).

In the closed prescription regime, the resources to solve the problem are available, and can be combined to obtain the solution (“pizza bins of proven technologies” (Wheelwright and Clark 1992)). Like in bricolage, the solution is built of existing technologies and know-hows (Lévi-Strauss 1962). In the second regime, some knowledge is created to design the new solution. (Lenfle and Midler 2003; Li et al. 2008) (criterion 16).

Some of the 16 criteria used (see Table 1) might appear similar. However, they all bring subtle differences to the observed design process. We wanted to capture the various aspects and complementarity of each category of criteria.

3 Research questions

The authors conducted a deductive research to answer to the following research questions:

Research question 1: What is the performance level of the two design regimes and what is the form of their coexistence in the factory?

Table 1 Criteria for the two design regimes

	<i>n</i>	Closed prescription	Expandable prescription
Collective organization	1	The team is coherent within the production organization (i.e., all involved people belong to the environment of the problem and have a manufacturing specialty corresponding to a part of the problem: e.g., quality, planning, logistics)	The team follows another organization involved in the production problem
	2	The team members want to become experts in the problem (i.e., the team is like a “commando team” where experts are tightly linked and all act with a high degree of implication)	Some people do not become experts involved with a network of experts of implication. Some people will follow will be called on to give a piece of
	3	The problem is divided between fields of expertise. There is one expert for every part of the problem (i.e., each practitioner is in charge of part of the problem, according to the division of labor)	The problem is not entirely covered to investigate (e.g., the team’s experts their expertise that they did not provide. The division of labor is not enough
	4	The solution is legitimized by expertise and approved by the nonexperts (i.e., each expert knows their part of the problem and offers an adequate solution. The solution is a combination of the experts’ solutions for each field of expertise)	The solution is collectively designed of existing experts’ solutions. New
Characterization of the problem	5	The problem is local (i.e., the problem has a known and limited impact)	The question is a field for investigation or concept, e.g., “a safe factory”)
	6	The problem is considered as known and understood (i.e., the problem is about well-known manufacturing criteria of success and is not new in manufacturing)	The problem must be clarified and understood and an investigation is required
	7	The parameters of the problem can be measured easily	There are new parameters to measure understand the problem (i.e., the method new and relies on data not considered
	8	The problem is common in manufacturing (e.g., tools are available to tackle it)	The problem is revealed by unusual facts appears because an “external” scientist is considered in the factory, such as
Problem-solving approach: tests and experiments	9	The problem is solved using sciences commonly used in manufacturing (e.g., quality control, logistics, data analysis)	External sciences are needed to address interesting phenomena are observed
	10	The solution is tested according to a validation of hypotheses (i.e., there is a “yes” or “no” conclusion)	The validation of initial hypotheses is exploratory. All the results of the test is tested, but also its impact, its benefits (drawbacks, etc.)
	11	Only the final solution is tested (i.e., the team concludes on a solution and tests it)	Partial solutions are tested (i.e., some solution is not tested only at the end
	12	A surprising result is not considered in the final solution (i.e., only the final result is important for the design)	The surprising results are integrated interesting phenomena are observed the solution will be changed)
Characterization of the solution	13	The solution is approved when it is considered satisfying (e.g., if the work is considered as done, the solution has been implemented, then the problem is considered as closed)	There is a continuous process of improvement open new concepts to be explored (follows the results and tries to improve stop)

Table 1 (continued)

n	Closed prescription	Expandable prescription
14	The solution keeps the rules unchanged. The prescription is not challenged	The rules are continually modified in response to the experimental results (i.e., the norms, processes, gestures evolve in relation to the findings)
15	The history of the design process (i.e. the steps that drove to the solution) is not kept (i.e., the case is closed and the work of the team is closed without leaving any record)	The design process (i.e. the steps that drove to the solution) is tracked (i.e., the work of the team during the design of the solution is kept for future presentations)
16	The solution is an existing method or tool in production or a combination of them (i.e., a tool frequently used in manufacturing is chosen and implemented)	The solution must be designed from scratch, knowledge has to be developed for the design process (i.e., a ready-to-use tool is not adapted for the problem and the solution is new)

The literature suggests that there are two design regimes in the factory. However, the second regime, and its performance level, is less common in the manufacturing context. The ways in which the two regimes coexist is unclear, both in terms of conditions and of performance. What is the effect of the second design regime, or the combination of design regimes, on the shop floor and on the manufacturing process?

Research question 2: What are the necessary conditions for the existence of the second design regime?

The second design regime depicted in the literature review seems to be less common in the manufacturing context. Thus, we explored the conditions necessary for its existence, or its coexistence with the first design regime, that is, the resources, organization, and methods that can be used in the design process.

4 Methodology

4.1 Research settings

4.1.1 The Saint-Nazaire Airbus factory

We conducted a longitudinal study at the Saint-Nazaire Airbus factory between 2013 and 2018 during a collaborative research project with Mines ParisTech’s Center for Management Studies.

The Airbus factory is located in Saint-Nazaire, Brittany, France, and at the time of the study, it employed about 3000 people. The factory was responsible for assembling, equipping, and testing the forward and central fuselages of Airbus aircraft (especially the A320, A330, A350, and at the time of the study, A380).

The Saint-Nazaire Airbus factory is characterized by its high degree of prescription and a rigid framework of standards and norms specific to the aeronautical manufacturing sector. Lean manufacturing is deployed throughout the factory, and some programs operated in the manner of a “liberated firm” (Gilbert et al. 2018). This implies a high level of employee responsibility, strong relationships among employees, and a less control-oriented management environment.

The issue of innovation in this type of manufacturing environment is highly relevant because innovation seems to contradict the accumulation of historical manufacturing skills, know-how, and constraints that exist in this sector. The aeronautical industry deals with numerous standards and norms, and new manufacturing solutions need to comply with these standards. Thus, organization and control are oriented toward the compliance with the rules, the preservation of the routines, and are not a priori in favor of innovation. At the same time, the factory needs innovation and changes to evolve and to tackle the various challenges of the

aeronautical production. Hence there is an apparent contradiction between these two objectives.

4.1.2 The principle of the method

The study took place in one factory over a period of 5 years. During this period, manufacturing conditions remained more or less unchanged, with a slight increase in the production rate over the period. To observe design practices, we analyzed 30 improvement projects of various sizes (from 4 to 300 people) and for various subjects (quality, delay, safety, organization,...). These heterogeneous contexts are not necessarily determining for the design approach chosen. Capturing the design in various situations, the findings reach a higher degree of generalization. Table 1 in the annex adds descriptive details about the cases.

These projects involving improvement to or innovations in the production line or the factory were undertaken in an attempt to solve an identified problem or respond to a request (e.g., to have a better understanding of the results on a specific production line, to avoid the loss of tools in the aircraft, to avoid bottlenecks in the quality control processes, and to improve the quality of aircraft leaving the factory). These projects lasted for between 1 month and 24 months, and involved various people, such as shop-floor operators, manufacturing experts (e.g., quality, safety, ergonomics, planning, and logistics experts), and people from outside the factory (external experts). The 30 projects were comparable because they all belonged to the same broad program for improvement and innovation in the Airbus factory. They were implemented during the same period, concerned the same object (manufacturing performance). Thus, because the environment was the same for all projects, comparisons were possible.

Variables that are generally unable to be controlled for when projects are undertaken across various industrial fields were able to be controlled for here, including the type of manufacturing field, the worker's level of training, the economic context, and the type of management. Hence the comparison between the cases was possible. Meanwhile, the number of projects provided a broad and rich base that enabled us to observe and compare design practices using a quantitative approach based on criteria. Therefore, the paper builds an analytical framework of 30 comparable improvement projects.

4.2 Data sources and coding issues

4.2.1 Collection and coding steps

We worked with the Saint-Nazaire Airbus factory over a period of 5 years. In the first step, one of the authors participated in the projects as a practitioner of and researcher

into design theory. As an operations manager, he worked and interacted with the teams while carrying out qualitative research, collecting both informal data (through discussions, personal notes, and informal interviews) and raw data (from presentations for the teams and for management). He reviewed the 30 projects in which he was involved and then coded them based on the list of criteria.

In the second step, a second researcher conducted six 2-h interviews with the abovementioned author to clarify his reviews of the projects, and then coded the projects independently. Emails and telephone calls were sometimes required to elicit additional information. Then, a meeting was held wherein they resolved any disagreements or doubts in relation to the coding. Very few projects required negotiation to decide on a final value for each of the criteria used. After this step, the two authors in charge of the coding estimated that they agreed on the criteria around 90% of the time. For the 10% leaving, they accessed to additional information to find a consensus on the value of the criteria.

4.2.2 Coding of cases

The researchers applied the criteria presented in Table 1 to each project. The criteria were allocated a value of 1 if they characterized innovative design (expandable prescription) and 0 otherwise (closed prescription). The weight was the same for each criterion. Indeed, the authors considered that there was a priori no reason to think that some criteria were more decisive than others. The equal weighting was also chosen for simplicity because a regression of 16 variables over 30 projects would have been unreliable. Hence, the model was simple, but sufficient for our purposes.

4.2.3 Design regime coding of the projects

For each of the projects, the design regime used for the strict majority of the criteria was designated as the regime used for the project. Hence, if a project had strictly more than eight—or at least nine—design criteria with a value of 1 (expandable prescription), the project was coded 1 and treated as an expandable prescription project, and if the majority of the criteria were allocated a value of 0, the project was coded 0 (closed prescription).

4.2.4 Coding of project performance

A performance index was used whereby if the solution for the project was used over the long term (i.e. for more than 1 year) and not discarded by the managers or operators, it was coded as 1, whereas if the solution was soon discarded, it was coded as 0. Thus, this performance index indicated whether the solution was robust to the various shocks or constraints resulting from manufacturing activity.

4.3 Analysis of the design practices

4.3.1 Examples of design regimes

Two projects were chosen as case studies to illustrate the data collection techniques and provide examples of the two design regimes. Moreover, they were selected to illustrate the diversity of the fields to which design was applied in the factory. The examples were both quite extreme in terms of the manner used to drive the design process. One was highly characteristic of the closed prescription regime, whereas the other was deeply rooted in the expandable prescription regime. This difference made it easy to distinguish between the two design regimes.

4.3.2 Quantitative analysis

Quantitative analysis was undertaken in an effort to identify the nature of the design process and the relationship between the design regimes and their respective performance. After having coded the cases, two tests were performed (in the annex) to assess the homogeneity between the cases and the relation between the regime and the type of success.

5 Quantitative analysis

The results of the coding are presented in Table 2. The type of design is roughly homogenous, since the cases adopt massively the criteria of their regime. Indeed, the columns contain most of their criteria in the same design regime;

for each case, between 11 and 16 criteria (excepted for the case 9) belong to the same design regime, and eight cases over 30 have all their criteria of the same regime. The case 18 is an exception; with nine criteria of its design regime, and seven criteria of the other regime, this case is the more mixed. This indicates the potential existence of more hybrid practices. More generally, the 24 cases that have at least one criterion that is not coherent with their regime show that some methods and forms of organization could be used in both design regimes.

Moreover in this table, the type of design seems to be correlated with the type of success. Only one case (over 18) of expandable prescription regime is a short-term solution, and one case of closed prescription regime (over 12) is a long-term solution. Hence the expandable design regime (denoted “type 1” in yellow in the table) seems to be associated with a longer term and a more robust solution than the closed design regime (denoted “type 0” in blue).

Two further tests were performed to confirm our previous analysis. The first test checked the homogeneity of the samples, which indicated a high level of difference between the two types of design regimes in terms of the criteria. The second test assessed the link between the design type and the level of success. The details of these tests are presented in the Appendix.

This table also questions the relevance of the criteria table: which criteria inform about the design regime or about the success? Which criteria add noise and could be eliminated? Criteria 11 (the partial tests or not) and 12 (the surprising result integrated or not) are perfectly correlated in our sample. This is not surprising because of the proximity

Table 2 The 30 projects and their design characteristics and performance

crit.	3	5	7	10	12	14	17	22	23	28	29	30	1	2	4	6	8	9	11	13	15	16	18	19	20	21	24	25	26	27
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0
2	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1
4	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
13	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
15	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
succ	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1

Notes: The columns represent the 30 projects, and the rows represent the 16 criteria. The final row shows the performance outcome, that is, 1 on a yellow background represents success and 0 on a blue background represents failure. The preceding row shows the type of design regime, that is, 0 on a blue background represents a closed prescription regime and 1 on a yellow background represents an expandable prescription regime

of the two criteria. One could consider them together, in one criterion. Because they show a slightly different faces of a phenomenon, the authors wanted to keep both of them. Criteria 7 (new measures to understand the problem or not) and 16 (knowledge and solutions have to be developed or not) are also perfectly correlated in our sample. One could consider that the criterion 16 “includes” the criterion 7. The authors consider that this is not a general rule and that both of the two criteria should be kept. More generally, one could have used this table to reduce the model, deleting variables or finding latent ones, and to finally find causal links between the criteria and the success. On the contrary, the aim of this article was assess the existence of two regimes of design, hence to capture the small signals of a phenomenon, in its various facets. A certain correlation was expected between them. The choice to keep all the criteria -in their complementarity and/or their similarity—for the analysis was made. Indeed, the list of the criteria is considered as a tool to separate the cases with classical criteria known in project management and new product development, but is not a result of this research.

6 Two illustrative case studies

Two projects were selected as case studies to illustrate the type of approach used in searching for a solution.

6.1 Case study 1: closed prescription—avoiding tool losses

6.1.1 The project

This project was aimed at improving the management of tools used in the Airbus factory. Two problems were identified. First, some tools were being lost in the aircraft during manufacturing, leading to the possibility of serious accidents. Second, the morning and afternoon teams shared the shop floor but used their own tools, and thus at all times, half of the tools were not in use.

A team composed of eight production line operators and one manager decided to address these problems. They held a meeting and decided to set up a new way of organizing the tools whereby one tool box would be shared by the two teams. Moreover, the tools would be engraved with an identifying number. If a tool was found to be missing from the box, the entire team was required to stop work and look for the lost tool. This new approach was implemented, but drawbacks soon emerged. When a tool disappeared, the morning team accused the afternoon team of having lost it, and vice versa. Moreover, the loss of tools led to considerable delays because the entire team stopped working. Consequently, this

new approach led to frustration and disharmony between the morning and afternoon teams.

During the following weeks, no further meeting was organized to consider these negative and unexpected effects, and the new approach was discontinued a few weeks later.

6.1.2 The design regime

This case study corresponds to project 23 listed in Table 2, with all criteria coded as 0, which is typical of the closed prescription regime, reflecting a problem-solving approach commonly used in manufacturing.

The problem seemed to be clearly identified and was not examined beyond a casual observation. The solution seemed to be simple, looked like a recipe to follow, and at first glance did not require investigation. However, other solutions could have been chosen, but were not examined. For example, the tools could have been designed not to fall from the operator’s grasp (e.g., they could have been attached to the operator), protective mechanisms could have been set up, or tools could have been personally assigned to operators, who were deemed responsible for them. The composition of the team was coherent with the productive organization and the concerned people were called to find a solution collectively. Other people could have been interviewed to obtain more knowledge about the phenomenon, such as the designers or suppliers of the tools, the responsible of the tools for the factory, a metrology expert, an ergonomics expert, or workers used to working at height, such as tree trimmers and mountain climbers. The problem-solvers forgot to consider the human factor, and the solution was arrived at immediately without any testing or iterations. The drawbacks were ignored because the solution was considered sufficient to solve the problem, and thus the project was closed.

6.2 Case study 2: expandable prescription—safety mattresses

6.2.1 The project

A team was created to deal with safety in the factory, knowing that the primary cause of serious injuries was falls from a height. When the project started, the main means of preventing falls were safety guards and harnesses.

First, the project team had the idea of adding safety mattresses to the existing safety equipment. They obtained statistics showing that safety mattresses reduced the risk of death or serious injury from falls by a factor of 100. However, the safety experts of the factory who advised the team argued that the particular solution of the safety mattresses to prevent heavy injuries was forbidden under the factory norms. There is a principle underlying the safety rules stating that if you have two forms of defense, it means that you

have acknowledged that individually, they are ineffective. The aim is to have a single efficient form of defense. The management means (training, panels etc.) will avoid this barrier of defense from being breached. The legal norms consider that the work conditions are safer without redundancy, but with a robust first line. The reader accustomed to industrial environments could be astonished of this rule, which is though in force in construction sector and for industrial environment of work at height.

The team decided to design a new solution and sought additional knowledge that could introduce new concepts that might solve the problem. They investigated the problem not only from an industrial perspective, but also from other perspectives, such as those pertaining to security and safety in nuclear plants and aerospace manufacturing. Two main concepts were identified.

The first was the two independent lines of defense principle. This was discovered in its application in particular contexts related to the system safety: in nuclear plants, as well as in aircraft manufacturing, there are two (or sometimes three) lines of defense. The probability of accidents is lower when there are two independent safety lines rather than only one that is considered unbreachable (in the case of the safety guards, simple human error can render the safety system inefficient). In an aircraft, all of the systems that enable the aircraft to fly safely are redundant. If the main system is lost, the second system replaces it.

The second was the difference between safety and conformity to the norms and standards. In the engineering department, two independent teams are responsible for ensuring the factory's conformity to the international norms and standards and for improving safety. Conformity to the standards and norms alone does not guarantee the safety of the aircraft manufacturing process.

These two concepts were combined to support the use of safety mattresses in the Saint-Nazaire Airbus factory. The mattresses were considered to provide a level of safety that was much higher than that prescribed by the industrial standards. Thus, a new prescription was issued to ensure that safety mattresses were added wherever there was a risk of falling to provide a second line of defense in addition to the safety guards and harnesses.

The team went to work on safety in the factory and applied these two concepts to other equipment and processes. All of the proposed solutions for improving safety were considered and a solution was eventually selected on the basis of the estimated probability of an accident causing death or serious injury.

In this case, the reader could find the redundancy not innovative, since it has been used for a long time in other

sectors, in particular those where the security and the safety are highly critical. However, in our case, the factory could have explored this apparently forbidden principle, and could have proved that, applied to the falls, it decreased significantly the risk of high injuries. Hence, the innovativeness of this case comes from the ability the team to expand the system of rules even it is in apparent contradiction with the first safety standards.

6.2.2 The design regime

This case study corresponded to project 11 listed in Table 2, with all criteria coded as 1, which is typical of the expandable prescription regime. The team fluctuated in size between five and 10 people, but they met with a lot of other people (e.g., experts in various fields, people responsible for security, and managers). The process consisted of regular meetings with shop-floor operators, employees from the manufacturing engineering department, and industrial safety experts, among others.

Some of the criteria were more important in relation to this design regime. For example, criterion 2 ("some people do not become experts") was coded as 1 because some people in the team were not security experts. The team included pilots, aeronautics engineers, and safety experts, and they were not integrated into the team to the same degree. They visited a nuclear plant and an airport control tower to obtain a wider perception of security beyond the scope of the Airbus factory. These excursions introduced the principle of the second line of defense to the participants.

Criterion 6 (i.e., the problem must be clarified and measured) is also typical of an innovative design approach. Indeed, the project was an opportunity to develop a deeper understanding of the risks to the operators and to develop statistical measures of these risks. These measures were systematic, and did not previously exist. Several potential solutions were prototyped and tested, with quantitative results being obtained to enable a comparison of the efficiency of the various proposed measures before arriving at the safety mattress solution. An exploration was launched to find, respectively, the concept 1 and the concept 2. Finally, the mattresses have been applied as a safety solution. The team in charge of improving safety was always responsible for the improvement of the solution or the implementation of a new solution. This team examined other safety contexts and considered the concepts of two independent lines of defense and safety versus conformity in arriving at their preferred solution.

7 Results

7.1 The two design regimes coexist in the factory for two classes of problem and two classes of performance

7.1.1 The coexistence of the two design regimes

The quantitative analysis and the case studies show that the two design regimes coexist. The reader could not be surprised by this result. Nevertheless, this reminds that in the same conditions and environment, two different regimes can occur depending on the problem and the way of designing the solution. One could have expected an alignment between the state and the regime, and that for one environment, only one regime would be more adapted and would finally “survive”. This result tells the contrary. Then, what could be said about these regimes and their relations?

The first regime combines the factory’s internal resources to optimize processes and the application of the engineering department’s prescriptions. The second regime expands the prescriptions and enables the rules to evolve. The methods used in one design regime are generally not mixed with those used in the other design regime, and thus the two regimes appear to be separate. In the factory, the two design regimes do not compete. The fact that some cases are solved in the expandable prescription regime does not prevent other cases to be solved in the closed prescription regime at the same time, and vice versa. It highlights the role played by the design management in the factory to create new rules when it is necessary.

7.1.2 Two regimes for two types of problems

The first regime is applied when the performance is already known. In this case, the solving remains very local and there is no need to create new rules. Thus, design using a closed prescription regime seems to be a good approach. This regime remains essential for production, is easily implementable, and is adapted to the factory’s problems. Problem-solving approaches are extremely useful in relation to a specific category of problems, that is, local, immediate problems, or problems to which there are immediate, practical solutions.

The second regime is applicable to another category of problems, that is, involving situations where performance needs to evolve or where the problem is poorly defined or understood, such as:

1. Broad questions or wide performance axis, for example, providing safe working conditions. Safety must be more precisely defined in the exploration phase.
2. Difficult problems to which several possible solutions are available but no one knows a priori which one should be chosen, for example, installing a robot to improve the rate of production. Which robot, applied to which operation, and for which level of performance?
3. Problems that appear to lack any possible solution, and thus require a redefinition of performance to be overcome. For example, to reduce the backlog of projects requiring the resolution of quality problems, adding people to accelerate the process did not decrease the backlog. A redefinition of what it is called a “quality problem”, and a re-discussion of the process and the skills to treat them was necessary.

The capacity to answer to a new performance axis is also crucial for the factory. The innovative design literature describes innovative methods as “generative”, that is, they have “the capacity to generate new propositions that are made of known building blocks but are still different from all previously known combinations of these building blocks” (Fantini et al. 2018; Hatchuel et al. 2018). In the context of manufacturing, this involves the ability to create a new rule. In the present study, considering the initial problem as poorly known and poorly defined, new measures emerge and new performance variables appear when the solution is designed. This could be interpreted as generativity.

7.1.3 Two types of results

The results showed that the performances of the two regimes differed in terms of their robustness. This is evidenced by the fact that some solutions proved to be viable in the long term, and were extended to other programs. We found that projects using the expandable prescription regime generated longer term solutions than those using the closed prescription regime.

Robustness reflects the persistence of a solution over a wide range of conditions and shocks, and increases the possibility that the solution will not be restricted to a local field. In the majority of the projects using the second design regime, that is, an innovative design approach, the solution (or new rule) was adopted and used in other factory programs. These solutions proved robust in response to random events affecting the production line, for example, changes in employees or managers, supplier delays, new standards, new clients, a change in the production rate...

Nevertheless, this remark does not invalidate the accuracy of the closed-prescription regime. Indeed, there is

a class of problems that can be treated with a scarcity of resources, in an economical way, taking advantage of the available means. They are solved in a short-term view. The expandable prescription regime seems to be favored for recurrent subjects for which none of the existing solutions hold in the long term, and which require time, financial resources, skills, and a strong design approach to be tackled. Consequently, the item “success” for each case should not be considered as a pass or fail criterion, but as a question of priority in the means allocated. This suggests two strategies of fitness that can be concomitant and complementary in the factory for the problems occurring.

7.2 Conditions necessary for the expandable prescription regime

7.2.1 The transition to an expandable prescription regime

The results invite us to look at the transition toward an expandable prescription regime when it is required. The 16 criteria that were identified appear to provide an insight into the factory’s requirements in terms of teams, skill sets, numbers of meetings, and experimental approaches. Nevertheless, the conditions necessary for the implementation of the expandable prescription regime are not easy to attain in a manufacturing environment already fully prescribed. In the Saint-Nazaire Airbus factory, the transition to a state where an expandable design approach could coexist with the expected closed prescription design approach took 5 years. It continues to evolve because it relies on specific skills in relation to the creation and training of the teams. The process also required strong support from the managers, the necessary attention and time to develop this new method, and embodiment into the future strategy of the factory. Finally, it could be said that the efforts to develop, test, and implement the expandable prescription regime were intense. This result is coherent with the PSI theory (Reich and Subrahmanian 2020), which explains that to address all the challenges, the organization must align the problem, social, institutional (PSI) spaces. The support from the management to foster the design activity in the factory for some of the problems can be interpreted as the support for the necessary alignment of the skills at the operation layer.

This study follows previous studies on change management in the field of manufacturing. As Koch et al. (2016) explained, change management in a factory is very specific regarding the engineering change management. Indeed the change management in manufacturing needs a specific organization, planning, and methodology group to adapt to the factory’s needs. Thus, further research is necessary

to understand what form of change management is needed to introduce innovative methods into the manufacturing process.

7.2.2 Means

Some specific conditions were observed in the Airbus factory that seemed essential for the existence of the expandable prescription design regime:

- **Time:** The exploration could spend from few half-day meetings to a 6-month intensive exploration. The meetings were generally held weekly. The time and number of the meetings required were unknown at the beginning of the project.
- **People:** The composition of the team was crucial. Differing from a classical multifunctional team, the expandable design regime did not necessarily correspond to the division of labor included in the composition of the team. It included external people from other sectors (e.g., nuclear energy) and other specialties (e.g., psychologists), as well as from the shop floor, but also from the manufacturing engineering department and sometimes the engineering department. The need for input from these experts was not necessarily apparent at the beginning of the project because the requirements changed depending on the exploratory path the team followed. People made themselves available and could be released from their daily work responsibilities. The team grew to include more people from more varied backgrounds as the exploration continued.
- **A place dedicated to meetings:** In the factory, the teams were able to meet in a comfortable room dedicated to this type of innovative project. The room contained books for documentation purpose, and charts illustrating the progress of the project were displayed. The project teams were also able to visit various experts outside the factory.
- **Rapid prototyping:** The teams had access to resources that enabled them to develop prototypes quickly, including a 3D printer and software for simulations and an aircraft for testing. The design solutions needed to be integrated into their existing environment without disturbing it. In contrast to designing a new product, the design solutions for the production line needed to consider potential disruptions and negative impacts on the overall production system. Therefore, partial and full prototyping were crucial for proving the efficiency of a design solution and exploring potential negative impacts. Prototypes were used not only to validate potential solutions, but also to open up new areas of investigation with the aim of improving the solution.

These resources are generally not available in a factory where all of the processes and the rate of production are optimized, people do not mix with each other because of the strict division of labor, and there are few resources, either internal or external, in the form of knowledge from other disciplines. However, our observations and informal qualitative data indicated that these material conditions and the openness of the factory to other sectors and scientific disciplines seemed to be significant factors underlying the success of the projects. It can be seen that the means necessary for the existence of an expandable design regime are those necessary for design-oriented thinking. More generally speaking, compared with the usual design process that occurs in the factory setting, the expendable prescription design regime differs not only in terms of the availability of the necessary resources (more people, more time, a dedicated meeting place, and access to prototyping), but also in the partial awareness of them at the beginning: as detailed in the previous list, the means (people, time, places...) which are going to be used in the design process are only partially known when the project starts.

7.2.3 Innovative design skills and an innovation leader

A design specialist who was able to lead the investigation into the problem and the exploratory process was invaluable in terms of avoiding fixation effects and training the team in the necessary design methods. Training and the development of design skills are crucial if the team is to move beyond the usual ready-to-use solutions.

The leader should be not only a very good team leader, but also a de-fixation leader, that is, he or she should be able to anticipate the fixations of the teams in relation to a particular solution or problem and should lead the team toward examining other ideas. Thus, the leader should prepare an exploration of possible solutions and should be able to detect any fixation, thereby avoiding a focus on a single trail of investigation and encouraging the systematic exploration of all possible trails. This requires constant comparisons of the various possible solutions explored and encouraging the team to go beyond the paths already explored.

7.2.4 Support

Supporting this project is possible only with the voluntary support of the management of the factory. The design process is not standardized, and thus the results, that is, the emergence of new rules, are liable to change the manufacturing processes and standards. Moreover, the design process requires time and people to be made available. For these reasons, management was aware of and had investigated and gave its agreement to the 30 projects. During successive gates, it examined the solution, including the methods used

and the results expected. Hence top management followed and supported the projects. The support of the employees was also required, despite the fact that the implications of the work were not always obvious because the tasks they were required to undertake in the workshops differed significantly from their usual tasks. Involvement in the more exploratory projects required participation in several workshops over a period of several months involving new challenges including training in design, collaboration in search of new knowledge, and awareness of the fixation effect.

8 Discussion and conclusion

This study investigated a factory that has a significant capability to change its own rules and organization, enabling the design of innovative and robust solutions for its shop floor. The Saint-Nazaire Airbus factory provides an example of the emergence and the coexistence of two design regimes. The first one, a closed prescription regime, consists of the optimization of the manufacturing process under a given and stable system of rules by a conservative approach. The second one, an expandable prescription regime, breaks and expands the system of rules by an innovative design approach. Previous research field, for instance the literature of project management, innovation management, new product development, have described the two regimes in general terms, with a product or a project vision. Nevertheless, they have not investigated their use in a factory setting. We found that the methods and models used for product development or the management of an engineering department or an innovation laboratory are not necessarily directly suited to the complexity and specific challenges of the manufacturing context. In particular, our findings highlight the need to build robust solutions rather than extremely innovative ones.

The findings of this study invite the reader to view production systems through another lens, illustrating the value of a factory that designs its own rules, of workers with design skills, and of adaptable management. Even in a field such as aeronautical manufacturing, which includes a high level of norms regarding products and industrialization in terms of quality, safety, and traceability, the processes used and the form of organization can evolve, and new rules can be designed at the shop-floor level. Our findings indicate that the expandable design is characterized by the ability to find new performance criteria in search of robust solutions, even in a very standardized and complex environment. To that extend, the notion of creative heritage highlights this potential of novelty emerging from the constrained system of rules of the factory (Carvajal Pérez et al. 2020; Hatchuel et al. 2019). The characteristics of the expandable design tend to bring to light a very progressive approach in the design of the solution: the iteration, tests, the improvement

of the solution even if the project could be considered as finished... This contradicts the expectation of disruption that is commonly expected from strong forms of innovation (Si and Chen 2020; Christensen et al. 2018). In this research, the innovation is not marginal nor disruptive, but results from the industrial rules. It conserves them, makes them evolve at the same time.

The use of this design regime despite the constraints of existing routines and norms that exist in this manufacturing sector, and the robustness of the solutions offered, could also provide lessons for Industry 4.0. In an era of industrial reshoring, it is tempting to pursue total automation of the production line. However, this strategy only seems to be relevant under certain situations in relation to existing human resource management practices and workplace skills (Lund and Steen 2020). More generally, studies on Industry 4.0 have questioned the place and work of people in a cyber-physical system (Kadir et al. 2019). The final report of the Industry 4.0 working group (Kagermann et al. 2013) noted changes in the nature of work for people under Industry 4.0 toward tasks involving more complexity and abstraction, with an increased emphasis on problem-solving. The human factors and ergonomics literature, which focuses on human-machine interactions, has emphasized the importance of ergonomics in Industry 4.0, including physical, cognitive, and organizational ergonomics (Reiman 2021). Some studies have argued for earlier entry of humans into the design of the system to avoid the “magic operator effect,” that is, an omniscient operator who only becomes involved in the production flow when problems that were not predicted by the system require solving (Trentesaux and Millot 2016). The operator can also be integrated with the system in a human-automation symbiosis (Scafà et al. 2020). This study presents the keys to understanding possible ways of designing projects in conjunction with the operators to improve their ergonomics. However, the projects in which the operators can be involved are not limited to those aimed at the improvement and optimization of their own working conditions. On the contrary, the operators can be involved in broader projects, wherein their experience, expertise, knowledge of the factory, and design skills are of considerable use to an exploratory design approach. Taylor et al. (2020) describe an operator on the production line who is involved in design activities across a broader manufacturing

scope than their own specialized production task. The findings of this study provide new insights regarding the types of design activity in which these operators can be involved. These operators are not only able to execute and optimize the rules in an entirely prescribed system, but also able to create new rules, and thus allow the system to evolve.

Appendix

1. See Table 3.
2. Wilcoxon test.

The samples seemed to be very polarized and not particularly mixed in terms of design regime; the authors wanted to test if the median of the samples were significantly different. Considering the small size of the samples, a Mann-Whitney-Wilcoxon test was performed to assess the difference between the two samples. The number of criteria coded as 1 was calculated for each project. Hence each project received a “grade” and the projects had an order between them. In presence of ex-aequo ranks, the software R used for this test computes the statistics *W* with a continuity correction.

Hypotheses

Hypothesis zero (H0): The means of the two samples are equal.

Hypothesis one (H1): The means of the two samples are not equal.

Results

The Wilcoxon test statistic is denoted as *W*, where $W=0$ p value = 4.628e - 06. Thus, H0 is rejected at the 5% level.

Conclusion

We found two clearly distinct populations.

Some of the projects had one or more criteria coded in accordance with the other regime. This shows that the projects were not totally homogenous, and some methods and organizations could be used under both regimes.

3. Chi-square test.

This test checks for independence between the type of regime and the level of success achieved.

A Chi-square test using one degree of freedom was implemented at the 5% level. This was consistent with the number of projects treated (30).

Table 3 The project characteristics

case	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
people in the core team	5	25	12	300	8	15	35	35	10	45	20	10	4	50	10	150	8	40	25	150	50	40	25	15	40	80	45	5	60	20
punctual experts advisors	1	10	2	25	2	4	3	3	2	15	3	2	3	4	2	20	2	4	5	10	3	0	5	3	0	5	3	1	8	2
number of project gates	1	8	2	12	3	2	6	6	0	10	2	3	0	2	5	8	3	0	8	4	0	0	8	3	0	4	4	3	8	0
number of meetings	3	50	5	100	5	8	15	15	>100	50	6	6	4	5	10	40	6	8	30	15	8	5	30	15	12	8	8	7	30	10

The number of people and the project characteristics are estimated. This table shows a high heterogeneity in the size of the projects

Hypotheses

Hypothesis zero (H0): The design regime and the level of success are independent.

Hypothesis one (H1): The design regime and the level of success are not independent.

Results

The result was a value of 18.8, which is higher than the theoretical value of 7.88. The p value was 1.45×10^{-5} .

Conclusion

The level of success and the design regime are not independent. Thus, H0 was rejected at the 5% level.

Acknowledgements We thank Geoff Whyte, MBA, from Edanz Group (<https://en-author-services.edanzgroup.com/ac>) for editing a draft of this manuscript.

Funding This research is funded by the Chair of Design Theory and Methods for Innovation, which is sponsored by 16 companies, including Airbus.

References

- Abdulmalek FA, Rajgopal J (2007) Analyzing the benefits of lean manufacturing and value stream mapping via simulation: a process sector case study. *Int J Prod Econ* 107(1):223–236
- Adamczyk S, Bullinger AC, Möslin KM (2012) Innovation contests: a review, classification and outlook. *Creat Innov Manag* 21(4):335–360
- Anand G, Ward PT, Tatikonda MV, Schilling DA (2009) Dynamic capabilities through continuous improvement infrastructure. *J Oper Manag* 27(6):444–461
- Barker M, Neailey K (1999) From individual learning to project team learning and innovation: a structured approach. *J Workplace Learn* 11(2):60–67. <https://doi.org/10.1108/13665629910260752>
- Bullinger AC, Neyer A-K, Rass M, Moeslein KM (2010) Community-based innovation contests: where competition meets cooperation. *Creat Innov Manag* 19(3):290–303. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8691.2010.00565.x>
- Caloghirou Y, Kastelli I, Tsakanikas A (2004) Internal capabilities and external knowledge sources: complements or substitutes for innovative performance? *Technovation* 24(1):29–39
- Campanelli AS, Parreiras FS (2015) Agile methods tailoring—a systematic literature review. *J Syst Softw* 110:85–100
- Carvajal Pérez D, Le Masson P, Weil B, Araud A, Chaperon V (2020) Creative heritage: overcoming tensions between innovation and tradition in the luxury industry. *Creat Innov Manag* 29:140–151
- Charue-Duboc F, Aggeri F, Chanal V, Garel G (2010) Managing Exploratory Innovation, 2010 European Academy of Management Conference, 1–33
- Chen LH, Chen YH (1996) A design procedure for a robust job shop manufacturing system under a constraint using computer simulation experiments. *Comput ind eng* 30(1):1–12.
- Christensen CM, McDonald R, Altman EJ, Palmer JE (2018) Disruptive innovation: an intellectual history and directions for future research. *J Manag Stud* 55(7):1043–1078. <https://doi.org/10.1111/joms.12349>
- Cross N (2011) Design thinking: understanding how designers think and work. Berg Publishers, Oxford
- Cunha MPE (2005) Bricolage in organizations. *SSRN Electron J*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.882784>
- Dorst K (2006) Design problems and design paradoxes. *Des Issues* 22(3):14
- Duymedjian R, Rüling C-C (2010) Towards a foundation of bricolage in organization and management theory. *Organ Stud* 31(2):133–151. <https://doi.org/10.1177/0170840609347051>
- Engwall M, Svensson C (2004) Cheetah teams in product development: the most extreme form of temporary organization? *Scand J Manag* 20(3):297–317. <https://doi.org/10.1016/j.scaman.2003.05.001>
- Fantini P, Pinzone M, Taisch M (2018) Placing the operator at the centre of Industry 4.0 design: modelling and assessing human activities within cyber-physical systems. *Comput Ind Eng*. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.01.025>
- Fargnoli M, Lombardi M, Haber N, Guadagno F (2020) Hazard function deployment: a QFD-based tool for the assessment of working tasks—a practical study in the construction industry. *Int J Occup Saf Ergon* 26(2):348–369. <https://doi.org/10.1080/10803548.2018.1483100>
- Fujimoto T (2012) The evolution of production systems exploring the sources of Toyota's competitiveness. *Ann Bus Adm Sci* 11:25–44
- Gilbert P, Teglborg A-C, Raulet-Croset N (2018) The liberated firm, a radical innovation or a mere avatar of participatory management? *Gérer Et Compr* 3:1–10
- Grewal C (2008) An initiative to implement lean manufacturing using value stream mapping in a small company. *Int J Manuf Technol Manag* 15(3–4):404–417
- Hatchuel A (2001) Towards Design Theory and Expandable Rationality: The Unfinished Program of Herbert Simon. *J Manag Gov* 5(3/4):260–273
- Hatchuel A, Chen MK (2017) Creativity under strong constraints: the hidden influence of Design Models. *Eur Rev* 25(2):194–207. <https://doi.org/10.1017/S1062798716000557>
- Hatchuel A, Le Masson P, Weil B (2001) From R&D to RID: design strategies and the management of innovation fields. In: 8th International product development management conference, pp 415–430
- Hatchuel A, Reich Y, Le Masson P, Weil B, Kazakçi A (2013) Beyond models and decisions: situating design through generative functions. In: DS 75-2: proceedings of the 19th international conference on engineering design (ICED13), design for harmonies, Design theory and research methodology, Seoul, Korea, 19–22.08, vol 2, pp 233–242
- Hatchuel A, Le Masson P, Reich Y, Subrahmanian E (2018) Design theory: a foundation of a new paradigm for design science and engineering. *Res Eng Des* 29(1):5–21
- 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. *Proc Des Soc Int Conf Eng Des* 1(1):1543–1552. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.160>
- Hooge S, Chen M, Laousse D (2018) Dynamics of innovative concepts in exploratory projects: managing consistency between originality, collaboration and strategy. In R&D Management Conference 2018, "R&Designing Innovation: Transformational Challenges for Organizations and Society".
- Ikävalko H, Lempiälä T (2019) Innovation contests, routine dynamics and innovation management. *Creat Innov Manag* 28(2):191–202. <https://doi.org/10.1111/caim.12299>
- Iwao S (2017) Revisiting the existing notion of continuous improvement (Kaizen): literature review and field research of Toyota from a perspective of innovation. *Evol Inst Econ Rev*. 14(1):29–59
- Iwao S, Marinov M (2018) Linking continuous improvement to manufacturing performance. *Benchmarking Int J*. 25(5):1319–1332. <https://doi.org/10.1108/BIJ-06-2015-0061>

- Johansson-Sköldberg U, Woodilla J, Çetinkaya M (2013) Design thinking: past, present and possible futures. *Creat Innov Manag* 22(2):121–146
- Kadir BA, Broberg O, da Conceicao CS. (2019) Current research and future perspectives on human factors and ergonomics in Industry 4.0. *Comput Ind Eng* 137:106004
- Kagermann H, Wahlster W, Helbig J (2013) Securing the future of german manufacturing industry: recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final Report of the Industrie, vol 4
- Kaplan S (1996) An Introduction to TRIZ, Ideation International Inc., USA
- Kidder T (2011) The soul of a new machine. Hachette, London
- Knol WH, Slomp J, Schouteten RLJ, Lauche K (2019) The relative importance of improvement routines for implementing lean practices. *Int J Oper Prod Manag.* 39(2):214–237. <https://doi.org/10.1108/IJOPM-01-2018-0010>
- Koch J, Gritsch A, Reinhart G (2016) Process design for the management of changes in manufacturing: toward a manufacturing change management process. *CIRP J Manuf Sci Technol* 14:10–19. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2016.04.010>
- Krishnan V, Ulrich KT (2001) Product development decisions: a review of the literature. *Manag Sci* 47(1):1–21
- Kuipers BS, De Witte MC, van der Zwaan AH (2004) Design or development? Beyond the LP-STs debate; inputs from a Volvo Truck case. *Int J Oper Prod Manag.* 24(8):840–854. <https://doi.org/10.1108/01443570410548257>
- Lenfle S, Midler C (2003) Innovation in automotive telematics services: characteristics of the field and management principles. *Int J Automot Technol Manag* 3(1–2):144–159
- Lenfle S, Midler C (2009) The launch of innovative product-related services: lessons from automotive telematics. *Res Policy* 38(1):156–169. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2008.10.020>
- Lévi-Strauss C (1962) Savage mind. University of Chicago, Chicago
- Li Y, Vanhaverbeke W, Schoenmakers W (2008) Exploration and exploitation in innovation: reframing the interpretation. *Creat Innov Manag* 17(2):107–126. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8691.2008.00477.x>
- Lu SC-Y, Conger A (2007) Supporting participative joint decisions in integrated design and manufacturing teams. In: Tichkiewitch S, Tollenaere M, Ray P (eds) *Advances in integrated design and manufacturing in mechanical engineering II*. Springer, Dordrecht, pp 3–22. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6761-7_1
- Lund HB, Steen M (2020) Make at home or abroad? Manufacturing reshoring through a GPN lens: a Norwegian case study. *Geoforum* 113:154–164. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2020.04.015>
- Maher ML, Poon J (1996) Modeling design exploration as co-evolution. *Computer-Aided Civ Infrastruct Eng* 11(3):195–209
- Micheli P, Wilner SJS, Bhatti SH, Mura M, Beverland MB (2019) Doing design thinking: conceptual review, synthesis, and research agenda. *J Prod Innov Manag* 36(2):124–148
- Paton B, Dorst K (2011) Briefing and reframing: a situated practice. *Des Stud* 32(6):573–587
- Pfeiffer S, Lee H, Held M (2019) Doing Industry 4.0 – participatory design on the shop floor in the view of engineering employees. *Cuad Relac Laborales* 37(2):293–311. <https://doi.org/10.5209/crla.66039>
- Polacsek T, Roussel S, Bouissiere F, Cuiller C, Dereux P-E, Kersuzan S (2017) Towards thinking manufacturing and design together: an aeronautical case study. In: *International conference on conceptual modeling*, Springer, pp 340–53
- Rafaeli A (1985) Quality circles and employee attitudes. *Pers Psychol* 38(3):603–615
- Rantanen K, Domb E, Simplified TRIZ (2002) New problem solving applications for engineers and manufacturing professionals. St Lucie Press, Boca Raton
- Realf, Matthew J, Jane CA, David JN (2004) Robust Reverse Production System Design for Carpet Recycling. *Iie Transactions* 36(8):767–76.
- Reich Y, Subrahmanian E (2020) The PSI framework and theory of design. *IEEE Trans Eng Manag.* <https://doi.org/10.1109/TEM.2020.2973238>
- Reiman A, Kaivo-oja J, Parviainen E, Takala EP, Lauraeus T (2021). Human factors and ergonomics in manufacturing in the industry 4.0 context—A scoping review. *Technol Soc* 65:101572
- Rhodes L, Dawson R (2013) Lessons learned from lessons learned. *Knowl Process Manag* 20(3):154–160. <https://doi.org/10.1002/kpm.1415>
- Roucoules L, Yahia E, Soufi WE, Tichkiewitch S (2016) Engineering design memory for design rationale and change management toward innovation. *CIRP Ann* 65(1):193–196. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.046>
- Scafà M, Marconi M, Germani M (2020) A critical review of symbiosis approaches in the context of Industry 4.0. *J Comput Des Eng* 7(3):269–278. <https://doi.org/10.1093/jcde/qwaa022>
- Schmidt JB, Sarangee KR, Montoya MM (2009) Exploring new product development project review practices. *J Prod Innov Manag* 26(5):520–535
- Schön DA (1987) Educating the reflective practitioner: toward a new design for teaching and learning in the professions. *Jossey-Bass Higher Education Series*
- Schön DA (1990) The design process. In: *Varieties of Thinking: Essays from Harvard's Philosophy of Education Research Center*, pp 110–141
- Scott-Young C, Samson D (2008) Project success and project team management: evidence from capital projects in the process industries. *J Oper Manag* 26(6):749–766
- Shah MK, Deshpande VA, Patil RM (2015) A review on lean tools & techniques: continuous improvement in industry. *Int J Adv Ind Eng* 3(4):200–207
- Sharda B, Banerjee A (2013) Robust manufacturing system design using multi objective genetic algorithms, Petri nets and Bayesian uncertainty representation. *J Manuf Syst* 32(2):315–324
- Si S, Chen H (2020) A literature review of disruptive innovation: what it is, how it works and where it goes. *J Eng Technol Manag* 56:101568
- Simonsen J, Hertzum M (2012) Sustained participatory design: extending the iterative approach. *Des Issues* 28(3):10–21
- Stratton R, Mann D (2003) Systematic innovation and the underlying principles behind TRIZ and TOC. *J Mater Process Technol* 139(1–3):120–126.
- Taylor MP, Boxall P, Chen JJJ, Xun Xu, Liew A, Adeniji A (2020) Operator 4.0 or Maker 1.0? Exploring the implications of Industrie 4.0 for innovation, safety and quality of work in small economies and enterprises. *Comput Ind Eng* 139:105486. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.10.047>
- Thompson P, Wallace T (1996) Redesigning production through teamworking: case studies from the Volvo Truck Corporation. *Int J Oper Prod Manag* 16(2):103–118. <https://doi.org/10.1108/01443579610109875>
- Trentesaux D, Millot P (2016) A human-centred design to break the myth of the ‘magic human’ in intelligent manufacturing systems. In: *Service orientation in holonic and multi-agent manufacturing*, Springer, pp 103–113
- Vanharanta O (2018) Whose responsibility is it anyway? Competing narratives of suggestion system change. *Creat Innov Manag* 27(3):244–254. <https://doi.org/10.1111/caim.12286>
- Vijayakumar G, Robinson Y (2016) Impacts of lean tools and techniques for improving manufacturing performance in garment manufacturing scenario: a case study. *Int J Adv Eng Technol* 7(2):251–260

- West MA, Farr JL (1989) Innovation at work: psychological perspectives. *Soc Behav* 4(1):15–30
- Wheelwright SC, Clark KB (1992) Revolutionizing product development: quantum leaps in speed, efficiency, and quality. Simon and Schuster, New York

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

WHAT DOES THE FACTORY'S SUGGESTION BOX REVEAL?

An analysis of the design capabilities of a train maintenance centre from its idea management system

Article submitted to Creativity and Innovation Management in July 2022

Authors: Honorine Harlé, Pascal Le Masson, Benoit Weil, Tony Boulier, Yann Veslin

Abstract

Suggestion boxes have been used in factories to improve processes through a continuous improvement approach. From this perspective, the ideas with direct and quick implementation and visible results are favoured. This paper studies the suggestion box of a train maintenance centre. After classifying the ideas, it highlights that some of them present a design gap. It unearths the means and the collective organization that come up to complete the solutions and to validate them. This paper, thus, contributes to the comprehension of the design activity in factories and goes beyond the dichotomy of continuous versus radical improvement.

Introduction

In order to fuel innovation by finding new ideas, crowdsourcing organizes the collection and the selection of ideas from a large public (Karachiwalla & Pinkow, 2021). The development of digital software and platforms for collaborative innovation has expanded the scope of contributions in the variety of the tools, the accessibility to the targeted public, and the intensity of the idea management actions (Elerud-Tryde & Hooge, 2014). Thus, collecting and selecting ideas can take various forms: internally but in a wider scope than the traditional innovation teams or departments and externally to access individual people outside the firm (Aalbers & Whelan, 2021; Beretta, 2019). Contests can be devoted, for a limited period of time, to solving specific problems, like in a hackaton (Temiz, 2021), or to the determination of more open perspectives, like a contest to develop entrepreneurship (Hooge et al., 2018). Wide questions that seem particularly unsolvable can also be addressed to the crowd, as with the Millenium prize problems in Mathematics. Crowdsourcing can be more or less routinized (Ikävalko and Lempiälä 2019). The evaluation ideas require complete and directly implementable solutions or possible refinements and improvements to the solution (Sukhov et al., 2021).

When used in factories, crowdsourcing meets the constraints inherent to the shopfloor production: the factory is a place of execution and not ideation; operators are highly prescribed, their objectives and the guidance, and time for processes are very precise and let little place for innovation. Moreover, the factory's performance should be maintained and

cannot suffer from troubles caused by experimentation. However, the shop floor operators are often involved in the performance of the production, especially in the continuous improvement approach. For this reason, they have to detect the problems and the losses that become sources of potential gains when they are solved. Among the tools used to foster continuous improvement in a participative way, the suggestion box, physical or virtual, is often used. The operators, as users of the production line, are better placed to propose ideas and to implement them. They receive their prize in the function of the effect of the improvement of the production performance. However, this tool faces ambiguities: is it a simple way to identify and solve the problems and losses of the production line or is it a strong tool for innovation? Is it a tool to optimize the prescription or to change it? Can innovation can be expected from this tool when it was first devoted to address daily problems on the shop floor? What is the appropriate selection of ideas and management for it to ensure that the ideas would not decrease the production rate?

Ostrowski and Jagodziński (2021) suggested that the implementation, the management, and the effect of a suggestion system are different between a productive and an administrative department. The literature about the nature and the conditions of the success of a suggestion box in a manufacturing context remains poor. This article intends to highlight the conflict between the manufacturing impossibility to change the rules and the wish to make them evolve through the suggestion box. It will show the different types of ideas as well as the effort and organization needed to address not only the directly implementable ideas but also the less obvious ones with regard to the rules. Thus, this article contributes to the comprehension of the perimeters, the performance, and the conditions of an “institutionalized innovation function” (O’Connor, 2018) in the manufacturing context, not a-priori favourable to high change and radical innovation.

The authors went to a train maintenance centre of the French railway company SNCF. Historically, SNCF employees’ innovation power has been recognized: the suggestion box was implemented systematically and unified in 1939 in the new company. The employees’ innovative ideas are known to have contributed to the technical progress of the railway in France.

In this context, this article investigates the suggestion box of this maintenance centre. What does it reveal regarding the innovation processes and challenges in a factory?

First, this study conducts a literature review on the suggestion schemes in the manufacturing context and in the general context. Then, two research questions are presented regarding the selection and management of the ideas to be developed in a factory. The methodology section explains the field, the material, and its method of analysis to answer to the presented questions. The analysis section highlights the characteristics of the ideas found. The results are presented in a fifth section, followed by a discussion. Finally, the authors present managerial implications for the design in a factory.

1. Literature review

1.1. A short genealogy of suggestion systems in the manufacturing context

Suggestion systems emerged and were developed during the 19th century in the manufacturing industry (Gerlach & Brem, 2017). Eastman Kodak was one of the famous first examples of a US company implementing a suggestion box for its employees to foster their creativity and raise their commitment (Carnevale & Sharp, 1993). Funding the scientific organization, F.W.Taylor separated the design and production activities, isolating the execution function on the shop floor. This organization led to high productive gains. However, the innovation function was not expected from the operators but from the engineering office. Nevertheless, suggestion systems were tested in Taylorian factories to support the shop floor performance: the French company Michelin, one of the first French enterprises to import and implement Taylorian ideas, already collected the operators' ideas in a physical box in the 1920s. At the same time, a suggestion engineer was in charge of motivating them to post and implement the suggestions. However, the suggestion box was given up on after few years (Tesi, 2008). Later, the suggestion systems principle was re-introduced in factories as a way to make the work more participative. The suggestion box has been a tool of first importance for continuous improvement (the Kaizen approach) in the Toyota production system ((Yasuda, 1991) (Recht & Wilderom, 1998)) and in lean manufacturing (e.g., (Moica et al., 2018)). Indeed, one of the principles of continuous improvement is the contribution of all the employees to the productive performance, including those working on the shop floor. Hence, the functions of the suggestion box are various: to collect employees' opinion, to be more democratic, and to stimulate employees' engagement and their creativity (Thom, 2015).

However, suggestion systems did not remain confined to the manufacturing field but appeared in other fields (Fairbank & Williams, 2001). Idea management, and more particularly the collection of ideas for innovation, were systematized and developed in companies (Gerlach & Brem, 2017). The functions are multiple: e.g., to catch customers and collaborators' ideas to foster innovation and develop new products or to solve problems (Gerlach & Brem, 2017).

1.2. The contribution and known problems of suggestion systems

Suggestion systems and, more generally, participative approaches to collect employee's ideas constituted a pillar of the continuous improvement and gains in productivity in factories. However, it can suffer from many problems: e.g., suggestions systems are given up on after a certain time of implementation, and they do not collect qualitative ideas (Fairbank & Williams, 2001) or people are not motivated to post new ideas (Buech et al., 2010). The literature gives a lot of insights into organizing and designing a system that collects ideas efficiently, by improving the collection of ideas with an adapted management or by making the process transparent and rapid with a rewarding system that provides enough incentive (Fairbank & Williams, 2001).

As a manufacturing tool, the suggestion box has been viewed as a means to foster innovation. However, the type of innovation that is possible as a result of a participative system in a factory

is unclear. In particular, the suggestion box is efficient for small innovation and continuous improvement: it brings forth solutions to optimize the performances on the production line (Carrier, 1998), whereas more elaborate suggestion systems are used in product development to screen radical innovation (Detterfelt et al., 2009). However, there are calls for radical changes across the industrial world to answer present and future challenges (e.g., cleaner production systems, mass customization, and so on). The transition towards industry 4.0 (Alcácer & Cruz-Machado, 2019), sustainable manufacturing (Malek & Desai, 2020), agile factory (Gunasekaran et al., 2019), and more, generally towards creating a desirable future for factories will require significant efforts and not merely continuous improvement.

1.3. The selection of directly implementable ideas

The industrial history of suggestion systems (cf the paragraph (1.1)) reminds that this tool is used to increase the commitment and participation of people in a continuous improvement approach. The generation of numerous improvements was encouraged, but the very original or new ideas for which the implementation is not direct do not fit into the industrial frame and cannot be accepted. Even if it was seen as a tool for innovation (Janssoone, 1999), the idea collection process was often more adapted for incremental innovation ideas. An empirical study on suggestion systems concluded that it produces incremental or minor innovation rather than radical ones (Carrier, 1998). In this configuration, the criterion of evaluation of the ideas is often implicit and not highlighted in the literature: the ideas are validated if they are implementable without any risk of perturbation of the system and rejected otherwise (for instance, in (Neagoe, 2009)). Thus, the validation criterion for this type of industrial suggestion system is a yes/no criterion based on the probability of success of the idea. Then, a more elaborated scale is used to sort the ideas and decide the reward to grant.

In a larger perimeter than manufacturing, this criterion remains. In the new product development or engineering design, the suggestion system enables the participation of people and the decentralization of the idea collection (e.g. Detterfelt, Lovén, and Lakemeond 2009). In this context, Sandstrom and Bjork (2010) describes a first selection process for which the criterion is the possibility for the idea to be commonly treated and implemented by the development project team without passing by a special innovation process.

1.4. A more sophisticated criterion: the nature of the treatment needed

However, idea management concerns different types of ideas: some are ready to implement, whereas others show a design gap before being developable and require a different development process (Boeddrich, 2004). Then, during the collection of idea, one should pay attention to the “false negatives” that are not considered as innovation and are put aside to be given up since they are not in the core business of the company. On the contrary, those ideas should have raised attention of the management since they could be relevant for the future of the company (Chesbrough, 2004). A particular selection, treatment, and validation process is needed for the “out of the box” ideas (Herrmann et al., 2017; Sandstrom & Bjork, 2010). In

particular, the criteria to differentiate them from the “in the box ideas” should be adapted. In Sandstrom and Bjork (2010) the differentiation between the ideas is made by experts assessing the novelty compared with the resources and the capabilities of the company. If the idea is considered to be “out of the box”, it will be treated like a radical innovation project.

In other terms, to avoid approaching the radical and incremental ideas in the same way, companies should have an ambidextrous process for the collection of ideas: a specific procedure should be designed for the exploration ideas to distinguish them from the exploitation ones (THerrmann, Roth, and Binz 2020) and to finally bring the appropriate support to bridge the design gap.

Nevertheless, this last model used in new product development is not suitable for a factory. A factory focuses mainly on the preservation of the production and of the manufacturing system, and the development of innovation in or by the factory itself seems to be difficult. Regarding the complexity of an industrial system and the numerous constraints in it, one could think in a first hypothesis that, in a factory, the suggestion box should only select the ideas that are implementable in a straightforward manner.

Differently, in a second hypothesis, the suggestion box has a wider selection criterion. It includes ideas that present a design gap before their implementation and that need to be treated separately, as the former paragraph suggests for the field of new product development. This article intends to identify this potential design gap and the relevant process for it. However, the notions used previously to characterize innovation, such “out of the box” or “exploration ideas,” are not directly comprehensive for a manufacturing context: how can an idea be “out of the box” if it goes against or beside the industrial rules? That remark claims to distinguish between the selection in a classical innovation process (i.e. filtering by a thorough selection of high-quality ideas) and the selection in the factory of another function.

2. Research questions

The literature review leads to questioning the suggestion system in its manufacturing context: could it have the same properties than in the new product development? Could a factory be able to develop the ideas in a robust way, without perturbing the system? What would be the resources necessary for that? The questioning is structured into the two following research questions:

RQ1. What is the criterion to sort, differentiate, and validate the ideas adapted to a manufacturing suggestion system, to foster innovation on the shop floor?

Is it a yes/no criterion depending on the easiness to implement, or does it exist as a more sophisticated criterion that would collect the *a-priori* rejected ideas and treat them separately?

RQ2. Can a special process for non-implementable ideas exist and be relevant for a manufacturing context? What would be its organization and management? What capabilities would it require?

The question of organization and the management of radical ideas is crucial, since it is, at a first glance, very difficult to set up.

3. Methodology

In order to answer these research questions, the authors conducted an in-depth case study (Eisenhardt, 1989) in the maintenance centre of regional trains at Nantes (France). They analyzed the case through various lengths and mixed methods: they looked at a sequence of 132 ideas from the suggestion box of the centre posted in 2019, from January to September. Then, they took a panel of them to explore them in greater detail. Finally, they studied the standardized requirements at the national level of the suggestion boxes of the SNCF maintenance centres and compared them to the previous analyses of the ideas.

The next part gives the details of the material and the method used.

3.1. Research design and context: the Nantes SNCF maintenance centre

The maintenance centre, located in Nantes, is dedicated to the maintenance of regional trains of the French railway company SNCF, for the trains linking the cities of the region around Nantes (the region “Pays de la Loire”).

The maintenance centre employs about 150 people, with various technical qualifications: electric specialists, heating specialists, interior systems technicians, mechanics, and so on. The centre can operate up to seven trains at the same time, with three shifts around the clock. It performs the maintenance of 35 trains each day.

The technicentre operates the control of the trains and undertakes preventive actions according to the methods department’s rules; it also makes small repairs on the trains. An innovative manager is in charge of the continuous improvement and innovation of the site. Among his tasks, he animates the suggestion system of the technicentre and follows the process of the good treatment and implementation of the ideas. His work and tasks correspond to those of the “continuous improvement officer,” a manufacturing classic, who supports continuous improvement implementation. However, the term “innovation” marks the wish of the SNCF to deeply change its maintenance centres to address the big industrial challenges of the future (e.g., more sustainable, smarter, and so on).

This field was very relevant to study innovation since it has a very long history of continuous improvement. For instance, the 5S method is implemented, the QCDS (Quality Cost Delivery Safety) is narrowly followed in daily briefings, and, among other tools, the suggestion box was officialized in the SNCF maintenance centre in 1954 and has been used ever since. On the other hand, in this centre, the nature of the activity of the train maintenance evolves at the rhythm of the automatization of the systems in the trains, which makes the maintenance skills evolve train generation after train generation. Hence, this centre is the result of a long heritage of rules, practices, and know-hows in train maintenance.

The authors were in partnership with the maintenance centre's director and innovation manager. They visited and came to the technicentre 3 times and carried on one semi-directive interviews of 2h00. They corresponded by calls and emails when precisions were required.

3.2. Material: the suggestion box of the maintenance centre

This suggestion box received about 170 ideas in 2019. It is daily animated by the direct managers of the work groups in the briefing at the beginning of each shift. The managers encourage the operators to post good ideas in the suggestion box. They also follow the idea process and its implementation with the operators. If the idea is not rejected, the operator earns a minimum of 30€, and the financial incentive is scaled in function of the QCDS results of the idea after implementation. Each month, an "innovator of the month" is nominated in the centre and each year a national competition chooses the best suggestions from among the various similar SNCF technicentres.

An idea is an electronic form including the date, the innovator(s) name(s), and the decider's name. The forms include the following categories: description of the problem, description of the solution, advantages, manager(s)' comments; then, a category "recommendation for the implementation" can be added, where the manager can add specifications of the solution. Finally, a category labelled "treatment step" appears, where the successive status of the idea are written, and comments can be added to the status. Hence, the reading of the idea informs the nature of the idea as well as all the potential comments of different managers and experts while the idea was processed.

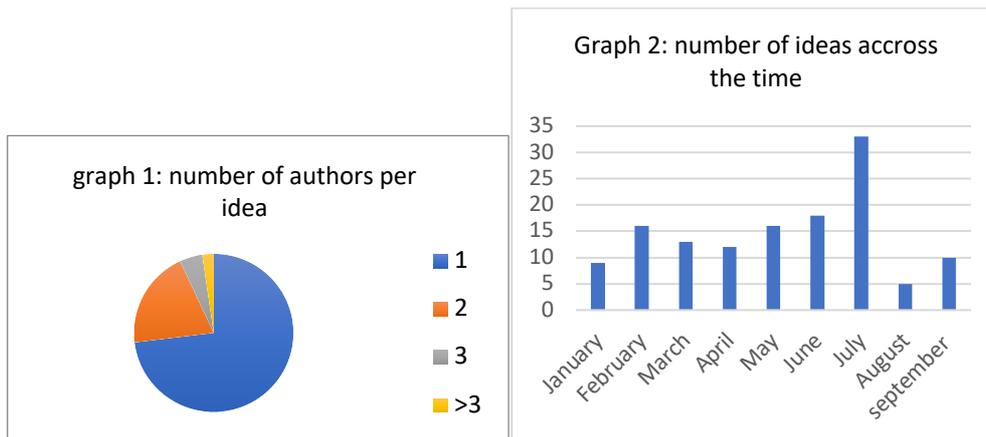
The box has existed for a long time, is well known and used in the factory, and has a manager dedicated for its proper working. Hence, generally speaking, there is no problem of giving up or lack of motivation or implementation of ideas. Second, the suggestion box gathers the innovation of the technicentre and makes it visible and comprehensive from an external point of view. It seems to be a good instrument to capture the meaning of innovation and continuous improvement for a train maintenance centre.

Presentation of the file

The file contains the following characteristics:

- It covers the period between 1st January 2019 and the 30th September 2019:
- There are 93 contributors, over 150 people in the centre. On average, each author published 1.9 ideas. 68% of the contributors (63 people) published only one idea, while 3 people published 6 or 7 ideas.
- In majority, the ideas are written by an author alone or with a colleague: 73% of ideas are written by only one author and 20% of the ideas are written in duo (*cf* graph 1).

- The box was used by the operators throughout the year. The box received an average of 14,6 ideas per month. July was a particularly remarkable month as an operator decided to post 7 ideas at the same time (cf graph 2).
- There were 3 ideas that remained not fully completed by their author;
- Moreover, 11 were not accepted, as the solution was already studied or another solution had already been proposed or because it was not considered as an idea (for instance, somebody who would complain about the organization).



The qualitative nature of the idea is shown and discussed in the fourth section.

3.3. Methods of analysis of the material

To investigate the research questions, various levels of analysis were adopted.

3.3.1. A quantitative analysis

First, the authors picked the 132 ideas from January to September and looked at the history of comments at the end of the idea forms. Some comments were just the validation or the appreciation of the idea (e.g., “good idea that improved the maintenance delay”; “implemented a month ago and works well”; and so on). Others showed an investigation step to design the solution (e.g., an expert is called, the design goes on in a dedicated team with a supplier, for example, and so on). The authors sorted the ideas between those without investigation comments and those with investigation comments.

3.3.2. A qualitative investigation

To have a better understanding of the categories and to understand the resources and the management required for them, the authors studied the types and the idea treatment in greater detail.

They read the comments and could identify 5 categories of comments. The ideas with investigation comments were coded in the function of the comments.

The authors carefully discussed with the innovation manager and the director's centre during two semi-directive interviews of one-and-a-half hours to understand the resources and the organization devoted to the idea treatment to confirm the results.

3.3.3. The match between the tool and the effective process in question: a qualitative investigation of the official rules of the suggestion box

In a third step, the authors read the rules of the suggestion box in details and interviewed the suggestion box's manager for the various technicentres at the national level during an interview call that lasted one-and-a-half hours. They could capture the degrees of freedom given by the suggestion box. They indicated it in a table for each critical rule.

4. Analysis

4.1. The two hidden categories of a unique suggestion box

The authors sort the ideas in two categories: the ideas with or without investigation comments.

4.1.1. A first category of ideas: the tricks directly implementable

The category gathered ideas that include only validation comments or do not include any comments. A validation comment is a manager's comment that underlines the quality of the idea, e.g., "good idea," "too be implemented soon," "to be awarded," and so on. It does not improve or change the nature of the idea itself.

101 ideas belong to this category.

This category includes ideas that are directly implementable.

4.1.2. A second category of ideas: the ideas with design gap

The authors took all the ideas that had investigation comments and gathered them in a category.

An investigation comment is a comment where the manager investigates the solution, such as the following:

- The written solution can be considered as not sufficiently detailed nor specified to have a decision about its implementation; "What diameter, length, would you need?"; "Do you have any reference of this solution in a catalogue?"; "Do you have any picture of its implementation where else?";
- The manager calls a SNCF expert who gives precision on the form (on the technical characteristics or on the rules). "We saw the health and safety committee, who advised to avoid this solution."

- The manager asks for a quotation to a supplier and finishes the specifications and the design with him.

Of all the ideas, 31 were noticed to have investigation comments and thus belong to the second category.

Among the 31 ideas, the 7 ideas with the status “in-depth investigation” received investigation comments. The comments were precise to the necessary investigation (Manager 1 to Manager 2): “Can you tell me if this innovation is taken into account in the rules?”; (Manager 2) “Relayed to the supplier”; for another idea: “Does it exist somewhere? (pictures, catalogue, references)”. The solution is considered as not implementable, and the design is not finished.

The 3 ideas with the status “closed and failed” indicates that the idea was judged good, and awarded but failed in the implementation – had also comments. Two of them received comments about a future study to be launched (“there is already a solution. Nevertheless, there is no system for the post M”). One of them noticed in the comments that the idea was good but already explored; the technicentre was not able to decide alone (cf. example in part 2), but the idea was considered good enough not to be rejected.

The investigation comments show the following elements: the managers commented the solutions and suggested other ones, debated via the form with other managers on the solution, or made checks into the rules and changed the solutions afterward. In other cases, the solution was explicitly given to design with the supplier, and the design work went on between the operator, the manager, and the supplier. Thus, the ideas could not be validated immediately but needed changes, verifications, an expert’s advice, or the supplier’s intervention.

Intermediary result

The analysis shows that 31 ideas cannot be implemented directly and need further investigation, when the couple problem-solution is incomplete, since the problem or the solution is partially known. The authors called “design gap” this complementary investigation. Thus, the criterion used by the managers of the suggestion box is a “pass or fail” criterion. However, the criterion “pass” is richer than the direct implementation. It encompasses various situations. In particular, 23% of ideas are denoted “pass” with a design gap. At first sight, this design gap necessary to complete the solutions can be viewed as undesirable in a factory where the solutions should be implementable directly.

4.2. The nature of the ideas and the investigation of the design gap

This part questions the nature of the design gap and the difference between the ideas with or without comments. It starts with a description of the ideas without comments. Then, it analyzes the comments and the corresponding design gap.

4.2.1. The nature of ideas without any investigation comment

The authors counted 101 ideas (77% of the ideas) without any investigation comments from the managers. The authors systematically read the ideas and analyzed them.

Some comments could have been written, but they were only validation, confirmation, or congratulation comments. *“Good idea to be awarded”; “this idea has been implemented a month ago and is working perfectly, improving the performance”; “idea to be implemented quickly”*.

A representative example of an idea is given. It keeps the organization of the form. The verbatim sections are transcribed in italics. x

A TOOL TO UNSCREW THE CAP OF THE WATER TANK

Status: Closed with success

Author

Date

Manager's name

Problem: The cap for the visit of the water full cannot be opened easily.

Description of the solution: A connector was modified to make a new tool adapted to the cap. (pictures of the tool realized by the operator)

Advantages: *“The solution is rapid, efficient, and safe. The tool is put inside the tool box.”*

Result(the manager): *“there is no tool to unscrew the cap”*

Closing of the idea: *“Thanks to this tool, there is no more difficulty to unscrew the cap, that was before unscrewed with an un-appropriate mallet”*.

Treatment step:

8th May 2019: Registered;

14th May 2019 (the manager) new status: Approved;

14th May 2019: (the manager) new status: implemented with success

Comments: *“there is no appropriate tool for this task”*

14th May 2019: (the manager) new status: closed with success

Comments: *“Thank to this tool, there is no more difficulty to unscrew the cap, that was before unscrewed with an un-appropriate mallet.”*

In this example, the two actors were the operator and the manager N+1. The operator brought a finished and already used solution to his manager. The manager validated the idea via the form. The operator received an award for this improvement.

Other examples of ideas are as follows: a tool for a better ergonomics (e.g., by adding a handle, or colouring in yellow to increase the visibility), a best storage organization to save time, a

change in the garbage place so as to put them nearer the operations, a trick not to lose the security keys between two shifts, and so on.

Analysis:

The ideas of this category look like a standardized form to be checked and stamped. Indeed, the solutions are directly implementable without any specifications and present observable and direct results. They rely on the slight modifications of organization and techniques to improve the processes in term of security, ergonomics, cost, and so on. They use the common sense or the employees' creativity applied on technical gestures, the tricks found by the operators. For these ideas, the solutions were not far from the existing one, the effects could be observed immediately and the validation was direct. This is an expected result in factory: the innovation relies on continuous improvement in which the employees have a major role. The innovations captured by this system includes the improvements that enable the better implementation the rules and optimize the prescription, in accordance to the traditional gap between the real and prescribed in factory.

4.2.2. The nature of the design gap for the ideas with investigation comments

The idea with investigation comments were analyzed. An illustrative example is explained and its comments are written verbatim.

Illustrative example: the “fake” platform

An operator indicates that the tool to control the good working of the sensors of the automatic doors is not reliable. He suggests to adopt another process to control the sensors, by testing the doors in real conditions on the recent storage platforms of the maintenance centre. The manager answers that it was a good idea, but suggests a new tool-platform on wheels.

The history of the comments was the following:

5th July: (innovation manager to the tool manager) *Hello, Tool Manager! Can you help the author on this idea? Thank you! The idea would consist of doing a “fake platform” on wheels and using it on the platforms x, y, z.*

12th July: (Tool manager to innovation manager): *Hello, Innovation Manager. A fake platform on wheels, why not. But there is no use to limit it to the platforms x, y, z. We could use it on other platforms. But, if I understood well, the idea would be to realize a true platform on the storage platform. To be discussed with the author directly.*

18th July: (Manager N+1) approved. *The author has to make a drawing of the fake platform, with the help of the tool manager.*

In the following months, the idea's author, the tool responsible, the innovation manager, and a supplier created and produced a new “fake platform” on wheels to test the automation system of the doors. In this example, the idea's author highlighted a problem in a tool and

proposed a solution. His managers considered the solution but found another one, apart from the idea form, in a collective design effort.

The type of comments clarifies the nature of the design gap:

The comments can be classified in 5 categories. All the investigation comments fit in one or more category of comments.

- Category 1: The comments that imply another person than the direct manager N+1
“The operator should consult the tools manager to implement its idea”; *“see with the supplier”*;
 [Manager N+1 to manager 2] *“Dear Manager 2, could you study the idea?”*

- Category 2: The comments that question the solution and that show that there is a lack of details or specification
“Relevant idea. (...) Can you give an example of the beacon (pictures) and find an adequate storage space?”; *“What are the visits concerned by this dimension measurements? What are the series concerned? How to do with the dimension measures with tolerance?”*.

- Category 3: The comments that show that the solution is not satisfying, implying that the problem remains
“This idea would be difficult to implement. But it is indeed a problem to have to isolate 6 batteries”; *“After discussion with Manager Y, it is rather a no from our part.”*; *“Already tested. See for another solution”*.

- Category 4: The comments that make an explicit check in the system of rules to validate (or invalidate) the solution
“The rule asks to each agent who would need to work locked out to protect himself.”; *“a form does already exist, the form “Y”, which explains the eco- parking process.*

- Category 5: The comments that mention an explicit change in the rules
“The whole file has to be transmitted to the technical department in order to maintain this relevant tool”; *“Do you think that the rules should be modified or a mere verbal opinion by the hierarchy would be enough?”*

The authors completed in a table (cf table 1) the nature of the comments found in each idea form.

Table 1: *The type of comments for the 31 ideas with design gap*

Idea					
Number	more people	more details	the problem remains	explicit check in the rules	explicit change in the rules

1		X			
2		X			
3				X	
4	X				
5	X				
6	X				
7	X				X
8	X				
9	X				
10	X		X	X	
11	X				
12		X			
13		X			
14	X				
15	X		X	X	
16	X	X			
17	X				
18		X			
19	X	X	X	X	
20			X		
21	X				
22		X			
23	X		X	X	
24			X		
25	X			X	
26	X			X	X
27	X	X		X	
28		X			
29	X				
30	X			X	
31	X				
total	21	10	6	8	2
total in % of the 31 ideas	68%	32%	19%	26%	6%

Analysis

All the investigation comments are included in one or more categories. These comments can be interpreted as marks of the design process necessary to fill the design gap. Indeed, they give evidence of the necessity to build the solutions with more people, including experts. There is a concern about the feasibility of the solution, technically but also in compliance with the industrial rules. This appear to be a particularity of innovation in the factory: the prescription, i.e. the good realization of the production, at the standards of performances in terms of quality,

cost, delay, safety, gives a fixed frame to the novelty. In contrast, the ideas that are in this frame can be directly implementable, a design process step has to be added for the ideas that present an uncertainty or ambiguity or incompleteness relative to the rules.

To sum up, the nature of the comments provides insights on the type of investigation carried outside the form, in the maintenance centre. The design activity requires a collective action, rigorous specifications of solutions to be validated and inserted in the production system, and a new phase of ideation to tackle the problem. This design activity also presents an effect on the maintenance rules since the rules are checked and evolve, if necessary.

4.3. The investigation of the national rules for the suggestion box

The authors read the rules of the national suggestion system for all French maintenance centers in a systematic manner. During a one-hour and thirty-minute interview, they confirmed that the national in charge of its implementation had a thorough understanding of the rules.

This document is 24 pages long, with a 13-page annex. It explains the function of the suggestion box in maintenance centers, the goal and process of the suggestion box, the actors, their roles and responsibilities, the awarding system, the national contest, and specific cases where maintenance rules are changed.

The authors chose the rules that influenced the managers' and operators' action perimeters in Table 2. They indicated whether the rule allowed for some flexibility in the treatment of the idea (+) or whether it was very strict and opposed to a free design investigation approach (-).

Table 2: *The national rules of the suggestion box and their corresponding degree of freedom concerning the design approach*

Category in the rules	National rules for the suggestion box	comments and existence of degree of freedom (according to the authors)
The idea	According to the rules, an idea is a <i>“solution or an improvement (and not a concept, nor a imaginative representation). It is concrete, implementable with the available means in the technicentre. It can be seen as a trick to solve small practical problems.”</i>	(-) The definition of the idea appears to be restrictive in comparison with those found in the studied suggestion box.
The actors	The idea’s author, the direct manager, the innovation manager, the technical expert, the financial responsible. All these people can intervene in the management of the idea.	(+) From the beginning, the rule informs about a collective process - and not a simple interaction between the idea’s author and the N+1 manager.

The steps and the actors	<ul style="list-style-type: none"> - The declaration of the idea by the author(s); - The analysis and decision by the managers (the N+1 manager or the innovation manager, or a technical responsible or another expert). - The implementation: the managers or an appropriate expert in collaboration with the author(s) - The closure (the dedicated manager) 	(+) The rules predict a step of “analysis and decision” that corresponds to the investigation phase for the validation. The rules do not predict the means and the methods to do it, which remains the responsibility of the technicentre.
The form	The form is standardized. It includes the definition of the problem, of the solution and the status where manager’s comments and advice to improve or to implement can be added	(+) The form includes a possibility of rough dialogue between the actors, and a category to complete the solution with plans, pictures or other information.
The national coordination	At the national level, a leader animates and coordinates the suggestion box in the various maintenance centres. Among the missions, he or she treats and highlights the best ideas, he or she helps the centres to decide on the local management rules.	(+) The national coordinates and support, but impose few details in the implementation of the suggestion box
The national materiel department	It treats the ideas that the local material centres cannot treat at their level. The ideas treated concerns various fields, such as: the reliability and the safety of the trains, the maintenance rules, the technical evolutions... A specific process is described for the ideas that change the rules or the trains themselves.	(+) The design of new maintenance rules is predicted by the rules of the box.
Missions of the experts	They are identified in a file at the national level. They can be called for their opinion by a decider. They can advise on the award to give from a technical point of view.	(+) The rules predict the possibility of problematic or tricky validations
The local animation	The top management of the centres has to choose the ways of communicating the innovation and the suggestion system approaches.	(+) The national rules lets the local technicentres to adapt to their situation
Missions of the local	Among other missions, he or she leads and coordinates the suggestion	(+) The innovation manager has main goals, but the precise objectives and

innovation manager	box. He or she treats the ideas, and implements the national ideas (the best ideas of other maintenance centres) locally. He or she communicates about the best ideas and their authors.	methods to reach them are decided by himself
Missions of the manager N+1	He or she creates a climate of confidence among his group, helps their colleague create the form. He or she highlights the participative innovation in the daily management and answer in details to the ideas. He or she validates the ideas.	(+) The manager N+1 has main goals, but the precise objectives and methods to reach them are decided by himself. In particular, the type of design approach used is not specified.
The local innovation material department	It is the expert in the fields of safety, engineering, railway exploitation. It decides on the design of the innovation.	(+) The rules of the suggestion system predict the potential change of maintenance rules

Analysis

On the surface, the rules for a suggestion box appear to be very specific, and they align with the traditional view of a suggestion box in a factory: a box that generates implementable ideas such as tricks and small changes. The rules' definition of the idea is in this sense (see table 2's first line, "idea").

The systematic analysis of the rules, on the other hand, explains how the rules draw a frame while allowing enough degrees of freedom to begin a design approach. The rules foreshadow the possibility of the suggestion box changing or adding rules (cf. the lines "local" or "national" "material department"). As a result, the rule that strictly defines an idea is complemented by a set of other rules that open the definition implicitly.

The diversity of ideas previously observed, as well as the need for a more in-depth design activity for some of them (cf table 1), are not in conflict with the rules of the suggestion box, which implicitly allow a design approach to check or modify the rules, as well as to refine, improve, or change the solutions.

5. Results

5.1. Result 1: a criterion to validate the ideas: pass, pass with a design gap, or fail

This study demonstrates that the selection of ideas from the suggestion box is not based solely on a binary pass/fail criterion. The manager validates the implementable ideas and validates

the solutions before implementing them, but adds a step to check or enrich them. As a result, the analysis of the suggestion box highlights the technicentre's design capability, which could have been reduced to tricks at first glance. The technicentre organizes its design activity between managers, employees, experts, and suppliers, as well as outside the technicentre for larger projects in which the technicentre is a participant, via the suggestion box.

However, the design flaw is not exactly the one expected. As a "development vision" would suggest, idea forms do not just drive refinements and precisions. They also check the idea's validation conditions, look for rules, and ensure that the solution adheres to the rules. The re-discovery of the system of rules is implied by this exploration.

Furthermore, the suggestion box's rules rule out any ideas or concepts that do not have a direct answer but could be useful to the technicentre. A portion of them could be derived from unsolved ideas or from the repetition of similar ideas (for example, specific ideas like "put a robot here" could raise the broader question of robotization of the center). They'd necessitate a thorough investigation and design process.

5.2. Result 2: The conditions to address the design gap in the factory

At first glance, the suggestion box's management and resources could have resembled those of a gate: a list of defined criteria and a decider who checks and validates the criteria. However, unlike a gate, the SNCF suggestion box reveals another organization around it. In the technicentre, new actors congregate and discuss ideas, new knowledge about the rules is shared, and the inquiry and validation phases begin with the idea form.

A new room was built for the innovation teams to investigate broad concepts and questions in collaboration with other actors; partnerships with local actors (universities, public labs in cities) were formed to design, test, and prototype; and a network of SNCF experts was formed to answer technical questions.

The innovation manager and the director of the technicentre were heavily involved in following the innovations, allocating a dedicated budget, creating an innovation workshop to pursue the ideas, and rewarding the creative employees.

Discussion and further research

The word "idea" (as used by the SNCF's formal rules of the suggestion system) was used throughout the article because it has a distinct and well-defined meaning. The investigation of the ideas contained in the suggestion box, on the other hand, reveals a wide range of possible interpretations: it could be a validated couple (problem, solution), but it could also be a problem without a solution or a solution without a problem. In these cases, as suggested by (T.

Herrmann, Roth, and Binz 2020), an exploration and understanding of the explicit couple could be beneficial to the technicentre. The article also implies that a factory has a variety of unsolved or difficult-to-solve problems (in terms of design resources and capabilities); there are also ideas in the concept stage that could be interesting to explore for the factory (for example, "a green technicentre").

This research enriches the understanding of the "novelty" (or the "radicality") of the ideas (vs "the marginal," "the continue") in the factory, according to the well-known distinction (Dewar & Dutton, 1986). The "radical ideas" are not radical themselves, but the radicality can be understood as a distance to the existing solutions. Slightly differently, the article invites to re-think the reference of the distance for a factory. Indeed, an idea can be near the existing one, and at the same time very far from validation. Hence, the distance to validate and, consequently, the design gap is high. The article invites us to think the radicality as distance from the validation point. Finally, what remains to design is not another idea newer and more radical but the validation of the idea in the factory. This is also true while reflecting in terms of ambidexterity (March, 1991): the article shows that the routine can be an object of re-discovery and the design of a solution among the routines is neither properly an exploitation problem, nor an exploration problem, hence refining the work of T. Herrmann, Roth, and Binz (2020). It mixes both of them to explore the routines and validate the solutions regarding them or rethinking them. This refinement in the comprehension of the radicality in an existing and complex system should be explored and explained in further research. It could be supported by the notion of creation heritage (Hatchuel et al., 2019).

This research also discusses the innovation tools available in the factory. The investigation of the ideas in the suggestion box shows that the continuous improvement tools do not cover all the design activities and the design spaces that would be necessary for a factory. If the factory design is able to explore the rules and re-discuss them, tools and management adapted for this property are needed. This analysis is also true for innovation in industry 4.0, which is often viewed as a technological change to implement (Veile et al., 2019), potentially implemented by a central technologic or innovation team in the manufacturing engineering department (Alcácer & Cruz-Machado, 2019; Lass & Gronau, 2020), whereas this article implies a wider spread of the design activity among the teams, a new inventive regime with a reasoning on the system of rules. Other research works could be undertaken to enrich this argument and understand this design activity.

Managerial implications

On the managerial level, this study demonstrates an idea management system in a factory that involved all levels of the hierarchy in a design approach. The studied suggestion box is an

example of a traditional manufacturing tool that was developed in the nineteenth century to recognize and encourage employees' creativity while also involving them in the production process on an individual or group level. Following investigations, this tool allows for more than just the collection of tricks. It also coordinates an intensive and collaborative design process involving a wide range of stakeholders, including the idea's creator, the supplier, various experts and specialized managers, engineers from the local or national material center, and the innovation manager. They each have a role to play in the design process. Wide ideas or concepts that could be new axes of exploration for the maintenance center and its partners can be found on the outskirts of the suggestion box. Because many rules are compatible with this design activity, this significant organization for a continuous design activity in a factory could be found in other factories and other suggestion boxes. The system's management rules gave the managers various degrees of freedom in this study, including the ability to add comments, improve the solution, call various experts to check the rules, and finally, time, place, and financial resources dedicated to this goal.

This research has further management considerations, which were presented and launched by the technicentre, based on this analysis of the actor's roles, responsibilities, and organization for the design activity in the maintenance centre. First, if the design gap is systematically identified, it initiates the investigation phase and moves the actors around the validation. They are aware of when and for what they are designing (i.e. to improve the solution and validate, by exploring the rules that could be impacted by the solution). As a result, a first sorting step was added to the process, with ideas with design gaps being flagged. Similarly, the idea that exhibited characteristics of broad exploration ideas was singled out. For some of the ideas, this visible classification encouraged training and the use of adapted design methods. Following the completion of the research, design thinking and C-K theory methods training workshops with designer specialists were held for all hierarchical levels. The "wide concepts" (such as "agile maintenance," "cobots for the technicentre," "a green technicentre," and "adaptative trains for bike season") were started to be treated with innovation methods that enabled a deep understanding of the question and a large exploration, in groups that included a panel of actors who went beyond the manufacturing perimeter: engineering departments, experts in various fields not only related to train maintenance, local universities, users, and so on.

Apart from these methods, the managers noticed an increase in employee interest and collaboration, as well as a general increase in attention to design and innovative practices. This was aided by the fact that traditional maintenance tasks such as failure detection and repair are changing as more automated trains are introduced. As a result, the employee's interest in their work was bolstered by a thorough understanding of the nature of the design task in the technicentre and its importance.

However, one of the most significant barriers to this type of design management was the time, as well as the human and financial resources that the approach necessitated. Another major

challenge was bringing the actors together, as their three-shift work had a tendency to separate them.

References

- Aalbers, R. (H. L.), & Whelan, E. (2021). Implementing digitally enabled collaborative innovation: A case study of online and offline interaction in the German automotive industry. *Creativity and Innovation Management*, 30(2), 368–383. <https://doi.org/10.1111/caim.12437>
- Alcácer, V., & Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(3), 899–919. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006>
- Beretta, M. (2019). Idea Selection in Web-Enabled Ideation Systems. *Journal of Product Innovation Management*, 36(1), 5–23. <https://doi.org/10.1111/jpim.12439>
- Boeddrich, H.-J. (2004). Ideas in the Workplace: A New Approach Towards Organizing the Fuzzy Front End of the Innovation Process. *Creativity and Innovation Management*, 13(4), 274–285. Scopus. <https://doi.org/10.1111/j.0963-1690.2004.00316.x>
- Buech, V. I. D., Michel, A., & Sonntag, K. (2010). Suggestion systems in organizations: What motivates employees to submit suggestions? *European Journal of Innovation Management*, 13(4), 507–525. <https://doi.org/10.1108/14601061011086311>
- Carnevale, D. G., & Sharp, B. S. (1993). The old employee suggestion box: An undervalued force for productivity improvement. *Review of Public Personnel Administration*, 13(2), 82–92.
- Carrier, C. (1998). Employee Creativity and Suggestion Programs: An Empirical Study. *Creativity and Innovation Management*, 7(2), 62–72. <https://doi.org/10.1111/1467-8691.00090>
- Chesbrough, H. (2004). Managing open innovation. *Research-Technology Management*, 47(1), 23–26.
- Detterfelt, J., Lovén, E., & Lakemeond, N. (2009). Suggestion Systems for Engineering Designers—A Case Study. *DS 58-9: Proceedings of ICED 09, the 17th International Conference on Engineering Design, Vol. 9, Human Behavior in Design, Palo Alto, CA, USA, 24.-27.08.2009*, 135–146.
- Dewar, R. D., & Dutton, J. E. (1986). The Adoption of Radical and Incremental Innovations: An Empirical Analysis. *Management Science*, 32(11), 1422–1433. JSTOR.
- Eisenhardt, K. M. (1989). Building theories from case study research. *Academy of Management Review*, 14(4), 532–550.
- Elerud-Tryde, A., & Hooge, S. (2014). Beyond the Generation of Ideas: Virtual Idea Campaigns to Spur Creativity and Innovation. *Creativity and Innovation Management*, 23(3), 290–302. <https://doi.org/10.1111/caim.12066>
- Fairbank, J. F., & Williams, S. D. (2001). Motivating Creativity and Enhancing Innovation through Employee Suggestion System Technology. *Creativity and Innovation Management*, 10(2), 68–74. <https://doi.org/10.1111/1467-8691.00204>

- Gerlach, S., & Brem, A. (2017). Idea management revisited: A review of the literature and guide for implementation. *International Journal of Innovation Studies*, 1(2), 144–161. <https://doi.org/10.1016/j.ijis.2017.10.004>
- Gunasekaran, A., Yusuf, Y. Y., Adeleye, E. O., Papadopoulos, T., Kovvuri, D., & Geyi, D. G. (2019). Agile manufacturing: An evolutionary review of practices. *International Journal of Production Research*, 57(15–16), 5154–5174.
- Hatchuel, A., Masson, P. L., 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. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.160>
- Herrmann, T., Binz, H., & Roth, D. (2017). Necessary extension of conventional idea processes by means of a method for the identification of radical product ideas. *DS 87-8 Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED 17) Vol 8: Human Behaviour in Design, Vancouver, Canada, 21-25.08. 2017*, 079–088.
- Herrmann, T., Roth, D., & Binz, H. (2020). FRAMEWORK OF AN AMBIDEXTROUS PROCESS OF IDEA MANAGEMENT SUPPORTING THE DOWNSTREAM PRODUCT DEVELOPMENT PROCESS. *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, 1, 587–596.
- Hooge, S., Dalmasso, C., & Garcias, F. (2018). Is intrapreneurship scalable? The challenge of managing a massive internal startup call. *R&D Management Conference 2018*.
- Janssoone, D. (1999). De la boîte à idées... à l'innovation. *Revue Generale Des Chemins de Fer*, 1999(9), 11–19.
- Karachiwalla, R., & Pinkow, F. (2021). Understanding crowdsourcing projects: A review on the key design elements of a crowdsourcing initiative. *Creativity and Innovation Management*, 30(3), 563–584.
- Lass, S., & Gronau, N. (2020). A factory operating system for extending existing factories to Industry 4.0. *Computers in Industry*, 115, 103128. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103128>
- Malek, J., & Desai, T. N. (2020). A systematic literature review to map literature focus of sustainable manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120345.
- March, J. G. (1991). Exploration and Exploitation in Organizational Learning. *Organization Science*, 2(1), 71–87.
- Moica, S., Harea, C. V., & Marian, L. (2018). Effects of suggestion system on continuous improvement: A case study. *2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 592–596.
- Neagoe, L. N. (2009). EMPLOYEE SUGGESTION SYSTEM (KAIZEN TEIAN) THE BOTTOM-UP APPROACH FOR PRODUCTIVITY IMPROVEMENT. 10(3), 6.
- O'Connor, G. C. (2018). Institutionalizing an innovation function: Moving beyond the champion. In *Handbook of Research on New Product Development*. Edward Elgar Publishing.
- Ostrowski, D., & Jagodziński, J. (2021). Operation of an employee suggestion system in administration and production departments of a remanufacturing company. *Journal of Remanufacturing*, 11(2), 107–120. <https://doi.org/10.1007/s13243-020-00095-7>

- Recht, R., & Wilderom, C. (1998). Kaizen and culture: On the transferability of Japanese suggestion systems. *International Business Review*, 7(1), 7–22. [https://doi.org/10.1016/S0969-5931\(97\)00048-6](https://doi.org/10.1016/S0969-5931(97)00048-6)
- Sandstrom, C., & Bjork, J. (2010). Idea management systems for a changing innovation landscape. *International Journal of Product Development*, 11(3/4), 310. <https://doi.org/10.1504/IJPD.2010.033964>
- Sukhov, A., Sihvonen, A., Netz, J., Magnusson, P., & Olsson, L. E. (2021). How experts screen ideas: The complex interplay of intuition, analysis and sensemaking. *Journal of Product Innovation Management*, 38(2), 248–270. <https://doi.org/10.1111/jpim.12559>
- Temiz, S. (2021). Open innovation via crowdsourcing: A digital only hackathon case study from Sweden. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7(1), 39.
- Tesi, F. (2008). Michelin et le taylorisme. *Histoire, économie & société*, 27e année(3), 111–126. Cairn.info. <https://doi.org/10.3917/hes.083.0111>
- Thom, N. (2015). Idea management in Switzerland and Germany: Past, present and future. *Die Unternehmung*, 69(3), 238–254.
- Veile, J. W., Kiel, D., Müller, J. M., & Voigt, K.-I. (2019). *4.0 implementation in the German manufacturing industry*. 21.
- Yasuda, Y. (1991). *40 years, 20 million ideas: The Toyota suggestion system*. Productivity Press.

Sources files

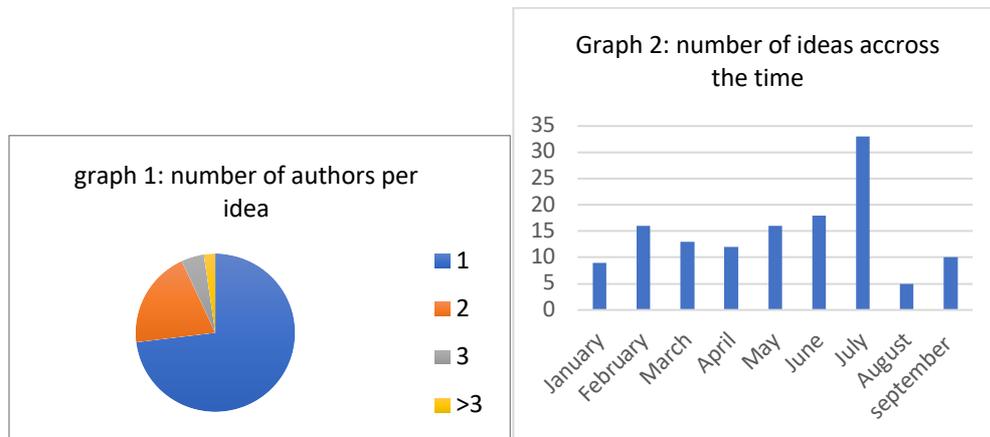


Table 1: *The type of comments for the 31 ideas with design gap*

Idea Number	more people	more details	the problem remains	explicit check in the rules	explicit change in the rules
1		X			
2		X			
3				X	
4	X				
5	X				
6	X				
7	X				X
8	X				
9	X				
10	X		X	X	
11	X				
12		X			
13		X			
14	X				
15	X		X	X	
16	X	X			
17	X				
18		X			
19	X	X	X	X	
20			X		
21	X				

22		X			
23	X		X	X	
24			X		
25	X			X	
26	X			X	X
27	X	X		X	
28		X			
29	X				
30	X			X	
31	X				
total	21	10	6	8	2
total in % of the 31 ideas	68%	32%	19%	26%	6%

Table 2: The national rules of the suggestion box and their corresponding degree of freedom concerning the design approach

Category in the rules	National rules for the suggestion box	comments and existence of degree of freedom (according to the authors)
The idea	According to the rules, an idea is a <i>“solution or an improvement (and not a concept, nor a imaginative representation). It is concrete, implementable with the available means in the technicentre. It can be seen as a trick to solve small practical problems.”</i>	(-) The definition of the idea appears to be restrictive in comparison with those found in the studied suggestion box.
The actors	The idea’s author, the direct manager, the innovation manager, the technical expert, the financial responsible. All these people can intervene in the management of the idea.	(+) From the beginning, the rule informs about a collective process - and not a simple interaction between the idea’s author and the N+1 manager.
The steps and the actors	<ul style="list-style-type: none"> - The declaration of the idea by the author(s); - The analysis and decision by the managers (the N+1 manager or the innovation manager, or a technical responsible or another expert). - The implementation: the managers or an appropriate expert in collaboration with the author(s) 	(+) The rules predict a step of “analysis and decision” that corresponds to the investigation phase for the validation. The rules do not predict the means and the methods to do it, which remains the responsibility of the technicentre.

	- The closure (the dedicated manager)	
The form	The form is standardized. It includes the definition of the problem, of the solution and the status where manager's comments and advice to improve or to implement can be added	(+) The form includes a possibility of rough dialogue between the actors, and a category to complete the solution with plans, pictures or other information.
The national coordination	At the national level, a leader animates and coordinates the suggestion box in the various maintenance centres. Among the missions, he or she treats and highlights the best ideas, he or she helps the centres to decide on the local management rules.	(+) The national coordinates and support, but impose few details in the implementation of the suggestion box
The national materiel department	It treats the ideas that the local material centres cannot treat at their level. The ideas treated concerns various fields, such as: the reliability and the safety of the trains, the maintenance rules, the technical evolutions... A specific process is described for the ideas that change the rules or the trains themselves.	(+) The design of new maintenance rules is predicted by the rules of the box.
Missions of the experts	They are identified in a file at the national level. They can be called for their opinion by a decider. They can advise on the award to give from a technical point of view.	(+) The rules predict the possibility of problematic or tricky validations
The local animation	The top management of the centres has to choose the ways of communicating the innovation and the suggestion system approaches.	(+) The national rules lets the local technicentres to adapt to their situation
Missions of the local innovation manager	Among other missions, he or she leads and coordinates the suggestion box. He or she treats the ideas, and implements the national ideas (the best ideas of other maintenance centres) locally. He or she communicates about the best ideas and their authors.	(+) The innovation manager has main goals, but the precise objectives and methods to reach them are decided by himself

Integrating numerous changes at a fast rhythm in an Industry 4.0 system: A strategy to control known and unknown parameters in an Industry 4.0 ramp-up combining expertise and data—The STMicroelectronics case

Honorine Harlé¹, Stéphane Hubac², Pascal Le Masson¹, Benoit Weil¹

¹ Chaire Théorie et Méthodes de la Conception Innovante, MINES ParisTech, PSL University, Centre de Gestion Scientifique (CGS), i3 UMR CNRS 9217, 60 Bd St Michel 75006 Paris, France

² STMicroelectronics, Crolles, France

corresponding author: honorine.harle@mines-paristech.fr

Abstract

The ramp-up in Industry 4.0 is a phase of high complexity and uncertainty. In Industry 4.0, the tendency of mass customization and the necessity to continuously update the production system lead to a fast rhythm of changes in products and processes. Even minor changes can put the system at risk when implemented. The ramp-up phase is crucial to controlling such risk, and the huge volume of data obtained from the production system is seen as an enabler of this control by experts. Nevertheless, new and unknown phenomena can appear while implementing a change. Experts thus need a collective strategy with which to go through the data, detect and understand anomalies, and learn lessons for future changes. This article models a ramp-up strategy combining data, past knowledge, and learning for the fast rhythm of changes made to a high-tech and complex production system. A STMicroelectronics factory is taken as a case study for process changes. The article shows the collective effort made to reuse information gained from past experiences and discover within data unknown interactions to be incorporated in the model of change. This work reaffirms the experts' role in the continuous improvement and evolution of the Industry 4.0 production system.

Keywords: Industry 4.0; ramp-up; risk management; experts; data

1. INTRODUCTION

The industrial shift toward Industry 4.0 is implementing numerous technologies based on sensors, the Internet of Things, computing capacity and manufacturing processes that are becoming more automatized, rapid, flexible, and reconfigurable (Kagermann et al. 2013). In this context, products and technologies are changing rapidly, production cycles are shortening, and products are becoming more varied, highly personalized, and mass customized (Pech and Vrchota 2022). Hence, in Industry 4.0, there is a need for a continuous effort to integrate numerous changes rapidly in an economical way.

The good control of the ramp-up phase ensuring high product quality has strategic importance (Dombrowski et al. 2018). Indeed, situations of ramp-up are becoming frequent but also increasingly complex and uncertain (Dombrowski et al. 2018; Schmitt et al. 2018). The consequences of even small changes can be dramatic for the production system. Once an industrial system is in place, we must ask how such a complex system can integrate changes without disturbances and how it can evolve, transform, and regenerate.

Whereas big data and data analysis are often presented as enablers for solving production problems, the success of the ramp-up depends on their interaction in real time with operators. The nature and quality of this interaction depend strongly on the experts' knowledge and experience (Doltsinis et al. 2020). It is thus crucial not to put the production system at risk in controlling the ramp-up phase. At the same time, understanding the results is time consuming and requires much knowledge and experience and competencies.

More precisely, "controlling the change" involves controlling the parameters playing a role in the interactions between the new change and the production system already in place. These parameters are partly known through the experts' experience or the past learning of algorithms. However, the control of the present change also involves the capture of new parameters never learnt in the past. The rhythm of changes and the complexity of the system (and hence the number of parameters to control) prevent the planning design of experiments and

progressive learning. According to Schmitt et al. (2018), autonomous machines have gained importance in the Industry 4.0 ramp-up, but operators ultimately learn and solve problems. The operators thus have to be highly qualified and think with “radically different mindsets” (Schmitt et al. 2018). We therefore want to investigate the operators’ and experts’ strategy in learning during the ramp-up of a change and how the operators and experts capture and control unknown phenomena during the ramp-up.

This article deals with the ramp-up period and the control of a change in Industry 4.0. It highlights two types of strategy for capturing unknown parameters associated with a change for the purpose of control. Part 2 presents solutions given in the literature for the search of not-yet-known parameters before the implementation of a change. Part 3 proposes a methodology for such a search. Part 4 offers two hypotheses on possible strategies for searching the unknown. Part 5 discusses the results of the study and their implications.

2. LITERATURE REVIEW

The literature offers several methods of controlling changes on a production line. These methods determine the parameters playing a potential role in the interaction between the new change and the system. These parameters are determined through data gathering and analysis and using risk management tools. One such tool—failure mode and effect analysis (FMEA)—is presented in the following.

2.1. Ramp-up problem in Industry 4.0

In manufacturing, a ramp-up is defined as the period from the production of the first item after a system reconfiguration until the achievement of the specified target output rate (Colledani et al. 2018). The ramp-up period is characterized by instability, because the system can face unexpected failures and a decrease in quality (Basse et al. 2014). The system has to converge toward the required production rate at a certain level of product quality. The ramp-up risk is to have unexpected or not-yet-known events resulting in the wrong evaluation of the design assumption comparing with effective productive conditions. Colledani et al. (2018) synthesized various sources of this mismatch; e.g., an incomplete failure mode analysis when new equipment is integrated, a lack of knowledge of the degraded states, poor design plant control, and disturbances of the external conditions of the system.

In Industry 4.0, the system is more complex and integrates changes continuously. Advanced productive systems, Industry 4.0, and smart manufacturing rely on technologies that make production more efficient, reconfigurable, and flexible. Such manufacturing integrates, for instance, the Internet of Things, sensors, big data, high computational capacity, and cloud computing to adapt and evolve continuously (Kagermann et al. 2013). This increases the complexity of the system. The duration of the production cycle decreases, and with it, the number of products per cycle. Hence, the implementation of a new process or product has fewer production cycles to be optimized, while changes occur with a more frequent rhythm. At each change, the question of the reliability of the production system becomes crucial, as new and unknown failures, dependency, and risks emerge (Zio 2016).

In other terms, the environment makes the control of changes difficult. The parameters that need to be controlled change rapidly within a dynamic and complex system, in which the physical interactions are partially known and understood. Colledani et al. (2018) offered two strategies with which to control changes during this period, which are presented in sections 2.2 and 2.3.

2.2. Adapting the design of the productive system and the change in ramp-up management

The risks of a ramp-up can be anticipated either during the design of the change or during the design of the production system itself. In this strategy, the parameters involved in the changes are designed, modeled, known, and controlled a priori in the design of the change and system.

Before changes occur, the production system can be designed to evolve without disturbance. For instance, designing an agile production system makes possible a system that remains robust during its reconfiguration (Koren and Shpitalni 2010). However, agility is derived from the software field (Abbas et al. 2008), where tests are

considered to be free, whereas tests can be costly in production in terms of not only the initial investment in the sensors but also the time required to implement the tests and analyze the results. This approach is implemented during the design of the manufacturing system and cannot be introduced for an already existing production system.

Another possibility is to design the change while anticipating ramp-up problems; e.g., through simulation (Shariatzadeh et al. 2012; Guo et al. 2019) or by co-designing the change and system (Lumsakul et al. 2018). However, the variables and risks registered (by the simulation or by the design engineers) will be only those known. The complete list of parameters and sources of variation will be only known once the real conditions are faced.

Furthermore, available data can be used once the change and manufacturing system are designed, for the implementation of data-driven methodologies or for the detection and identification of variations or improvement loops. This is the objective of advanced process control, which has been implemented in semiconductor factories and is described in the following section.

2.3. Improving the monitoring and control of the change in the ramp-up through advanced process control

The second strategy is to capture the parameters affected by the change in a thorough control of the change. Traditional statistical techniques based on the analysis of panels to control processes have only limited power in a complex and rapidly changing environment (Colledani et al. 2016). The design of experiments, conducted beside the production line with a known environment, is no longer relevant for the numerous minor changes implemented on the production line every day (Colledani et al. 2018). To overcome these shortcomings, the computing capacity and ubiquity of sensors seem to make possible the control of the system, especially through an advanced control system, which is widely implemented in the semiconductor industry. Hence, Industry 4.0, characterized by a large variety of technologies, encompasses the promise of the perfect control of production.

The manufacturing of semiconductors is a sequence of processing steps that are highly complex and have tight tolerances. To ensure the high quality of the final product with a low level of variability in the product performance, production requires thorough control and monitoring. Numerous physical parameters are measured to control the equipment state or the wafer state, corresponding to each manufacturing process step. These measures come from sensors on machines during processes, from separated metrology equipment, or from electrical tests. In this context, well-known Statistical Process Control (SPC) is referred to as advanced process control. By collecting the data in real time, the RbyR (run by run or R2R) method enables the detection of drift and the adjustment of production parameters from run to run (wafer to wafer, lot to lot, or batch to batch) by giving feedforward or feedback production orders. Moreover, a fault detection classification system can be implemented to detect the shifts in performance generated by variations of tools or process measures, and to determine the cause. It uses detection algorithms or neural network methods to help diagnose the causes (Azamfar, Li, and Lee 2020).

Although advanced process control aims at controlling production in a thorough way, it suffers drawbacks and remains an incomplete tool. The occurrence of unknown interactions or the poor calibration of instruments can result in undetected sources of variation. Moreover, validation of the models underlying the process control relies on past data and the past experience of failures, and learnings from them. A change in a process can affect the known interactions, which will be disturbed, and can reveal other interactions that cannot be predicted from the historical data.

Risk management methods support advanced process control during the ramp-up phase. The FMEA is such a method, used in the semiconductor industry to drive process changes (Trahan and Pollock 1999).

2.4. Failure mode and effect critical analysis (FMECA)

FMECA is a method commonly used in quality management and reliability engineering. The method was first adopted in the United States Armed Forces at the end of the 1950s to analyze and prevent potential safety failures and detect their effects on military equipment. The method was generalized in the Apollo Program and then applied in various industries, such as the automobile, aerospace, nuclear, semiconductor, and biomedical industries (Stone et al. 2005; Cabanes et al. 2021). The methodology gathers in a table all the identified failures

modes that can occur, their effects on the system, and their causes. It also designates the people responsible and corrective actions that can be implemented to avoid failure modes. The method can be applied at various levels of the system, product, service, and process. In this article, we focus on process FMEA, which provides the failure modes of manufacturing processes that can affect the reliability and quality of the production system and products.

A criticality analysis can be conducted for FMECA (Lipol and Haq 2011; Carpitella et al. 2018). The criticality analysis sorts the failure modes by order of risk and priority, such as when the failure modes are known by importance of criticality. A criticality measure, called the risk priority number, is computed. The classical formula of the risk priority number is the multiplication of three indexes (each generally measured on a 10-point scale): the occurrence (O), severity (S), and detection (D) of a failure mode.

The literature identifies several shortcomings in the design and adoption of FMEA and FMECA. Among them, the proper list of failure modes is not obvious. Indeed, Cabanes et al. (2021) identified two sources of difficulty when designing a process FMEA. First, the analysis concerns a new and complex system. Hence, the list of failures is not obtained from practice. There is a lack of empirical data and practical experience in obtaining knowledge on the failures and their causes (Peeters et al. 2018; Subriadi and Najwa 2020; Dağsuyu et al. 2016). This problem is greater for large and complex systems, such as those of the semiconductor industry, where the production cycles are short and the technology is complex and evolves rapidly (Sun et al. 2017). The comprehension of the behavior and inter-relations or combinations of failures is then only partial. This results in possible gaps in the list of failure modes (Joshi and Joshi 2014). Second, problems occur at the interfaces of several fields or subsystems, where different FMEAs conducted at different levels are not connected (Carlson 2012). Experts on different design teams have different approaches of FMEA for different disciplines, which makes the design of a joint FMEA difficult (Henshall et al. 2014).

2.5. Conclusion of the literature review and its formalization

The literature shows that the numerous changes occurring in a complex and rapidly changing high-tech production mean that the ramp-up period is a critical phase in controlling the risks emerging during the change implementation, locally or propagating more widely in the system. Once the manufacturing system is designed, its robustness relies on the tight control of the process by combining data analysis and expertise through FMEA and advanced process control. However, the literature has presented the limits of each of FMEA and advanced process control, mostly the link to past data, the difficulty in unearthing expert experience, and making the experts' views converge. Particularly, the literature shows that methods and tools have been designed to consider the already known dimensions of the change but ignore the not-yet-known parameters that are critical to control while implementing changes. The available data, used for quality control itself or to help make decisions, can be misleading. For a new change, sensors are not necessarily well calibrated, and interactions are not necessarily known or understandable but involve long and costly learning. Hence, the production system evolves and makes necessary the search for not-yet-known or controlled parameters implied in the change. Moreover, besides the preservation of the system during the changes, the dynamics of an Industry 4.0 production system and the intensity and speed of the renewal of products and technology constraints control the change in a rapid and frugal way. The transformation of Industry 4.0 through changes requires the discovery of unknown parameters spread into the system in a rapid, robust, and economical de-risking process.

A first formalization of the problem: In his book, Hardt (1996) modeled process control. The process is described by a relationship between the process parameters x and equipment parameters u and output y , according to the function f ; i.e., $y = f(x, u)$.

Deriving the first-order variation of the above equation, we obtain the equation of the process control: $\Delta y = \frac{\partial f(x,u)}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f(x,u)}{\partial u} \Delta u$, where Δy is the variation of the output, $\frac{\partial f(x,u)}{\partial x}$ is the disturbance sensitivity of the process, Δx is the parameter disturbance, $\frac{\partial f(x,u)}{\partial u}$ is the input–output sensitivity, and Δu is the equipment change.

Hardt (1996) thus indicated actions available to control the process; i.e. to minimize the output disturbance Δy . First, the process can be designed a priori to minimize the sensitivity to variations in parameters (written $\frac{\partial f(x,u)}{\partial x}$), which constitutes process optimization. Second, the equipment can be designed and controlled to avoid changes in parameters (written Δx), which is statistical process control. Third, the changes in equipment parameters

(written Δu) can counteract the changes in parameters through feedback control. This summarizes and formalizes the strategies presented in sections 2.2 and 2.3 of the literature review.

The above equation models the process control when the process is perfectly known. However, it says nothing on the capture of unknown parameters when a change occurs. Indeed, the true function of the change is $y = f(x_k, x_u, u)$, where x_k denotes the known parameters to control and x_u denotes the unknown parameters at the time of the ramp-up, which results from new interdependencies resulting from the change. Hence, the equation of control becomes $\Delta y = \frac{\partial f(x_k, x_u, u)}{\partial x} \Delta x_k + \frac{\partial f(x_k, x_u, u)}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial f(x_k, x_u, u)}{\partial x} \Delta x_u$. Controlling the process during the ramp-up means as explained before to minimize Δy , in the same way as before but with the introduction of the term $\frac{\partial f(x_k, x_u, u)}{\partial x} \Delta x_u$. Nevertheless, the unknown parameter disturbance (Δx_u) should be under control but is unknown at the moment, the sensitivity of the system to the change in unknown parameters $\frac{\partial f(x_k, x_u, u)}{\partial x}$ is not known, and the feedback or forward loops that rule the machine parameters cannot be adjusted correctly because the term $\frac{\partial f(x_k, x_u, u)}{\partial x} \Delta x_u$ is not anticipated. Finally, the preliminary design of the system, the implemented statistical process, and the feedback or forward loops are insufficient for a change entering the system.

3. RESEARCH QUESTIONS AND FIRST HYPOTHESES

This article addresses two questions.

1. How do we capture unknown parameters in controlling changes in a robust way and preserve the manufacturing system with limited resources?
2. Which organizations and resources are needed in combining expertise and data for this process?

The article explores how to design risk analysis for a change in an economical way and without any disturbance of production, for a complex and partially unknown system. First hypotheses can be drawn to drive the exploration.

According to Basse et al. (2014), the instability of a system, defined as its unpredictability and uncontrollability in a ramp-up period, is a result of the complexity of the system. The given definition of complexity indicates where to search for sources of instability or unknown parameters; i.e., at the crossroads of different disciplines, where an inter-dependency is observed for the first time, or where a new dynamic condition occurs. Moreover, Basse et al. (2014) observed that the “*proactive management of complexity or instability in ramp-up is not conducted*”. The present article aims to model this phase. Indeed, the unknown (not-yet-known) parameters can be anticipated before the ramp-up.

The literature on FMEA that aims at listing the parameters to be under control informs us about the necessary combination and entanglement of data analysis and expert’s knowledge in establishing a robust list of risks and “*detecting the expected and discovering the unexpected*” (De Andrade et al. 2020). If the intervention of experts to analyze and explore new phenomena is expected, the way of conducting inquiries with a fast rhythm and without failure (in a robust manner) remains poorly understood.

Finally, research in the field of design theory predicts that new knowledge is related to the past, in the same way that expansions in concept-space are knowledge dependent in C-K theory (Hatchuel et al. 2019; Hatchuel and Weil 2003). In terms of design in data analysis, new parameters depend on present models and parameters already known (Barbier et al. 2021). Hence, past and present knowledge is expected to be tightly linked with new knowledge in the search for new parameters.

4. EMPIRICAL CASE AND ENIGMA

The authors modeled an empirical situation relevant to the above discussion. In partnership with STMicroelectronics, they studied a process aiming at controlling the implementation of changes and especially the proper control of risks during this phase.

4.1. Case study: STMicroelectronics

The study was performed at the ST Microelectronics factory in Crolles (France) in 2019. ST Microelectronics is a leader in the semiconductor industry. The semiconductor industry is a high-tech industry that produces electronic microchips for a wide range of technical industries, such as the aerospace, automobile, and phone industries, and more generally for connected objects of daily life.

This science-based industry of semiconductors follows Moore's law, which was proposed in 1965 and predicts the doubling of transistors on a microchip in any 2-year period. According to this law, products have become increasingly small and the manufacturing process has become increasingly precise. Several steps constituting the manufacturing process are performed with angstrom precision, and operations are performed increasingly rapidly, for various products on the same production line. The operations are performed in clean rooms where aspects of the atmosphere (e.g., the temperature, pressure, and particles) are controlled. A production line is mostly automatized and involves a succession of complex and high-tech processing steps that add and selectively delete layers mainly made of silicon. This is achieved through successive physicochemical etching and photolithography processing steps, and also ion implantation, chemical vapor deposition, rapid thermal processing, and chemical mechanical polishing (Mili et al. 2009).

4.2. Empirical enigma

A challenge at the Crolles factory is to produce numerous complex products in high volume. A total of 1800 high-quality wafers pass through 218 machines per week at the factory (Cabanes 2017). Twelve types of technology and 136 products alternatively pass through the same machines of the production lines.

Changes in the processes and products are made daily for the purpose of continuous improvement. Each week, between 16 and 20 changes that affect the process steps are explained, studied, and validated (or not) at various validation steps in the factory. These changes are tested directly on the production line in the normal production process through the use of in-line sensors and metrological machines.

At the same time, the potential effect of a disturbance in the process can be dramatic and last until the end of production. Hence, performance comes directly from the ability to drive changes at high frequency without disturbing production.

The Crolles factory performs robustly while its production system evolves with a fast rhythm in an extreme environment, incorporating numerous changes each week. Indeed, to achieve this performance, one expects a high level of tedious validation; i.e., all 218 machines must be compatible with a change under all operating conditions while perfect product quality is ensured. At the same time, new interactions can affect the processing and should be explored through rigorous statistical control.

An enigma emerges from the above empirical observation. How can a high intensity of change in this industrial context, at a very low failure rate, be explained? More particularly, concerning the control of the change, how are all the effects of changes on the system understood and foreseen? Consequently, a research question is derived for this empirical enigma: *How can parameters implied in the change, including the not-yet-known parameters, be listed?*

5. RESEARCH METHODOLOGY

5.1. Author investigation

An author attended 19 committee meetings (at various levels of validation) as an observer of the process. He interviewed nine candidates presenting at change committee meetings in 30-minute semi-directed interviews, about the nature of the change itself and the preparation of the committee meeting, and in particular the method of listing the risks and associated tests. Nine written presentations of the committee meetings were available to examine. The author also interviewed in 30-minute semi-directed interviews five experts who regularly attend the committee meetings as experts in their discipline. These interviews questioned the nature of the expert's

expectation during the committee meetings and the ways of identifying failure in the process. Another author was a practitioner who provided additional information and explained the process.

5.2. Need for the modeling of the search of unknowns in the data

We expected to make explicit the experts' reasoning to better understand what happened in the committee meetings. We wanted to elucidate how the unknowns propagating in the sea of data were detected and consequently modeled the strategies of the candidate and experts while investigating the process change. We express the problem in simple formalized terms to refer to the empirical situation, to dialogue with the concerned people, and to improve their understanding of the process change. We then formulate two hypotheses on two ways of solving the problem.

5.3. Empirical material: the change committees

Change review boards are organized to qualify the multiple changes made on the production line every week. For each change, three committee meetings are held, where a candidate (i.e., a person or group of people dedicated to the change) present a risk analysis in front of four experts having different and complementary fields of expertise. This validation process follows a deep investigation step led by the candidate, in collaboration with tools specialists.

In the first committee meeting, a change and a corresponding plan validation are presented. This presentation provides an analysis of risks and the corresponding tests to execute in assessing the risks of the change. Potentially, the results of preliminary in-line tests of the effect of the change are presented. The validation from the experts depends on the completeness of the risk analysis and of the first tests presented.

In the second committee meeting, the results of tests on a small number of lots are presented. On the basis of the results, additional tests can be requested. A ramp-up plan is decided.

In the third committee meeting, the results of the ramp-up are presented and the change is qualified.

The changes in this process are those that only affect the fabrication and do not affect the final product, although they could drastically affect the production line. A representative example of the changes is a change to the slurry used in chemical mechanical polishing because a supplier no longer provides the previous slurry. A technology qualified on other similar machines needs to be qualified on the last machine for which it is not qualified. A chemical component is added in a certain production step to avoid defectivity.

6. THE PROBLEM MODELLED

6.1. Problem

We describe the problem more formally.

The system works according to a function f (a "true" function), such as $y = f(x)$, where y is the performance of the process (e.g., a level of quality), and x is a vector of causal factors that affects y (e.g., the temperature, pressure, oxygen rate, and time between two processes). The form of f is unknown.

A change in the system is implemented for reason of improvement or to solve a local problem (e.g., the supplier of raw materials needs to be changed or a component requires repair). After this change, the performance of the system must be at least the same as that before the change. There is then the risk of the emergence and propagation of an undetected problem. Testing the new process means to find the function f^* that is nearest the function f . Because of the complexity of the system, relating to the numerous and various influencing factors, f^* is only an incomplete approximation of the true function f .

6.2. First strategy: estimation of the function from scratch

In the first strategy, the function f is approximated by a linear function, such as that of the form

$$f^* = \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + \sum \alpha_{i,j} x_i x_j.$$

An experiment must be designed to estimate the parameters α_i and $\alpha_{i,j}$ in approximating f in a rigorous way. The effects of the variables are tested one by one, before testing potential cross effects between the variables. In this strategy, many tests are required beside the production, in particular to test the system under various conditions. This method is classical and efficient for contexts where the number of variables is limited. It supposes a good comprehension of the overall system and physical phenomena. A phenomenon is supposed to be linear or linearizable. Moreover, in this model, all variables x_i that affect the result are known when designing the experiment. The tests estimate parameters α_i and $\alpha_{i,j}$; i.e., the effects of the variables on y . Finally, the models and methods traditionally used to control the ramp-up phase during a change are poorly adapted to a change in complex, highly changing, and highly technological production (Schmitt et al. 2018).

With a large volume of data, it is also possible to consider a function including nonlinear relations; e.g., when using a neural network model (Al-kharaz et al. 2019). However, the learning is done on past data, which is problematic for a change that includes new parameters. This method considers known variables but does not unroot unknown parameters. The prediction of the performance after a change is computed without the never seen or never understood variables that affect in fact the quality. Moreover, the bias–variance tradeoff leads to a risk of an overestimation owing to the capture of noise as training data.

The strategy comprising estimating the function through the design of an experiment or the adoption of more elaborate data science methodology has limits. The design of an experiment is long, costly, and unsuitable for complex industries as its implementation requires long experiments besides the production; the machine learning practices are trained on the past; and the results are precise but can be unclear in terms of making a prediction and the physical comprehension of the causes behind the statistical correlations, and they are thus difficult to apply in practice (Colledani et al. 2018).

6.3. Second strategy: using and updating past data and expertise

The second strategy adopts a neighborhood approach. It benefits from past experience of change processes and updates knowledge and expertise. The “data” used are not only data from sensors but also data presented at previous change committee meetings, the experience of the experts, and the collective memory of the defaults and the breakdowns (and their causes) on the production line in the past.

If the function f is supposed to be a linear model, its approximation is based on the previous approximation made, for the nearest change in the past, denoted f_{t-1}^* . Combined with the advanced process control in place, the parameters can be estimated for normal production flow, without stopping production. Additionally, the formula for f^* can be improved through the interpretation of results by experts, who potentially detect the need to test new parameters or a new cross-relation. These new tests are noted in the process change report and are performed later, for the next similar change. In contrast, experts can attest to the independence of links that were tested before in a not useful way. Hence, some variables can be deleted from the formula for f^* . Consequently, the function f^* is approximated from period to period as $f_t^* = \Delta f_{t-1}^* + g^*$.

The term Δf_{t-1}^* indicates the part of the previous risk analysis taken for the new risk analysis. It represents the link to the past. The main risk variables are identified previously in the former written report of the previous similar change. The term g^* is a function of new parameters that explain the performance of the change. Distinguishing the variables already known when introducing a change, denoted x_k , and those unknown at the beginning of the ramp-up, denoted x_u , the true function of the process is written as $y = f(x)$, where $x = (x_k, x_u)$. The equation becomes $f_t^*(x_k, x_u) = \Delta f_{t-1}^*(x_k) + g^*(x_u)$.

Differentiating the expression by x_u , we obtain $\frac{\partial f_t^*(x_k, x_u)}{\partial x_u} = 0 + \frac{\partial g(x_u)}{\partial x_u}$, where $\frac{\partial g(x_u)}{\partial x_u}$ represents the exploration in variables comparing with the list of risks of the previous change. Consequently, the role of the experts is to

identify the variables of the previous risk analysis f_{t-1}^* , to determine the share of the past kept (Δ), and to estimate g^* .

6.4. Study case of STMicroelectronics

As previously described, change review boards are organized to qualify multiple changes made on the production line every week. For each change, three committee meetings are held, where a candidate (i.e., a person or group dedicated to the change) presents a risk analysis in front of four experts having different and complementary fields of expertise. The experts are experienced, know and have lived the history and evolution of the factory and its technologies, and are often (at least once a week) summoned to attend a committee meeting as a member of the board. The experts are used to the process and have in mind the results of previous committee meetings.

The process at the STMicroelectronics factory relies on the first hypothesis. Candidates who prepared risk analyses stated that *"We list the parameters for which we think that there is a risk, and check whether all the parameters are baseline"* and *"I listed the measures that I thought were at risk, according the physical model explaining the change, and I then checked whether they were within the limits."*

Indeed, an example presentation includes a large and general check list of risks relating to several parts of the process that could be affected by the change, and the candidate passes through all the risks listed to identify those relevant to the change. Moreover, an empty frame of FMEA is offered to the candidate who identifies specific risks of the change not covered by the general check list. The candidate then presents the first measures and a plan of tests to conduct in the following steps of the qualification. The experts pay attention during the committee meetings to the results of the measures, which must be within control and quality limits. Anomalies or drifts need to be carefully explained, and their causes need to be independent of the change.

However, further investigation suggests that the process is in fact more oriented toward the second strategy. Answers to the questionnaire questions on the preparation of the committee meetings revealed that candidates prepared risk analyses by copying a risk analysis for a previous similar change; e.g., *"This techno is already qualified on the same machine; so I just checked the same parameters that they checked before."*; *"I had already done a qualification that worked well before on the same type of equipment. So I did the same."*; *"I checked the previous FMEA—but it was not necessary to update—so I met with the device experts to discuss with them. After the first committee, a test was added by the board."* The board members' vision strengthens the second strategy, as the experts declared that *"The experience of the board members is crucial because they can warn about crises that occurred in the past and for that, add risks to control."*; *"We check that the presentation of the risks is coherent and that the results are logical."*; *"The risk analysis checks the referenced risks only; the added value of the board is to detect the non-referenced ones."*

Thus, the interviews with the candidates revealed that before the first committee meeting, a meeting is held with those who can give expert advice on the change (such as an expert on the tool affected by the change or an expert of a physical discipline relevant to the process). The purpose of this meeting is to prepare the FMEA. The candidate relies on a previous FMEA performed for a quasi-similar change to produce a first updated FMEA. The candidate or experts then amend and improve the risk analysis according to their knowledge, experience and competencies.

Then, during the committee meetings, the experts with the candidate look for abnormal behavior of the variables and carefully identify their cause, linking them to potential failures. They thus share collectively their knowledge for future committee meetings. They also pay close attention to the previous experiences of failures that did not consider—because they were not known—parameters or relations that could be important in the present risk analysis. They request complementary tests if the behavior of a variable is poorly understood. These practices constitute a sheaf of indications that make understand that the knowledge and competencies are kept or refined for the next similar change.

7. RESULTS AND DISCUSSION

This article considers the possibility of a fast rhythm of change in a complex and poorly understood production system in a robust and economic manner, and the conditions that make it possible. More precisely, the article questions the capture of an unknown spread within production data, the modeling of a strategy, and the organization required.

Two results emerge from this research. First, the model explains the strategy to rapidly go through the data to look for unknown phenomena and to explicitly and collectively learn them. With the equation $f_t^* = \Delta f_{t-1}^* + g^*$, the model stresses the importance of the past data as a base of reasoning for the control. It reinforces the role of the past knowledge stored for future changes (Zimmer et al. 2019). The factor Δ implies that the experts have a good measure of the distance between the past cases and the present case. The term g^* represents the novelty that was unknown in the past, hence the learning at each new change.

Second, the article clarifies the experts' role in the ramp-up process. More particularly, the experts interact with the data to detect potentially new phenomena. This strategy could have been a data-based monitoring and decision, but the search for unknowns in the data and inclusion of the experts' experience makes the process a design strategy and not only a decision strategy (Hatchuel et al. 2018). This reminds us of the role of design activity in the factory. It also emphasizes the importance of human expertise in the ramp-up process. In this process, the model shows that experts are at the same time the collective memory of the heritage (e.g., the history of crises and the history of discoveries) and the actors of the recomposition of this heritage. Moreover, their interactions take part to the design process and contribute to make the rationality expandable (Hatchuel 2001).

The results echo and extend on the two ramp-up strategies described by Zimmer et al. (2019).

The first strategy, to anticipate the potential disturbances arising in the ramp-up phase during the design phase, has its limits in already established systems. (See section 2.2 of the literature review.) Nevertheless, this strategy is also a claim for the modeling of the production system to be able to predict the effects of the changes on the production system. In this article, the modeling deals with the approximation of a function that links the variables that play a role and their effects on the system. Finally, this is the model of the interactions between the change and the system, which makes possible a type of simulation before the change, in a frugal way, as the article shows. This model can be viewed as a "twin" of the interactions between the change and the system that can be run before the change affects the system. In this article, the particularity of the twin is the incorporation of variables that are potentially new and thus traditionally evicted from a standard modeling approach. Consequently, the model is enriched in the ramp-up, and the potentially new disturbance can be understood and anticipated.

The second strategy, involving a continuous improvement during the ramp-up, invites the acquisition of new knowledge about the actual system behavior, through data gathering and analysis. This strategy enriches comprehension of the production system during and after the change, as well as the formal registering of the past experts' experience and competencies. This part of the result—the update of the model derived from the ramp-up period—can be understood as new knowledge explicitly incorporated in the model of the change. This sheds new light on the learning phenomenon during the ramp-up that was described by Terwiesch and E. Bohn (2001) and Vits et al. (2006). This part was described in the semiconductor domain, where the process change encourages the precise designation of the difference with a previous risk analysis of a similar change that is used as a model to copy. Hence, the areas of uncertainty or unknown are explicitly delimited (Trahan and Pollock 1999). However, the reasoning in this article goes further (Colledani et al. 2018). Indeed, the improvement loops can be implemented with a minimum failure rate, in contrast with the learning phenomenon that is often associated with ramp-up failures. Some of the new parameters in the model are found as a result of past experience or expert analyses, and new tests are requested to understand the phenomena.

Moreover, this article highlights the design activity in a data-based environment. Analysis of the second strategy shows that although data are precious in risk analysis, very few data are needed to control the change. This is a result of the smart use of data that enables a fine tuning of the representation of the effects of the changes on the system. Here, the term "smart" refers at the same time to the preservation of previous knowledge and competencies and to the exploration of anomalies and potential unknowns that could enter the comprehension of the observed phenomena. Additionally, this article clarifies the role of experts, which is essential to implementing the second strategy. The transformation of the production system is possible thanks to the use of data, but the collective expertise of experienced people is required in understanding crucial interactions and driving the changes (Schmitt et al. 2018; Doltsinis et al. 2020). This contributes to the larger debate on Operator

4.0 (Pfeiffer 2016; Schmitt et al. 2018; Doltsinis et al. 2020), who is, in this research, a strategic designer, experienced and capable of understanding the interactions within the black box of the data, and capable of solving potential complex new and unexpected problems that can emerge during the ramp-up. Consequently, the operators and experts are not only keepers of knowledge for the good working of the production system but also the enablers of the transformation of the system, in a creative heritage logics framework (Carvajal Pérez et al. 2020).

Acknowledgment

We thank Edanz (www.edanz.com/ac) for editing a draft of this manuscript.

References

- Abbas N, Gravell AM, Wills GB (2008) Historical roots of agile methods: where did ‘agile thinking’ come from? In: Abrahamsson P, Baskerville R, Conboy K, Fitzgerald B, Morgan L, Wang X (eds) *Agile processes in software engineering and extreme programming*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp 94–103. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68255-4_10
- Al-kharaz M, Ananou B, Ouladsine M, Combal M, Pinaton J (2019) Quality prediction in semiconductor manufacturing processes using multilayer perceptron feedforward artificial neural network. 2019 8th International Conference on Systems and Control (ICSC), 423–28. <https://doi.org/10.1109/ICSC47195.2019.8950664>
- Barbier R, Le Masson P, Weil B (2021) Transforming data into added-value information: the design of scientific measurement models through the lens of design theory. *Proceedings of the Design Society 1* (August):3239–48. <https://doi.org/10.1017/pds.2021.585>
- Basse I, Schmitt S, Gartzten T, Schmitt R (2014) Solution principles for managing instabilities in ramp-up. *Procedia CIRP* 20:93–97. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.154>
- Cabanes B (2017) *Modéliser l’émergence de l’expertise et sa gouvernance dans les entreprises innovantes: des communautés aux sociétés proto-épistémiques d’experts*. Paris Sciences et Lettres (ComUE)
- Cabanes B, Hubac S, Le Masson P, Weil B (2021) Improving reliability engineering in product development based on design theory: the case of fmea in the semiconductor industry. *Research in Engineering Design* 32(3):309–29. <https://doi.org/10.1007/s00163-021-00360-1>
- Carlson C (2012) *Effective FMEAs: achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis*. John Wiley & Sons
- Carpitella S, Certa A, Izquierdo J, La Fata CM (2018) A combined multi-criteria approach to support FMECA analyses: a real-world case. *Reliability Engineering & System Safety* 169 (January):394–402. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.09.017>
- Carvajal Pérez D, Le Masson P, Weil B, Araud A, Chaperon V (2020) Creative heritage: overcoming tensions between innovation and tradition in the luxury industry. *Creativity and Innovation Management* 29:140–51
- Colledani M, Tolio T, Yemane A (2018) production quality improvement during manufacturing systems ramp-up. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 23 (November):197–206. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.07.001>
- Dağsuyu C, Göçmen E, Narlı M, Kokangül A (2016) Classical and fuzzy FMEA risk analysis in a sterilization unit. *Computers & Industrial Engineering* 101 (November):286–94. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.09.015>
- De Andrade JMM, De Leite AFCSM, Canciglieri MB, De Loures EFR, Canciglieri O (2020) A multi-criteria approach for FMEA in product development in Industry 4.0. *Adv Transdiscipl Eng* 12:311–20
- Doltsinis S, Ferreira P, Mabkhot MMM, Lohse N (2020) A decision support system for rapid ramp-up of Industry 4.0 enabled production systems. *Computers in Industry* 116 (April):103190. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103190>
- Dombrowski U, Wullbrandt J, Krenkel P (2018) Industrie 4.0 in production ramp-up management. *Procedia Manufacturing*, 28th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2018), June 11–14, 2018, Columbus, OH, USA *Global Integration of Intelligent Manufacturing and Smart Industry for Good of Humanity*, 17 (January):1015–22. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.10.085>

- Guo J, Zhao N, Sun L, Zhang S (2019) Modular based flexible digital twin for factory design. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 10(3):1189–1200
- Hardt DE (1996) *Manufacturing processes and process control*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA
- Hatchuel A, Le Masson P, Reich Y, Subrahmanian E (2018) Design theory: a foundation of a new paradigm for design science and engineering. *Research in Engineering Design* 29(1):5–21
- 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):1543–52. <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.160>
- Hatchuel A, Weil B (2003) A new approach of innovative design: an introduction to CK theory. DS 31: *Proceedings of ICED 03, 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm*
- Henshall E, Campean IF, Rutter B (2014) A systems approach to the development and use of FMEA in complex automotive applications. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing* 7(2):280–90
- Joshi G, Joshi H (2014) FMEA and alternatives v/s enhanced risk assessment mechanism. *International Journal of Computer Applications* 93(14):33–37. <https://doi.org/10.5120/16284-6047>
- Kagermann H, Wahlster W, Helbig J (2013) *Securing the future of German manufacturing industry: recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final Report of the Industrie 4 (0)*
- Koren Y, Shpitalni M (2010) Design of reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems* 29(4):130–41. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2011.01.001>
- Lipol LS, Haq J (2011) Risk analysis method: FMEA/FMECA in the organizations. *International Journal of Basic & Applied Sciences* 11(5):9
- Lumsakul P, Sheldrick L, Rahimifard, S (2018) The sustainable co-design of products and production systems. *Procedia Manufacturing*, 15th Global Conference on Sustainable Manufacturing 21 (January):854–61. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.193>
- Mili A, Siadat A, Bassetto S, Hubac S, Tollenaere M (2009) Unified process for action plan management case study in a research and production semiconductor factory. 2009 3rd Annual IEEE Systems Conference, IEEE, pp 372–76
- Pech M, Vrchota J (2022) The product customization process in relation to Industry 4.0 and digitalization. *Processes* 10(3):539
- Peeters JFW, Basten RJJ, Tinga T (2018) Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a recursive manner. *Reliability Engineering & System Safety* 172 (April):36–44. <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.11.024>
- Pfeiffer S (2016) Robots, Industry 4.0 and humans, or why assembly work is more than routine work. *Societies* 6(2): 16
- Schmitt R, Heine I, Jiang R, Giedziella F, Basse F, Voet H, Lu S (2018) On the future of ramp-up management. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 23 (November):217–25. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2018.03.001>
- Shariatzadeh N, Sivard G, Chen D (2012) Software evaluation criteria for rapid factory layout planning, design and simulation. *Procedia CIRP*, 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2012, 3 (January):299–304. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.052>
- Stone RB, Tumer IY, Stock ME (2005) Linking product functionality to historic failures to improve failure analysis in design. *Research in Engineering Design* 16(1):96–108. <https://doi.org/10.1007/s00163-005-0005-z>
- Subriadi AP, Najwa NF (2020) The consistency analysis of failure mode and effect analysis (FMEA) in information technology risk assessment. *Heliyon* 6(1):e03161. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03161>
- Sun L, Peng L, Deng G, Chien K (2017) A novel FMEA tool application in semiconductor manufacture. 2017 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), pp 1–4. <https://doi.org/10.1109/CSTIC.2017.7919906>
- Terwiesch C, Bohn RE (2001) Learning and process improvement during production ramp-up. *International Journal of Production Economics* 70(1):1–19. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(00\)00045-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(00)00045-1)
- Trahan R, Pollock A (1999) Using an inverted FMEA to manage change and reduce risk in a FAB. 1999 IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing Conference Proceedings (Cat No.99CH36314), pp 15–18. <https://doi.org/10.1109/ISSM.1999.808727>
- Vits J, Gelders L, Pintelon L (2006) Production process changes: a dynamic programming approach to manage effective capacity and experience. *International Journal of Production Economics, Theoretical Issues in Production Scheduling and Control & Planning and Control of Supply Chains and Production*, 104(2):473–81. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.08.007>

- Zimmer M, Ferreira P, Danny P, Al-Yacoub A, Lohse N, Gentile V (2019) Towards a decision-support framework for reducing ramp-up effort in plug-and-produce systems. 2019 IEEE International Conference on Industrial Cyber Physical Systems (ICPS), pp 478–83. <https://doi.org/10.1109/ICPHYS.2019.8780369>
- Zio E (2016) Some challenges and opportunities in reliability engineering. IEEE Transactions on Reliability 65(4):1769–82. <https://doi.org/10.1109/TR.2016.2591504>

Missions of the manager N+1	He or she creates a climate of confidence among his group, helps their colleague create the form. He or she highlights the participative innovation in the daily management and answer in details to the ideas. He or she validates the ideas.	(+) The manager N+1 has main goals, but the precise objectives and methods to reach them are decided by himself. In particular, the type of design approach used is not specified.
The local innovation material department	It is the expert in the fields of safety, engineering, railway exploitation. It decides on the design of the innovation.	(+) The rules of the suggestion system predict the potential change of maintenance rules

RÉSUMÉ

Les usines font face à de nombreux enjeux qui appellent à des transformations industrielles majeures. Les crises actuelles (pandémies, crises écologique, guerres) et les diverses défaillances productives qu'elles ont mis au jour – ruptures d'approvisionnement, pollution- renforcent le caractère crucial de ces mutations.

Pour y répondre, l'innovation technologique est souvent présentée comme le principal vecteur de changement au sein des usines. Cette mutation technologique, appelée « industrie 4.0 » est souvent conçue en amont par les fournisseurs, les bureaux d'études et des méthodes, avant d'être adaptée à chaque usine. Néanmoins, l'innovation technologique est-elle la seule réponse pour faire face aux défis contemporains ?

La thèse propose d'explorer une autre voie : celle de la conception par l'usine de ses propres règles. L'usine aurait-elle des moyens de prescrire sa transformation ? Quelle ampleur peut revêtir l'activité de conception en usine ? Pour quelles performances et quelles générativités ? A quelles conditions ? Avec quelles méthodes ?

Répondre à ces questions ne va pas de soi : la production est avant tout le lieu de l'exécution. Les astuces et le bricolage, le mouvement participatif, les cercles de qualité, et de façon plus générale, les démarches d'amélioration continue sont des formes de conception mais dans une visée d'optimisation des règles aux contraintes du réel. Un autre modèle, plus exploratoire, consisterait à ce que l'usine conçoive sa propre prescription. Dans cette hypothèse, comment serait-il possible de changer les règles tout en respectant celles du BE et en garantissant des performances productives identiques ou meilleures ? Comment un cadre contraint et hérité d'années en années peut-il intégrer un changement qui pourrait pourtant venir perturber tout le système productif ?

Pour étudier ce dilemme tradition/innovation s'opérant au cœur de l'usine, cette thèse s'appuie sur quatre articles chapeautés d'un texte les replaçant dans une problématique plus générale et les articulant. L'ensemble rend compte de recherches menées sur des terrains empiriques variés et hétérogènes. D'abord, l'usine d'Airbus à Saint-Nazaire reçoit et assemble la pointe avant et le fuselage central des avions, avant d'en commencer l'équipement. Peu automatisée, la qualité de sa production repose sur l'expertise de ses compagnons. Ensuite, le technicentre SNCF des TER-Pays de la Loire à Nantes est en charge de la maintenance des trains régionaux. L'usine travaille en « trois huit », avec un changement amorcé vers plus d'automatisation du matériel et dans la détection de pannes, et des métiers de maintenance en transition. Enfin, l'usine de STMicroelectronics à Crolles, fabrique des puces électroniques en industrie 4.0 depuis le début des années 2000. En salle blanche, avec des procédés automatisés et précis à l'Ångström près, la production est principalement gérée par des ingénieur.e.s en nanotechnologies.

Cette thèse montre d'abord que malgré le cadre très contraint de la prescription émanant du bureau d'études, il existe un régime où l'usine est capable d'innover en régénérant son système de règles (sa prescription). Cette dynamique de patrimoine de création est modélisée ; les expérimentations sur les terrains hétérogènes donnent à voir différentes ressources nécessaires pour la mettre en œuvre. Elles sont à la fois semblables à ce qui pourrait être attendu d'une organisation pour la conception innovante, mais ont des caractéristiques propres aux contraintes de l'usine et à la conception d'un système de règles.

MOTS CLÉS

Usine conceptrice ; conception ; usine ; règle ; industrie 4.0 ; production

ABSTRACT

Factories face many challenges that call for major industrial transformations. The current crises (pandemics, ecological crises, wars) and the various productive failures they have brought to light – disruptions in supply, pollution – reinforce the crucial nature of these changes.

To respond to this, technological innovation is often presented as the main vector of change within factories. This technological change, called "industry 4.0", is often designed upstream by suppliers, design offices and methods, before being adapted to each plant. Nevertheless, is technological innovation the only answer to face contemporary challenges?

The thesis proposes to explore another way: the factory could design its own rules. Would the factory have the means to prescribe its transformation? How significant can the design activity in the factory be? For which performance and which generativity? Under which conditions? With which methods?

Answering these questions is not easy: production is the place of execution. Tricks and do-it-yourself, the participatory movement, quality circles, and more generally, continuous improvement approaches are forms of design but with a view to optimizing the rules to the constraints of reality. In another and more exploratory model, the factory would design its own prescription. In this hypothesis, how would it be possible to change the rules while respecting those of the design office and guaranteeing identical or better productive performances? How can a constrained framework inherited from year to year integrate a change that could nevertheless disrupt the entire production system?

To study this tradition/innovation dilemma operating at the heart of the factory, this thesis is based on four articles headed by a text placing them in a more general problematic and articulating them. The whole reports on research carried out in varied and heterogeneous empirical fields. First, the Airbus plant in Saint-Nazaire receives and assembles the nose cone and the central fuselage of the aircraft, before starting to equip them. Not very automated, the quality of its production relies on the expertise of its companions. Then, the SNCF technicentre of the TER-Pays de la Loire in Nantes is in charge of the maintenance of the regional trains. The plant works in "three eights", with a change initiated towards more automation of equipment and in the detection of failures, and maintenance jobs in transition. Finally, the STMicroelectronics plant in Crolles has been manufacturing electronic chips in Industry 4.0 since the early 2000s. In a clean room, with automated and precise processes to the nearest Ångström, production is mainly managed by engineers in nanotechnology.

This thesis first shows that despite the very constrained framework of the prescription emanating from the design office, there is a regime where the factory is able to innovate by regenerating its system of rules (its prescription). This creative heritage dynamic is modeled; experiments on heterogeneous terrain show the different resources needed to implement it. They are both similar to what might be expected of an organization for innovative design, but have characteristics unique to the constraints of the factory and the design of a system of rules.

KEYWORDS

Design ; factory ; rule ; Industry 4.0 ; production