



HAL
open science

Méthode d'aide au déploiement du système cyber-physique flexible dans le contexte de l'industrie 4.0

Anthony Chehami

► To cite this version:

Anthony Chehami. Méthode d'aide au déploiement du système cyber-physique flexible dans le contexte de l'industrie 4.0. Sciences de l'ingénieur [physics]. INSA de Lyon, 2024. Français. NNT : 2024ISAL0081 . tel-04846882

HAL Id: tel-04846882

<https://theses.hal.science/tel-04846882v1>

Submitted on 18 Dec 2024

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

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



N°d'ordre NNT : 2024ISAL0081

**THESE de DOCTORAT DE L'INSA LYON,
membre de l'Université de Lyon**

**Ecole Doctorale N° accréditation
(Info-Maths)**

Spécialité/ discipline de doctorat :
Informatique et applications

Soutenue publiquement le 08/10/2024, par :
(Anthony CHEHAMI)

**Méthode d'aide au déploiement du
système cyber-physique flexible dans le
contexte de l'industrie 4.0**

*Method to support the deployment of flexible and reconfigurable cyber-physical systems
in the context of Industry 4.0*

Devant le jury composé de :

Yves SALLEZ	Professeur des Universités, INSA des Hauts de France,	Rapporteur
Julien LE DUGOU	Professeur des Universités, UTC, Compiègne	Rapporteur
Zineb SIMEU-ABAZI	Professeur des Universités – INP Grenoble, G-SCOP	Présidente du jury
Ali SIADAT	Professeur des Universités - Arts et Métiers Metz- LCFC	Examineur
Marian SCUTURICI	Professeur des Universités - INSA de Lyon - LIRIS	Examineur
Eva ROTHER	Directrice industriel-Comeca Group-Chatenoy le Royal	Examinatrice
Armand BABOLI	Professeur des Universités - -INSA de Lyon	Directeur de thèse

Référence : TH1138_CHEHAMI Anthony

L'INSA Lyon a mis en place une procédure de contrôle systématique via un outil de détection de similitudes (logiciel Compilatio). Après le dépôt du manuscrit de thèse, celui-ci est analysé par l'outil. Pour tout taux de similarité supérieur à 10%, le manuscrit est vérifié par l'équipe de FEDORA. Il s'agit notamment d'exclure les auto-citations, à condition qu'elles soient correctement référencées avec citation expresse dans le manuscrit.

Par ce document, il est attesté que ce manuscrit, dans la forme communiquée par la personne doctorante à l'INSA Lyon, satisfait aux exigences de l'Etablissement concernant le taux maximal de similitude admissible.

Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
ED 206 CHIMIE	CHIMIE DE LYON https://www.edchimie-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage secretariat@edchimie-lyon.fr	M. Stéphane DANIELE C2P2-CPE LYON-UMR 5265 Bâtiment F308, BP 2077 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69616 Villeurbanne directeur@edchimie-lyon.fr
ED 341 E2M2	ÉVOLUTION, ÉCOSYSTÈME, MICROBIOLOGIE, MODÉLISATION http://e2m2.universite-lyon.fr Sec. : Bénédicte LANZA Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr	Mme Sandrine CHARLES Université Claude Bernard Lyon 1 UFR Biosciences Bâtiment Mendel 43, boulevard du 11 Novembre 1918 69622 Villeurbanne CEDEX e2m2.codir@listes.univ-lyon1.fr
ED 205 EDISS	INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTÉ http://ediss.universite-lyon.fr Sec. : Bénédicte LANZA Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 secretariat.ediss@univ-lyon1.fr	Mme Sylvie RICARD-BLUM Laboratoire ICBMS - UMR 5246 CNRS - Université Lyon 1 Bâtiment Raulin - 2ème étage Nord 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69622 Villeurbanne Cedex Tél : +33(0)4 72 44 82 32 sylvie.ricard-blum@univ-lyon1.fr
ED 34 EDML	MATÉRIAUX DE LYON http://ed34.universite-lyon.fr Sec. : Yann DE ORDENANA Tél : 04.72.18.62.44 yann.de-ordenana@ec-lyon.fr	M. Stéphane BENAYOUN Ecole Centrale de Lyon Laboratoire LTDS 36 avenue Guy de Collongue 69134 Ecully CEDEX Tél : 04.72.18.64.37 stephane.benayoun@ec-lyon.fr
ED 160 EEA	ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE https://edeea.universite-lyon.fr Sec. : Philomène TRECOURT Bâtiment Direction INSA Lyon Tél : 04.72.43.71.70 secretariat.edeea@insa-lyon.fr	M. Philippe DELACHARTRE INSA LYON Laboratoire CREATIS Bâtiment Blaise Pascal, 7 avenue Jean Capelle 69621 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.72.43.88.63 philippe.delachartre@insa-lyon.fr
ED 512 INFOMATHS	INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES http://edinfomaths.universite-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage Tél : 04.72.43.80.46 infomaths@univ-lyon1.fr	M. Hamamache KHEDDOUCI Université Claude Bernard Lyon 1 Bât. Nautibus 43, Boulevard du 11 novembre 1918 69 622 Villeurbanne Cedex France Tél : 04.72.44.83.69 direction.infomaths@listes.univ-lyon1.fr
ED 162 MEGA	MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE http://edmega.universite-lyon.fr Sec. : Philomène TRECOURT Tél : 04.72.43.71.70 Bâtiment Direction INSA Lyon mega@insa-lyon.fr	M. Etienne PARIZET INSA Lyon Laboratoire LVA Bâtiment St. Exupéry 25 bis av. Jean Capelle 69621 Villeurbanne CEDEX etienne.parizet@insa-lyon.fr
ED 483 ScSo	ScSo¹ https://edsciencessociales.universite-lyon.fr Sec. : Mélina FAVETON Tél : 04.78.69.77.79 melina.faveton@univ-lyon2.fr	M. Bruno MILLY (INSA : J.Y. TOUSSAINT) Univ. Lyon 2 Campus Berges du Rhône 18, quai Claude Bernard 69365 LYON CEDEX 07 Bureau BEL 319 bruno.milly@univ-lyon2.fr

¹ ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes et institutions qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette thèse.

Tout d'abord, je remercie chaleureusement Armand BABOLI, mon directeur de thèse, pour son guidage précieux tout au long de cette recherche. Son aptitude à poser les bonnes questions et à orienter mes réflexions a été essentielle dans le développement de ce travail. Sa rigueur académique et son soutien constant ont été des piliers sur lesquels je me suis appuyé durant ces années de recherche.

Je suis profondément reconnaissant envers FPT, non seulement pour l'opportunité de réaliser cette thèse au sein de l'entreprise, mais aussi pour le soutien de mes collègues. Leur collaboration et leur aide ont été cruciales pour la mise en pratique des concepts développés dans cette recherche.

Un grand merci à mes collègues du LIRIS. Les échanges intellectuels et les discussions enrichissantes que nous avons eues ont été une source constante de motivation et d'inspiration. Leur soutien et leur camaraderie ont rendu cette expérience de recherche des plus agréables. Plus particulièrement, je tiens à remercier Mehdi Mahmoodjanloo pour son expertise et son aide sur la partie modélisation mathématique.

Je tiens également à exprimer toute ma gratitude à ma famille. Leur amour inconditionnel et leur soutien indéfectible m'ont porté tout au long de cette aventure. Merci pour votre patience et votre compréhension durant les moments de doute et de fatigue.

Enfin, à mes amis, un grand merci pour l'humour et le soutien que vous m'avez apporté. Vous avez su égayer les moments difficiles et me rappeler l'importance de la détente et du rire.

À tous, je vous dis un grand merci. Cette thèse est le fruit de vos contributions et de votre soutien, et je vous en suis profondément reconnaissant.

Résumé

Cette thèse se situe dans un paysage industriel en constante évolution, marqué par l'avènement de l'Industrie 4.0, qui transforme les systèmes de production grâce à l'intégration des technologies avancées. Le cadre de cette étude est l'usine FPT de Bourbon-Lancy, une composante de Fiat Powertrain Technologies France (FPT-BLY), spécialisée dans la fabrication de moteurs pour véhicules. L'usine, confrontée à la nécessité d'intégrer le nouveau moteur XC13 dans des lignes de production existantes, offre un exemple pertinent de l'impératif industriel d'accroître la flexibilité et la reconfigurabilité pour rester compétitive. Dans ce contexte, l'Industrie 4.0 avec ses systèmes cyber-physiques, l'Internet des objets et l'intelligence artificielle, promet de révolutionner les pratiques de production par une adaptation rapide aux demandes changeantes et par l'optimisation des processus de fabrication.

En tant que responsable de la transformation digital à FPT-BLY, l'objectif principal de ma thèse est de développer une méthode optimale pour déployer des systèmes de production flexibles et reconfigurables, en réponse aux défis posés par l'Industrie 4.0. En effet, l'Industrie 4.0 introduit une série de nouvelles méthodologies rendues possibles par les technologies de cette révolution industrielle. Cette thèse se concentre principalement sur les méthodologies d'auto-ajustement et d'auto-configuration, qui nécessitent une flexibilité certaine pour être efficaces et opérationnelles. Cet objectif découle directement des lacunes identifiées dans la littérature scientifique et des besoins de l'industrie, où l'accent est souvent mis sur les aspects qui touchent directement le produit mais moins sur le système global. Les questions de recherche portent sur la définition des types de flexibilité, l'évaluation de leur impact sur la compétitivité industrielle, et la façon dont ces systèmes peuvent être optimisés et intégrés dans des environnements de production existants.

Les contributions de cette thèse sont multiples et structurées autour de l'identification, de la mesure et de l'optimisation de la flexibilité dans les systèmes de production. Premièrement, une taxonomie détaillée des différents types de flexibilité est établie, offrant une base pour comprendre comment chaque type contribue à la compétitivité industrielle. Ensuite, des modèles d'optimisation mathématique sont développés pour mesurer la flexibilité des systèmes de production et identifier le niveau approprié pour chaque type de flexibilité, permettant aux entreprises de quantifier et d'optimiser leurs capacités de production en fonction de leurs besoins. Ces modèles aident également à planifier les investissements en technologies de l'Industrie 4.0 de manière optimale.

La thèse propose quatre méthodologies de mesure et d'optimisation de la flexibilité, allant de la plus simple à mettre en place à la plus complexe. Les méthodologies les plus simples permettent une implémentation rapide et facile, tandis que les plus complexes offrent une précision accrue et des bénéfices plus importants. Chacune des méthodologies répond aux limites de la précédente, assurant une progression continue vers des décisions plus précises et plus impactantes pour le système de production.

Enfin, l'ensemble de ces méthodologies a été appliqué au cas de l'usine FPT-BLY, illustré par l'intégration d'un nouveau moteur. Ces méthodologies ont permis à FPT-BLY de progresser de manière graduelle vers une compréhension approfondie et une utilisation efficace de la flexibilité. Le processus a débuté par l'identification et la compréhension des différents types de flexibilité, suivi de leur évaluation détaillée à l'aide de la cartographie. Cette démarche a culminé avec la proposition d'une feuille de route optimisée, guidant l'usine dans l'amélioration continue de sa flexibilité et de ses capacités de production.

Mot clés : Flexibilité, Système manufacturier flexible, Optimisation de la flexibilité, Système cyber-physique, Industrie 4.0

Abstract

This thesis is set in a constantly evolving industrial landscape marked by the advent of Industry 4.0, which is transforming production systems through the integration of advanced technologies. The focus of this study is the FPT factory in Bourbon-Lancy, part of Fiat Powertrain Technologies France (FPT-BLY), specializing in manufacturing engines for vehicles. The factory, faced with the necessity to integrate the new XC13 engine into existing production lines, provides a relevant example of the industrial imperative to enhance flexibility and reconfigurability to remain competitive. In this context, Industry 4.0, with its cyber-physical systems, the Internet of Things, and artificial intelligence, promises to revolutionize production practices through rapid adaptation to changing demands and optimization of manufacturing processes.

As digital transformation manager in FPT-BLY plant, the primary objective of my thesis is to develop an optimal method for deploying flexible and reconfigurable production systems in response to the challenges posed by Industry 4.0. Indeed, Industry 4.0 introduces a series of new methodologies made possible by the technologies of this industrial revolution. This thesis focuses mainly on self-adjustment and self-configuration methodologies, which require a certain level of flexibility to be effective and operational. This objective directly stems from the gaps identified in the scientific literature and the needs of the industry, where the focus is often on aspects directly affecting the product but less so on the overall system. The research questions address the definition of types of flexibility, the evaluation of their impact on industrial competitiveness, and how these systems can be optimized and integrated into existing production environments.

The contributions of this thesis are manifold and structured around the identification, measurement, and optimization of flexibility in production systems. Firstly, a detailed taxonomy of different types of flexibility is established, providing a basis for understanding how each type contributes to industrial competitiveness. Next, mathematical optimization models are developed to measure the flexibility of production systems and identify the appropriate level for each type of flexibility, allowing companies to quantify and optimize their production capabilities based on their needs. These models also assist in optimal planning investments in Industry 4.0 technologies.

The thesis proposes four methodologies for measuring and optimizing flexibility, ranging from the simplest to the most complex to implement. The simplest methodologies allow for quick and easy implementation, while the more complex ones offer increased precision and greater benefits. Each methodology addresses the limitations of the previous one, ensuring continuous progress toward more precise and impactful decisions for the production system.

Finally, all these methodologies were applied to the case of the FPT-BLY factory, illustrated by the integration of a new engine. These methodologies enabled FPT-BLY to progressively achieve a deep understanding and effective use of flexibility. The process began with the identification and understanding of different types of flexibility, followed by their detailed evaluation using mapping. This approach culminated in the proposal of an optimized roadmap, guiding the factory in the continuous improvement of its flexibility and production capabilities.

Keywords: Flexibility, Flexible manufacturing system, Flexibility optimization, Cyber-physical system, Industry 4.0

Table des matières

Remerciements	4
Résumé.....	5
Abstact.....	6
Table des figures	10
Table des tableaux	12
Lexique.....	14
Partie 1 : Introduction, Problématiques, état de l’art.....	16
1 Chapitre 1 : Introduction	17
1.1 Objectifs et questions de recherche.....	18
1.2 Motivation.....	19
1.3 Structure de thèse.....	20
2 Chapitre 2 : Entreprise et challenges	21
2.1 Présentation du groupe FPT Industrial.....	21
2.2 Présentation de l’usine FPT à Bourbon-Lancy	22
2.3 Complexités et spécificités de l’usine de Bourbon-Lancy.....	24
2.4 Histoire et évolution de l’usine FPT-BLY	25
2.5 Parc machines de production – équipements	27
2.6 Contexte et défis	27
2.6.1 Le contexte de FPT-BLY.....	27
2.6.2 Les défis de FPT-BLY.....	28
2.6.3 L’intérêt de la thèse pour FPT-BLY.....	29
3 Chapitre 3 : Etat de l’art	30
3.1 Méthodologie recherche documentaire	30
3.1.1 Evolution des publications scientifiques du domaine.....	31
3.2 Analyses VOSviewer.....	33
3.2.1 Analyse des mots clés.....	33
3.2.2 Analyse des influences	35
3.2.3 Analyse des tendances	37
3.2.4 Discussion et conclusion des analyses VOSviewer.....	38
3.3 Analyse des articles principaux.....	39
3.4 Les paradigmes des systèmes de production.....	42
3.4.1 DMS	42
3.4.2 RMS.....	43
3.4.3 CMS.....	43

3.4.4	FMS	44
3.4.5	Conclusion sur les paradigmes de systèmes de production	44
3.5	La flexibilité.....	45
3.5.1	Définition de la flexibilité.....	45
3.5.2	Les types de flexibilité.....	46
3.5.3	Classification de la flexibilité	54
3.5.4	Axes de mesure de la flexibilité.....	55
3.6	Industrie 4.0 et systèmes cyber-physique	60
3.6.1	L'industrie 4.0	60
3.6.2	Industrie 4.0 et flexibilité.....	64
3.7	Définition robustesse, résilience, agilité	67
3.7.1	Robustesse	67
3.7.2	Résilience.....	68
3.7.3	Agilité	69
3.7.4	Conclusion et comparaison avec la flexibilité	70
3.8	Conclusion de l'état de l'art	70
Partie 2 : Méthodologie et résultats		72
4	Chapitre 4 : Cadre de la méthodologie conceptuel.....	74
4.1	Caractérisation de la flexibilité	74
4.1.1	Identification des types de flexibilité.....	74
4.1.2	Classification PDI.....	79
4.1.3	Axes de mesure PRA de la flexibilité.....	82
4.1.4	Conclusion de la caractérisation	83
4.2	Cartographie de la flexibilité.....	83
4.2.1	Etapas de la cartographie de la flexibilité.....	84
4.2.2	Application de la cartographie de la flexibilité.....	84
4.2.3	Conclusion de la cartographie de la flexibilité	86
4.3	Méthode de mesure de la flexibilité avec les KPIs	87
4.3.1	Formalisation mathématique de méthodologie.....	88
4.3.2	Application de la méthodologie.....	89
4.3.3	Conclusion de la méthodologie avec KPIs	95
4.4	Conclusion du chapitre.....	95
5	Chapitre 5 : Modèle d'optimisation mathématique de flexibilité global	96
5.1	Introduction et contexte du problème	96
5.2	Modélisation du problème	97
5.2.1	Modèle 1 : Performance en flexibilité	97

5.2.2	Modèle 2 : Planification de l'investissement.....	100
5.2.3	Explication de l'objectif des modèles.....	104
5.3	Etude de cas, résultats	105
5.3.1	Présentation des données et paramètres.....	105
5.3.2	Présentation des résultats sur l'étude de cas	113
5.3.3	Analyse de sensibilité et robustesse.....	115
5.3.4	Présentation des résultats sur la planification de l'investissement	122
5.4	Conclusion du chapitre.....	128
Partie 3 : Conclusion et perspectives de la thèse		130
Conclusion générale		130
Perspectives de recherche.....		134
Publications		137
Références		138
Annexes.....		144
A.	IDEF0 global de FPT-BLY détaillée.....	145
B.	Cartographie de la flexibilité FPT-BLY	146
C.	Formulations linéaires correspondantes pour les états $Di = 2$ and $Di = 3$	152
D.	Détails des méthodologies et leurs liens.....	153

Table des figures

Figure 1. Moteurs et générateurs d'énergie fabriqués par FPT Industrial.....	21
Figure 2. Plan usine FPT-BLY	22
Figure 3. Composants principaux usinés chez FPT industrial.....	23
Figure 4. Usinage fonte	23
Figure 5. Usinage acier.....	23
Figure 6. Assemblage	24
Figure 7. Pyramide des variantes moteurs (Avec XC13 à droite)	24
Figure 8. Répartition fournisseur FPT-BLY	25
Figure 9. Histoire et évolution de l'usine FPT-BLY	26
Figure 10. Récompenses obtenues par l'usine FPT-BLY	27
Figure 11. Evolution des publications sur FMS	31
Figure 12. Evolution des publications sur RMS.....	32
Figure 13. Evolution des publications sur I4.0.....	32
Figure 14. VOSviewer : Analyse mots clés.....	34
Figure 15. VOSviewer : Analyse des influences	36
Figure 16. VOSviewer : Analyse des tendances	37
Figure 17. Illustration de la flexibilité.....	46
Figure 18. Technologies de l'industrie 4.0.....	62
Figure 19. Piliers industrie 4.0 (Ebrahimi 2020).....	63
Figure 20. Les données dans l'industrie 4.0.....	63
Figure 21. Vision 4.0 de FPT-BLY	64
Figure 22. Illustration de la robustesse.....	68
Figure 23. Illustration de la résilience	69
Figure 24. Illustrations des contributions	72
Figure 25. L'ensemble types de flexibilité.....	75
Figure 26. Matrice de classification de la flexibilité	79
Figure 27. Dimensions de la flexibilité	83
Figure 28. Etapes de la méthodologie par KPIs	89
Figure 29. IDEF0 global de FPT-BLY	90
Figure 30. Résultat des indicateurs de flexibilité pour FPT-BLY	94
Figure 31. Illustration des relations de prérequis (ET/OU) entre les technologies alternatives	97
Figure 32. Illustration de l'incidence du choix d'une alternative technologique sur les violations du plan de montée en puissance.	104
Figure 33. Changements dans le Total Utility Index(<i>TUI</i> *) avec une augmentation du niveau du budget total	118
Figure 34. Changements dans la valeur du Total Flexibility (TF), la valeur du Total Operational Performance (TOP), et le Total Utility Index (TUI) considérant les solutions <i>S1</i> à <i>S7</i>	119
Figure 35. Évolution du taux d'importance de l'indice de performance opérationnelle par rapport à l'indice de flexibilité (sans tenir compte de la limitation budgétaire).....	120
Figure 36. La comparaison des valeurs de la flexibilité totale avec différents niveaux d'effets synergiques.....	122
Figure 37. Le front de Pareto obtenu pour la planification de la feuille de route bi-objective du problème MFLS-SE	123
Figure 38. Comparaison entre la capacité cible et la capacité de production réelle obtenue grâce à la mise en œuvre de la solution de Pareto <i>PS1</i>	124

Figure 39. Comparaison entre la capacité cible et la capacité de production réelle obtenue grâce à la mise en œuvre de la solution de Pareto <i>PS2</i>	125
Figure 40. Comparaison entre la capacité cible et la capacité de production réelle obtenue grâce à la mise en œuvre de la solution de Pareto <i>PS3</i>	126
Figure 41. Comparaison entre la capacité cible et la capacité de production réelle obtenue grâce à la mise en œuvre de la solution de Pareto <i>PS4</i>	127

Table des tableaux

Tableau 1. Analyses des articles principaux sur la flexibilité industrielle	40
Tableau 2. Dimensions de la flexibilité selon Sethi et Sethi (1990).....	54
Tableau 3. Dimensions de la flexibilité selon Sánchez & Pérez 2005	55
Tableau 4. Synthèse méthodologie de mesure de la flexibilité	59
Tableau 5. Proposition de classification PDI des types de flexibilité	81
Tableau 6. Cartographie flexibilité FPT-BLY "Ressource"	85
Tableau 7. Types de flexibilité pour le cas d'étude de FPT-BLY.....	91
Tableau 8. Liste des KPI de FPT-BLY	92
Tableau 9. Résultats des normalisations des indicateurs	93
Tableau 10. Détails des valeurs pour les indicateurs de flexibilité.....	93
Tableau 11. Détails de valeurs pour l'indicateur de flexibilité global	94
Tableau 12. Relations entre les variables z_{ij}' , z_i et x_{ij}	100
Tableau 13. Types de flexibilité et leur niveau d'alternatives technologiques dans l'étude de cas	106
Tableau 14. Cadre de mesure du problème de sélection de la technologie	107
Tableau 15. Flexibilité et valeurs opérationnelles pondérées pour chaque niveau de technologie alternative	109
Tableau 16. Dépenses en capital et nombre d'unités de chaque alternative	110
Tableau 17. Coefficient synergique entre les alternatives $(S_{i'j'}, ij)$	111
Tableau 18. Liste des alternatives pré-requises $P_{ijOR} = (i', j') \mid i' \in I, j' \in J_i$	111
Tableau 19. Liste des alternatives incompatibles $(C_g = \{(i, j) \mid i \in I, j \in J_i\})$ présenté en 27 groupes ..	112
Tableau 20. Capacité de production atteinte en appliquant chaque alternative,.....	113
Tableau 21. Paramètres du problème de planification de la montée en production	113
Tableau 22. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget de 10000 k€ ($\alpha=0,5$).....	114
Tableau 23. La limite inférieure de l'indice d'utilité totale ($\alpha=0,5$).....	114
Tableau 24. La limite supérieure de l'indice d'utilité totale ($\alpha=0,5$).....	114
Tableau 25. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget maximum de 2000 k€ (Solution S1)	116
Tableau 26. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget maximum de 4000 k€ (Solution S2)	116
Tableau 27. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget maximum de 5000 k€ (Solution S3)	116
Tableau 28. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget maximum de 6000 k€ (Solution S4)	117
Tableau 29. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget maximum de 8000 k€ (Solution S5)	117
Tableau 30. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget maximum de 9000 k€ (Solution S6)	117
Tableau 31. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget maximum de 13000 k€ (Solution S7)	118
Tableau 32. La robustesse de la solution S6 en modifiant en importance les poids des types de flexibilité (Budget : 10000 k€)	120
Tableau 33. La robustesse de la solution S4 en modifiant en importance les poids des types de flexibilité (Budget : 6000 k€)	120
Tableau 34. Les solutions optimales (basées sur la fonction objectif $TUI\alpha = 0,5$) et leurs valeurs de Total Flexibility (TF) en tenant compte des différents niveaux de budgets et des coefficients synergiques (ρ)	121

Tableau 35. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget maximum de 5000 k€ et un coefficient synergique $\rho=0,4$ (Solution <i>S8</i>).....	122
Tableau 36. Des solutions efficaces pour la planification de la feuille de route du problème MFLS-SE	123
Tableau 37. Les valeurs optimales pour la planification de la feuille de route du problème MFLS-SE (Solution de Pareto <i>PS1</i>)	124
Tableau 38. Les valeurs optimales pour la planification de la feuille de route du problème MFLS-SE (Solution de Pareto <i>PS2</i>)	125
Tableau 39. Les valeurs optimales pour la planification de la feuille de route du problème MFLS-SE (Solution de Pareto <i>PS3</i>)	126
Tableau 40. Les valeurs optimales pour la planification de la feuille de route du problème MFLS-SE (Pareto de la solution <i>PS4</i>).....	127

Lexique

AEC	Augmented Epsilon Constraint
AGV	véhicules guidés automatisés
ALT	Alternatives technologiques
AMR	robots mobiles autonomes
BLY	Bourbon-Lancy (France)
BPMN	Business Process Model and Notation
BWM	Best / Worst Methodology
CMS	Cellular Manufacturing System
CNC	Computer Numerical Control
CPPS	Cyber Physical Production System
DMS	Dedicated Manufacturing System
DOT	Driving Operation Together
DSS	Decision Support System
F	Dimension de Flexibilité, capacité et agilité
FI	Flexibility Indicator
FMS	Flexible Manufacturing System
FPT	Fiat Powertrain Technologies
FPT-BLY	Usine FPT à Bourbon-Lancy
GFI	Global Flexibility Indicator
I4.0	Industrie 4.0
IA	Intelligence Artificielle
IDEF	Integration Definition for Process Modeling
IoT	Internet Of Thing
MCDM	Multi Criteria Decision Making
MD/ RHS	Membre de droite d'une équation / Right hand Side
MFLS-SE	Manufacturing Flexibility Level Selection - Synergistic Effects
MG/ LHS	Membre de gauche d'une équation / Left hand Side
MINLP	Mixed-Integer Non-Linear Programming
OP	Dimension de la Performance Opérationnelle
PDI	Dimensions de classification Physique, Décisionnelle et d'Impact
POC	Proof Of Concept
PRA	Axes de mesure Portée, Réactivité et Alternative

RMS	Reconfigurable Manufacturing System
TIC	Technologies de l'Information et de la Communication
TUI	Total Utility Index
TVP	Total Violation Penalty
WCM	World Class Manufacturing
XC13	Nouveau moteur de FPT de la famille Cursor X

Partie 1 : Introduction, Problématiques, état de l'art

Dans le premier chapitre, le contexte global de cette thèse est exposé. Le sujet de la thèse, les objectifs de recherche, les questions et la motivation sont présentés. En qualité de responsable de la transformation digital à FPT-BLY, cette thèse est réalisée dans le cadre d'une collaboration industrielle entre le laboratoire LIRIS et la société Fiat Powertrain Technologies (FPT). Les activités de recherche sont planifiées et réalisées en fonction des exigences industrielles. Les problématiques globales liées à l'évolution rapide de l'industrie, la nécessité de reconfiguration et la capacité d'évolution sont abordées, conduisant à la notion de flexibilité.

Le groupe FPT Industrial et l'usine FPT à Bourbon-Lancy sont présentés dans le deuxième chapitre. Les complexités et spécificités de l'usine de Bourbon-Lancy sont décrites, ainsi que le contexte et les défis auxquels elle est confrontée. L'incertitude dans le système de production est discutée, en tenant compte des fournisseurs et des clients, ainsi que la variation des demandes des clients. L'introduction du nouveau moteur et le rôle de la flexibilité dans la stratégie de l'entreprise sont également abordés. L'intérêt de cette thèse pour l'usine de Bourbon-Lancy est enfin souligné.

Dans le troisième chapitre, un examen de la littérature sur l'état de l'art en matière de flexibilité, d'approches et de méthodes est réalisé. La méthodologie de recherche documentaire utilisée, y compris la bibliométrie, est décrite. L'industrie 4.0 et les systèmes cyber-physiques sont discutés. La flexibilité, la robustesse, la résilience et l'agilité sont définies, et les différents types de flexibilité sont présentés. Ces types de flexibilité sont classifiés et les méthodes de mesure de la flexibilité sont discutées. L'aide à la décision en termes de niveau de flexibilité, notamment la gestion de projet et l'allocation des ressources, est également abordée. Chaque section se termine par une conclusion sur l'état de l'art, identifiant les manques.

1 Chapitre 1 : Introduction

Dans le contexte du marché mondial actuel, hautement compétitif, les entreprises manufacturières sont confrontées à la nécessité de diversifier leur offre produit tout en personnalisant leurs productions pour capturer une part de marché maximale. Face à ces défis, la flexibilité, l'efficacité et la proactivité des systèmes de production sont devenues des atouts clés. La dernière décennie a vu l'émergence de concepts tels que l'Usine du futur, l'Industrie 4.0, les Systèmes de Production Cyber-Physiques (CPPS) et l'Usine Intelligente(Liao et al., 2017)(Zhong et al., 2017), qui visent à accroître l'efficacité et l'intégration des systèmes de production en utilisant les informations et les données en temps réel pour optimiser l'exploitation des systèmes de production. Grâce aux progrès dans le domaine des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC), ces systèmes avancés offrent un accès à une quantité massive d'informations et de données en temps réel, issues de divers maillons de la chaîne de valeur, comme les machines et équipements de production. Ces données, obtenues principalement à travers des technologies telles que l'Internet des Objets (IoT) et le Big Data, facilitent la création de valeur ajoutée dans l'organisation des systèmes de production. Ainsi, des techniques supplémentaires telles que l'optimisation mathématique sont nécessaires pour développer des modèles proactifs de prise de décision ou des Systèmes d'Aide à la Décision (DSS). Ces modèles visent à améliorer l'efficacité des décisions par rapport aux méthodes traditionnelles. Dans un environnement où les marchés sont globaux et les attentes des clients évoluent rapidement, les systèmes de production doivent non seulement répondre à des besoins immédiats mais aussi anticiper les futures exigences. L'industrie a connu plusieurs transformations majeures depuis la révolution industrielle, évoluant continuellement pour s'adapter aux nouvelles réalités économiques, sociales et technologiques. Aujourd'hui, les entreprises doivent être capables de produire en masse des produits personnalisés, adaptés aux besoins spécifiques de chaque client, tout en minimisant les coûts, les délais et les stocks. Cela nécessite une capacité à ajuster rapidement la production en réponse aux fluctuations de la demande et aux perturbations de la chaîne d'approvisionnement. Pour cela, il est essentiel de pouvoir reconfigurer les systèmes de production et les réseaux logistiques. Ce principe d'auto-ajustement et d'auto-configuration est au cœur des systèmes de l'Industrie 4.0, permettant une adaptation agile et efficace aux défis contemporains.

En tant que responsable de la transformation digitale de de l'usine Fiat Powertrain Technologies de Bourbon-Lancy (FPT-BLY), ma mission est d'intégrer des méthodologies et technologies avancées pour répondre aux exigences de compétitivité de mon entreprise et la guider à travers les défis de l'Industrie 4.0. En recherchant des méthodes formelles pour cette transformation, j'ai réalisé un benchmark et un état de l'art des pratiques existantes. Cependant, j'ai constaté un manque de travaux spécifiques adaptés à notre environnement industriel, souvent trop complexe pour une utilisation industrielle quotidienne. Cette lacune m'a conduit à envisager une thèse pour approfondir mes recherches et développer des méthodes et outils pertinents. Mon expérience professionnelle combinée à cette recherche académique vise à concevoir des méthodologies concrètes et applicables, essentielles pour renforcer notre flexibilité et notre compétitivité.

Cette thèse vise à explorer en profondeur la flexibilité des systèmes de production, en analysant ses différents aspects, ses enjeux et ses impacts, et en proposant des méthodes et des outils pour l'évaluer et l'améliorer. Elle s'appuie sur une revue approfondie de la littérature scientifique et des études de cas concrets dans différents secteurs industriels. Ce travail est ancré dans une réalité industrielle concrète, celle de l'usine FPT-BLY, où les concepts et méthodes développés sont appliqués à des cas réels, notamment l'intégration d'un nouveau moteur poids lourd sur les lignes de production existantes. Cette démarche permet non seulement de tester l'efficacité des solutions proposées mais aussi de contribuer à la transformation de l'usine vers un système de production plus flexible et adaptée aux exigences de l'Industrie 4.0.

1.1 Objectifs et questions de recherche

Comme mentionné, l'avènement de l'Industrie 4.0 a introduit une ère de transformation sans précédent dans les systèmes de production industriels, soulignant la nécessité impérieuse d'adopter des stratégies de production flexibles. Cette recherche se concentre sur l'exploration approfondie de la flexibilité dans les systèmes de production, en s'appuyant sur une approche méthodologique rigoureuse. Les objectifs et questions spécifiques de cette recherche sont articulés comme suit :

Objectif 1 (O1) : Définition des types de flexibilité. Cet objectif vise à établir une taxonomie claire et détaillée des différents types de flexibilité présents dans les systèmes de production industriels. Cette définition servira de fondement à l'ensemble de la recherche, en identifiant et en distinguant les variétés de flexibilité qui peuvent être exploitées pour améliorer la réactivité et l'adaptabilité des systèmes manufacturiers.

Question 1 : Quels sont les différents types de flexibilité qui caractérisent les systèmes de production modernes et comment peuvent-ils être définis de manière plus complète ?

Objectif 2 (O2) : Classification des types de flexibilité pour encadrer le périmètre décisionnel et physique. En s'appuyant sur la taxonomie établie, cet objectif ambitionne de classer les types de flexibilité en fonction de leur importance stratégique et de leur applicabilité dans le niveau physique d'un système. Cette classification vise à encadrer le périmètre des types de flexibilité sous deux dimensions cruciales : le volet décisionnel, qui oriente les choix stratégiques et tactiques des entreprises, et le volet physique, qui concerne l'application concrète et la mise en œuvre de la flexibilité dans l'environnement de production. En établissant des catégories claires et opérationnelles, cette démarche permet d'identifier de manière précise les leviers de flexibilité à activer pour répondre efficacement aux défis de production et d'adaptation aux changements, tout en assurant une allocation optimale des ressources et une mise en œuvre ciblée des actions d'amélioration.

Question 2 : Comment peut-on classer efficacement les types de flexibilité pour mieux encadrer les décisions stratégiques et physiques dans un système de production ?

Objectif 3 (O3) : Mesure le niveau flexibilité. Cet objectif se concentre sur le développement d'indicateurs de performance et de méthodes de mesure pour évaluer quantitativement le niveau de flexibilité de ses différents types de flexibilité. Cette étape est cruciale pour permettre aux entreprises de diagnostiquer l'état actuel de leur flexibilité et d'identifier les domaines nécessitant une amélioration.

Question 3 : Quelles méthodologies peuvent être employées pour mesurer de manière précise et fiable les différents types de flexibilité au sein des systèmes de production ?

Objectif 4 (O4) : Détermination du niveau approprié de flexibilité. À travers une analyse approfondie, cet objectif cherche à déterminer le niveau optimal de flexibilité pour différents scénarios de production et types d'industries. En tenant compte des contraintes opérationnelles et économiques, cette recherche vise à proposer un modèle décisionnel pour guider les entreprises dans l'ajustement de leur niveau de flexibilité. Cette méthodologie prendra en compte les synergies et les interdépendances entre les flexibilités.

Question 4 : Comment déterminer le niveau approprié de flexibilité pour un système de production donné, en fonction de ses spécificités et des incertitudes auxquelles il est confronté, en prenant en compte les synergies et interdépendances ?

Objectif 5 (O5) : Définition de la feuille de route pour atteindre le niveau de flexibilité nécessaire. Enfin, cet objectif ambitionne de développer une feuille de route stratégique pour les entreprises, leur permettant de planifier et d'implémenter les actions nécessaires à l'atteinte du niveau de flexibilité

identifié comme optimal. Cette feuille de route comprendra des recommandations pratiques, des étapes clés et des indicateurs de suivi pour guider les entreprises dans leur démarche d'amélioration continue de la flexibilité.

Question 5 : Quelle feuille de route les entreprises peuvent-elles suivre pour atteindre le niveau de flexibilité, identifié comme nécessaire, tout en assurant une mise en œuvre efficace et mesurable de leurs stratégies de flexibilité ?

Ainsi, à travers la réalisation de ces objectifs, cette recherche aspire à fournir un cadre méthodologique et pratique pour l'exploitation stratégique de la flexibilité dans les systèmes de production, offrant aux entreprises les outils nécessaires pour naviguer avec succès dans un environnement industriel en constante évolution.

1.2 Motivation

La motivation derrière cette recherche provient d'une observation critique des tendances actuelles et des défis auxquels l'industrie moderne est confrontée. Dans un environnement de production de plus en plus volatil et incertain, marqué par des avancées technologiques rapides et des changements continus dans les demandes des consommateurs, la capacité des entreprises à rester compétitives dépend fortement de leur agilité et de leur flexibilité. Cette réalité est particulièrement prononcée dans le secteur de l'automobile, où les innovations technologiques, les préférences des consommateurs et les normes réglementaires évoluent à un rythme sans précédent.

La transition vers l'Industrie 4.0, avec l'intégration de systèmes cyber-physiques, l'Internet des objets (IoT), et l'intelligence artificielle (IA), offre des opportunités sans précédent pour améliorer la flexibilité de production. Cependant, elle soulève également des questions complexes sur la manière de mesurer, d'analyser et d'optimiser cette flexibilité pour tirer pleinement parti des technologies disponibles. La nécessité de développer des cadres théoriques et pratiques qui peuvent guider les entreprises dans cette transition est donc devenue pressante. Cette recherche est également motivée par l'absence relative de modèles de décision complets et intégrés qui prennent en compte les multiples dimensions de la flexibilité dans un contexte industriel. Bien que la littérature existante aborde divers aspects de la flexibilité, il existe un besoin critique de travaux de recherche qui synthétisent ces aspects dans un cadre unifié, permettant une compréhension holistique et une application pratique dans les industries. De plus, le défi de quantifier la flexibilité et d'établir des liens directs entre les niveaux de flexibilité et la performance opérationnelle reste largement non résolu, soulignant la nécessité d'approches innovantes dans ce domaine.

Enfin, cette recherche est motivée par l'objectif d'apporter une contribution significative tant à la théorie qu'à la pratique. D'un point de vue théorique, elle vise à enrichir le corpus de connaissances sur la flexibilité de production dans le cadre de l'Industrie 4.0, en proposant des modèles et des classifications novateurs. D'un point de vue pratique, l'ambition est de fournir aux managers et décideurs industriels des outils et des méthodologies concrets pour évaluer, planifier et améliorer la flexibilité de leurs systèmes de production, favorisant ainsi l'innovation et la compétitivité dans un paysage industriel en évolution rapide.

En tant que responsable de la transformation digitale à l'usine FPT de Bourbon-Lancy, je suis directement impliqué dans l'amélioration des processus de production et l'intégration des technologies de l'Industrie 4.0. Mon travail consiste à introduire des innovations technologiques pour augmenter la flexibilité et l'efficacité de nos systèmes de production. Observer les défis opérationnels quotidiens a révélé l'importance cruciale de développer des méthodologies robustes pour mesurer et optimiser cette

flexibilité. Mon objectif est de fournir des outils concrets et pratiques qui aideront FPT-BLY à rester compétitive et à naviguer avec succès dans un paysage industriel en constante évolution.

1.3 Structure de thèse

La structure de ce manuscrit de thèse est conçue pour présenter une exploration approfondie de la flexibilité des systèmes de production dans le contexte de l'Industrie 4.0, en intégrant des contributions significatives à la fois théoriques et pratiques. Le manuscrit est organisé en trois parties principales, chacune comprenant plusieurs chapitres.

La première partie, qui comprend les chapitres 1, 2 et 3, est consacrée à l'introduction, aux problématiques et à l'état de l'art. Le chapitre 2 détaille le contexte industriel de FPT Industrial et de l'usine FPT-BLY, en présentant les complexités et spécificités de l'usine, l'évolution historique, les équipements de production et les défis auxquels elle fait face, tels que la modernisation des équipements de production, la gestion de la diversité des moteurs produits et l'intégration du nouveau moteur XC13. L'intérêt de cette thèse pour l'usine est souligné, en proposant des solutions concrètes pour améliorer la réactivité et l'efficacité de la production. Le chapitre 3 offre une revue exhaustive de la littérature sur la flexibilité des systèmes de production, les systèmes manufacturiers reconfigurables et l'Industrie 4.0. En utilisant des analyses bibliométriques et des visualisations VOSviewer, les tendances et les lacunes dans la recherche sont identifiées. Les concepts de flexibilité, robustesse, résilience et agilité sont définis et comparés (O1), et une classification détaillée des types de flexibilité est proposée (O2). Les méthodologies de mesure de la flexibilité sont également discutées, en soulignant l'impact de l'Industrie 4.0 sur la transformation des pratiques de production (O3).

La deuxième partie, qui inclut les chapitres 4 et 5, se concentre sur la méthodologie et les résultats. Le chapitre 4 développe un cadre méthodologique pour caractériser (O1) et mesurer la flexibilité dans les systèmes de production (O3). Les types de flexibilité sont identifiés (O1) et une classification en trois dimensions (physique, décisionnelle et d'impact) est proposée (O2). Les axes de mesure de la flexibilité sont définis (O3), et une cartographie de la flexibilité est développée pour visualiser les différentes facettes de la flexibilité et identifier les leviers potentiels pour son amélioration (O3). Une méthode de mesure utilisant des indicateurs de performance clés (KPIs) est introduite pour évaluer précisément la flexibilité des systèmes de production (O3). Le chapitre 5 présente deux modèles d'optimisation mathématique pour évaluer et planifier la flexibilité des systèmes de production (O5). Le premier modèle se concentre sur la performance en flexibilité (O3, O4), tandis que le second vise la planification stratégique des investissements (O5). L'application de ces modèles est illustrée avec des exemples concrets, démontrant comment les entreprises peuvent utiliser ces outils pour optimiser leur flexibilité de production et prendre des décisions éclairées sur les investissements technologiques (O3, O4, O5). Chaque méthodologie est appliquée à des cas réels de FPT-BLY afin d'étudier l'applicabilité et les perspectives. Ces cas d'usage sont facilités par ma position de responsable de la transformation digital chez FPT-BLY (O3, O4, O5).

Enfin, le manuscrit se termine par une conclusion générale et des perspectives de recherche. Ce dernier chapitre synthétise les principales conclusions de la thèse et propose des perspectives pour les recherches futures, en mettant en lumière les contributions théoriques et pratiques de l'étude.

2 Chapitre 2 : Entreprise et challenges

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'entreprise FPT Industrial, avec un focus particulier sur FPT-BLY. En tant que marque du groupe Iveco, lui-même faisant partie du groupe FIAT, FPT Industrial se spécialise dans la conception, la production et la commercialisation de moteurs pour divers types de véhicules et d'applications industrielles. Cette présentation inclura une vue d'ensemble des activités de recherche et développement, de la gamme de produits, ainsi que de l'organisation des usines et des centres de R&D répartis dans le monde entier.

Plus précisément, nous mettrons en lumière les particularités de l'usine de Bourbon-Lancy, ses capacités de production, et les défis spécifiques qu'elle rencontre. En tant que responsable de la transformation digitale au sein de cette usine, j'ai pour mission de guider et d'implémenter des technologies avancées pour améliorer l'efficacité des systèmes de production.

Cette analyse détaillée de l'entreprise et de l'usine sert de contexte aux défis qui ont motivé cette recherche sur la flexibilité et l'industrie 4.0.

2.1 Présentation du groupe FPT Industrial

FPT Industrial est une marque du groupe Iveco, qui fait partie du groupe FIAT. Elle se spécialise dans la conception, la production et la commercialisation de moteurs pour véhicules routiers et hors route, ainsi que pour des applications marines et des générateurs. Tous les types de moteurs et leurs applications sont illustrés dans la Figure 1. Avec une large gamme de produits (six grandes familles de moteurs et plus de 2000 références de moteurs), ainsi qu'un grand nombre d'activités de recherche et développement, FPT Industrial se positionne comme l'un des principaux acteurs industriels mondiaux dans le secteur des transmissions industrielles. Les usines de FPT Industrial sont réparties dans 8 pays à travers le monde, comprenant 10 sites de production et 6 centres de R&D. FPT propose une large gamme de produits : sept familles de moteurs avec une puissance allant de 240 à 1000 CV et des transmissions avec un couple maximal de 200 à 500 Nm. En 2017, 607 000 moteurs ont été produits dans 10 usines à travers le monde, générant un chiffre d'affaires de 4,4 milliards de dollars.

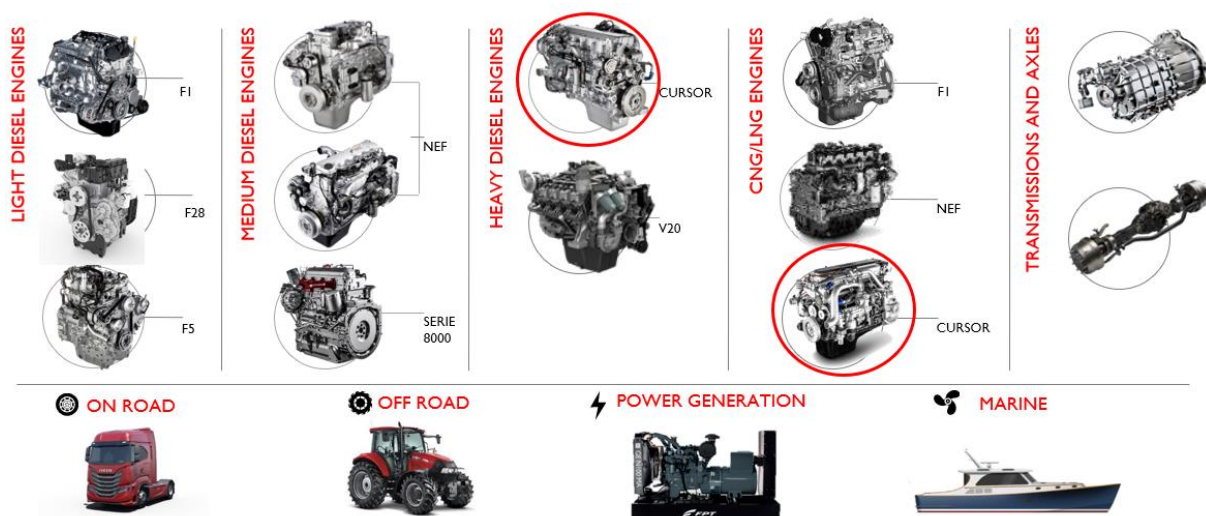


Figure 1. Moteurs et générateurs d'énergie fabriqués par FPT Industrial

2.2 Présentation de l'usine FPT à Bourbon-Lancy

L'usine FPT Bourbon-Lancy (abrégée FPT-BLY), faisant partie de Fiat Powertrain Technologies France (FPTF), est le seul site FPT qui fabrique tous les moteurs de la gamme Cursor (voir Figure 1, encerclée en rouge). FPT-BLY a une capacité d'environ 50 000 unités par an avec plus de 5700 variantes. FPT-BLY produit les 6 grandes familles de moteurs CURSOR comme suit :

- CURSOR 8 : 6 cylindres de 7,80 litres - puissance de 240 à 360 ch
- CURSOR 9 : 6 cylindres de 8,70 litres - puissance de 290 à 400 ch
- CURSOR 10 : 6 cylindres de 10,3 litres - puissance de 390 à 430 ch
- CURSOR 11 : 6 cylindres de 11,1 litres - puissance de 420 à 480 ch
- CURSOR 13 : 6 cylindres de 12,9 litres - puissance de 460 à 680 ch
- CURSOR 16 : 6 cylindres de 12,9 litres - puissance de 480 à 1000 ch

L'usine couvre une superficie de 21 hectares, dont 11 sont couverts. Elle emploie près de 1300 employés, dont 80 % sont des opérateurs, 17 % des techniciens et 3 % des cadres supérieurs. Elle collabore avec plus de 260 fournisseurs, dont 96 % sont européens, et fournit plus de 4800 références différentes.

FPT-Bly est composée de trois bâtiments principaux : A1, B1 et C, comme illustré dans la Figure 2. Le bâtiment A1 est dédié à l'usinage de la fonte pour le bloc moteur et la culasse. Le bâtiment B est consacré à l'usinage de la bielle en acier, de l'arbre à cames et du vilebrequin, ainsi qu'à la ligne d'assemblage des moteurs Cursor 8 et 9. Les lignes d'assemblage des moteurs Cursors (C10, C11, C13 et C16), la peinture et les bancs de test se trouvent dans le bâtiment C.

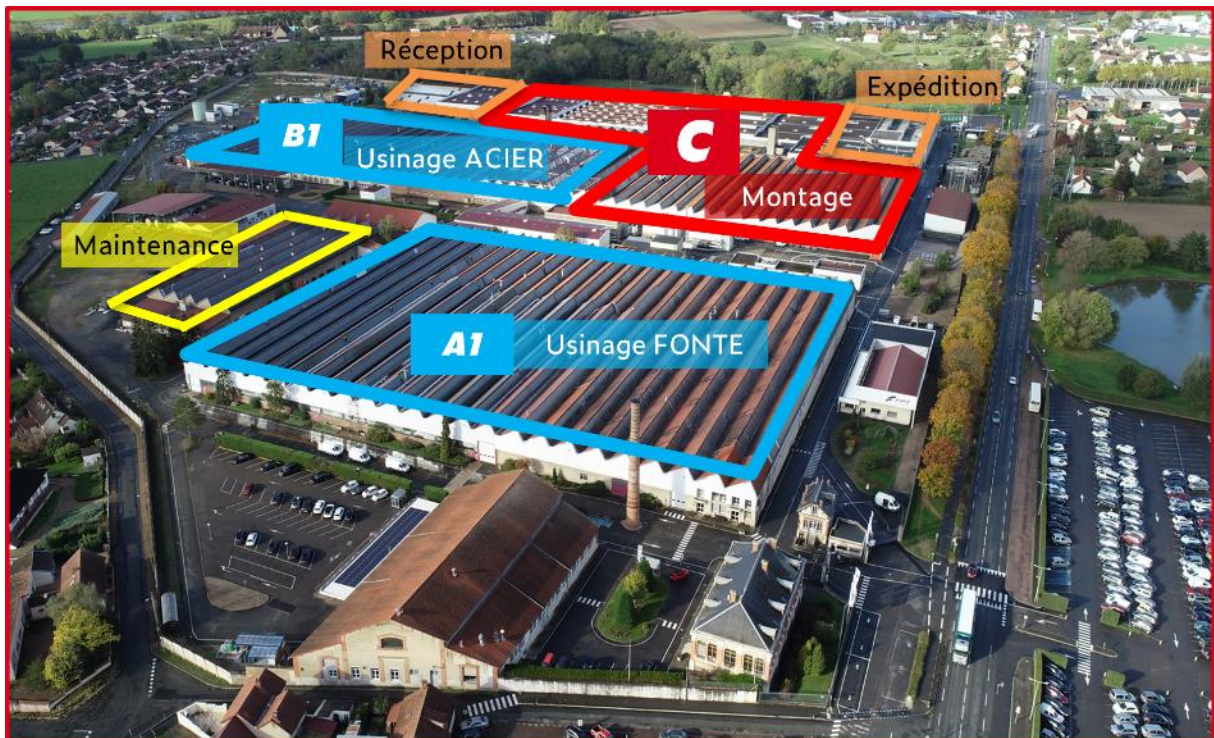


Figure 2. Plan usine FPT-BLY

Les principaux clients des moteurs FPT-BLY sont les filiales d'Iveco et de CNH telles que New Holland, Case, Steyr, Heuliez Bus, Magirus, et CLAAS Tractor, etc. qui sont distribuées principalement en Europe, en Amérique du Nord et en Amérique du Sud.

Le site a trois activités principales résumées en quelques informations clés. Il s'agit de i) l'usinage de la fonte, Figure 4, ii) des lignes d'usinage de l'acier, Figure 5 et iii) des lignes d'assemblage, Figure 6. Dans la ligne d'usinage, les principaux composants du moteur sont le bloc moteur, la culasse, le vilebrequin, l'arbre à cames et la bielle. Elle est illustrée à la Figure 3. Les autres composants sont fournis et assemblés dans les lignes d'assemblage.



Figure 3. Composants principaux usinés chez FPT industrial

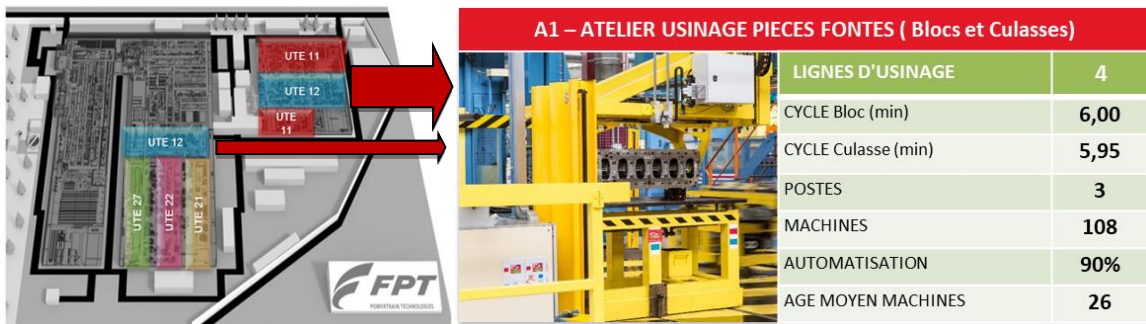


Figure 4. Usinage fonte

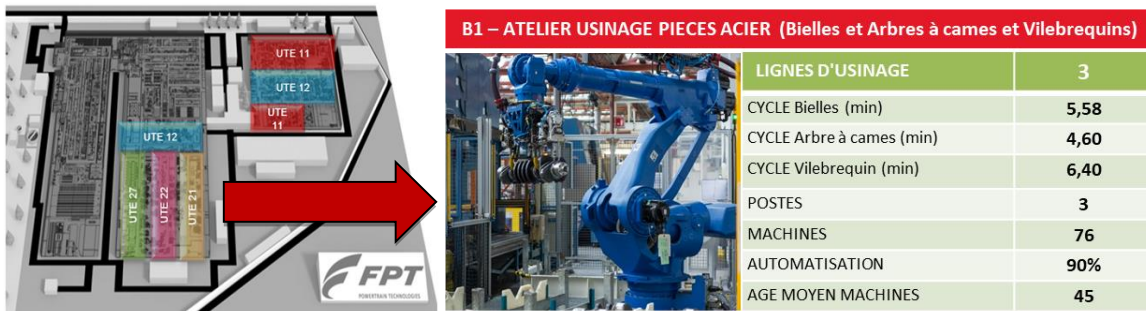


Figure 5. Usinage acier



Figure 6. Assemblage

2.3 Complexités et spécificités de l'usine de Bourbon-Lancy

L'usine de Bourbon-Lancy, appartenant à Fiat Powertrain Technologies (FPT), illustre parfaitement la complexité des systèmes de production industriels modernes. Elle est caractérisée par une diversité impressionnante de moteurs produits, six modèles, allant du CURSOR 8 au CURSOR 16, chacun nécessitant une précision de fabrication et une adaptabilité exceptionnelle. Avec une capacité annuelle d'environ 50 000 unités et plus de 6700 variantes, l'usine doit gérer une gamme étendue de configurations de production pour répondre aux demandes spécifiques de chaque client. De plus, l'introduction d'un nouveau moteur, le XC13, augmente le nombre de variante en atteignant, pour l'ensemble de la gamme Cursor plus de 7000 variantes sans compter les futurs moteurs de la famille Cursor X, voir Figure 7.

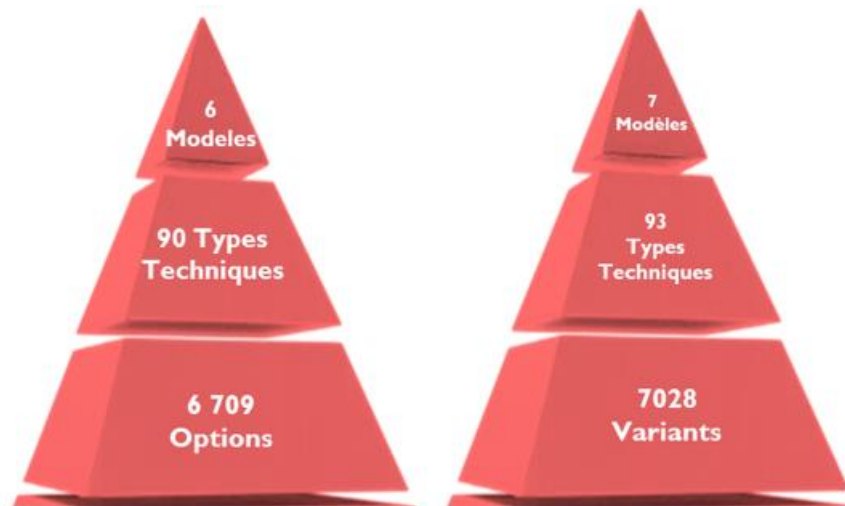


Figure 7. Pyramide des variantes moteurs (Avec XC13 à droite)

La gestion des commandes ajoute une couche supplémentaire de complexité. Les clients de l'usine, principalement des filiales d'Iveco, modifient fréquemment leurs commandes, parfois jusqu'au jour de la production. Cette incertitude requiert de l'usine une flexibilité opérationnelle et une capacité de réaction rapides pour reconfigurer les lignes de production en conséquence, tout en maintenant des niveaux élevés de qualité et d'efficacité. L'enjeu de la diversité des fournisseurs complique également la chaîne d'approvisionnement. Comme illustré dans la Figure 8, l'entreprise collabore avec plus de 260 fournisseurs pour fournir les 4800 références différentes nécessaires à la production, l'usine doit

orchestrer un ballet logistique complexe pour s'assurer que les bonnes pièces sont disponibles au bon moment. Cette interdépendance souligne l'importance cruciale d'une chaîne d'approvisionnement agile et résiliente.

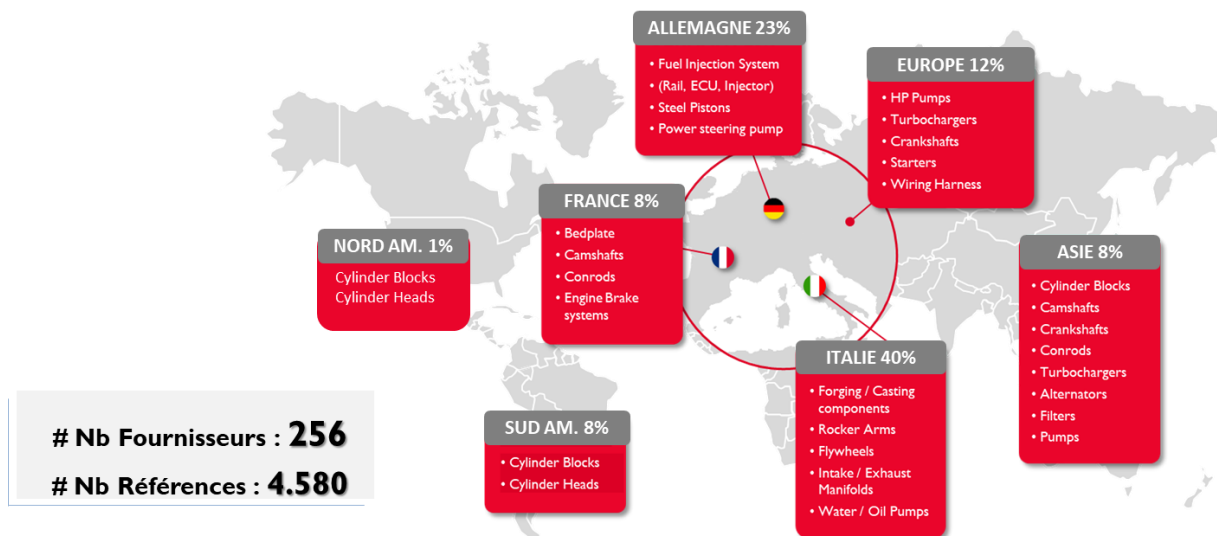


Figure 8. Répartition fournisseur FPT-BLY

Enfin, la complexité ne se limite pas à la gestion des variantes et des volumes de production. L'introduction de nouveaux moteurs, comme le projet ambitieux vers le moteur XC13, met en lumière la nécessité d'une innovation continue. Chaque nouveau moteur demande non seulement une reconfiguration des lignes de production mais aussi une mise à jour des compétences et des connaissances des employés. Cette dynamique perpétuelle d'apprentissage et d'adaptation est essentielle pour que l'usine reste à la pointe de la technologie dans un secteur en évolution rapide.

Chacune de ces dimensions de complexité - la variété des produits, l'incertitude des commandes, la gestion des fournisseurs, et l'innovation continue - exige une approche holistique et intégrée de la gestion de la production. L'usine de Bourbon-Lancy, à travers ses efforts pour naviguer dans ces eaux complexes, démontre l'importance d'une stratégie de production flexible et reconfigurable, capable de répondre aux exigences fluctuantes du marché tout en exploitant les opportunités d'innovation.

2.4 Histoire et évolution de l'usine FPT-BLY

La Figure 9 résume l'histoire de l'usine FPT-BLY. À la fin de la première révolution industrielle en 1874, la petite entreprise initialement appelée "Emile Puzenat & Fils" a mis en place une usine pour fabriquer du matériel agricole. "Puzenat" est devenu le plus grand fabricant français de matériel agricole en 1935. Vingt ans plus tard, Puzenat a été repris par SIMCA (Société Industrielle de Mécanique et Carrosserie Automobile) et a commencé la rénovation de son équipement pour fabriquer le moteur des modèles SIMCA ARONDE et VERSAILLES. Au début de la troisième révolution industrielle, en 1962, l'usine est devenue un fabricant de tracteurs nommé SOMECA (Société de Mécanique de la Seine). Plus tard, cette entreprise a fait une coentreprise avec Fiat. Dix ans plus tard et en 1972, l'usine Fiat-Someca à Bourbon-Lancy a commencé à fabriquer des moteurs lourds pour les camions UNIC. Au début de 1975, la création d'IVECO (Industrial Vehicles Corporation) a achevé la fusion des marques FIAT VI, OM, LANCIA VI, UNIC et MAGIRUS-DEUT. En 1998, l'usine a renouvelé le processus et le système de production pour la gamme de moteurs Cursor. Le groupe industriel FPT a été créé en 2005 et l'usine

a pris le nom de FPT-BLY. À la suite de la scission entre les activités automobiles et industrielles du groupe Fiat en 2013, FPT a été rattaché au groupe CNH Industrial, la branche industrielle du groupe parent FIAT qui est aujourd’hui un leader mondial dans le secteur des biens d’équipement. Récemment, en 2022, lors de la scission de l’entreprise, le groupe industriel FPT est désormais rattaché au groupe IVECO.

De nouvelles versions des moteurs Cursor ont été développées en 2014, et actuellement, un projet ambitieux vers un tout nouveau moteur le XC13 est en cours.

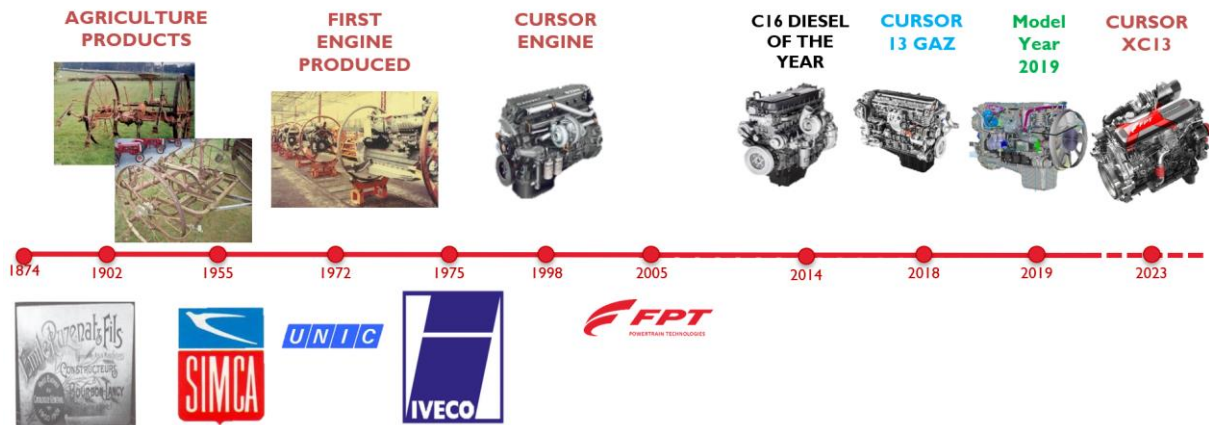


Figure 9. Histoire et évolution de l’usine FPT-BLY

L’entreprise s’est engagée à mettre en œuvre un système de fabrication allégé et une excellence d’entreprise, en particulier la méthodologie World Class Manufacturing (WCM) a été suivie. WCM est une méthodologie internationale pour le processus de fabrication adoptée par les entreprises les plus importantes du monde. Entre 2008 et 2010, l’entreprise a atteint les niveaux bronze et argent de la norme WCM grâce à plusieurs projets d’amélioration continue et audits. Au cours de ce parcours, elle a obtenu le prix d’excellence AME américain en 2018. En continuant, l’entreprise a adopté la transformation numérique et l’approche de l’industrie 4.0 qui sera détaillée plus loin. Sur la base de l’avancement de ses activités, elle a été reconnue au niveau national en France comme “Vitrine Industrie du Futur” et “Territoires d’Industrie” qui indiquent les entreprises qui sont engagées dans l’industrie du futur. En 2020, FPT-BLY a été fondée en tant que championne numérique de l’ensemble du groupe industriel CNH. En 2021, après d’importantes transformations et améliorations, l’entreprise a atteint le niveau or de la méthodologie lean WCM, ce qui en fait la 7ème entreprise sur 207 dans le monde à obtenir cette récompense. Pour évaluer et prouver les compétences numériques de l’entreprise, le concours “GoldenTech” a été remporté par notre équipe en 2022. Ce concours était dans la catégorie “Data Automation Manager” et a été organisé dans le cadre de la “Globale Industrie”, la plus grande exposition industrielle de France. Toutes ces activités ont également été validées par l’audit AGAMUS en 2022, spécialisé dans l’audit de l’excellence opérationnelle numérique dans l’industrie automobile. En 2023, suite au changement de la méthodologie lean suivi, le WCM, par une autre méthodologie développée par le groupe, le DOT (Driving Operation Together), un premier audit, conjointement avec AGAMUS, a été validé.

Les résultats de tous ces projets ont apporté les récompenses ci-dessus pour FPT-BLY qui sont présentées à la Figure 10.



Figure 10. Récompenses obtenues par l'usine FPT-BLY

2.5 Parc machines de production – équipements

La société détient 1723 actifs de machines, qui se déclinent en 28 types fournis par 261 constructeurs. L'âge moyen de tous les actifs est d'environ 42 ans. Ces actifs sont catégorisés comme suit :

- Bâtiment → 69 machines
- Installations → 85 machines
- Manutention → 870 outils
- Tournevis → 201 outils
- Contrôle qualité → 131 équipements
- Actifs d'outils d'usinage → 99 équipements
- Production → 270 machines

Le principal périmètre de la maintenance professionnelle chez FPT-BLY est constitué par les 270 machines de production. 109 d'entre elles appartiennent à la ligne d'usinage en fonte de fer, 76 à la ligne d'usinage de l'acier, et le reste à la ligne d'assemblage. Parmi elles, les équipements de production les plus importants en termes de maintenance sont le bloc moteur et la culasse ainsi que les lignes d'usinage de l'acier, comprenant la plupart des machines à commande numérique (CNC), des robots, des machines à laver, etc. Cependant, il existe également des équipements clés dans les lignes d'assemblage qui peuvent avoir un impact significatif sur les arrêts de la ligne d'assemblage, tels que les chaînes de convoyeurs. En termes de coûts de maintenance, une partie considérable des coûts est générée par ces lignes. Les machines CNC sont utilisées pour plusieurs types d'activités d'usinage, et ces machines tombent plus souvent en panne, ce qui affecte la disponibilité des lignes de production et la qualité des produits.

2.6 Contexte et défis

2.6.1 Le contexte de FPT-BLY

L'usine FPT-BLY évolue dans un contexte opérationnel complexe, façonné par des forces géopolitiques en mutation, des variations substantielles de la demande client et l'impératif pressant de moderniser sa gamme de produits. Sur le plan géopolitique, les récentes évolutions dans les relations commerciales mondiales ont suscité des ajustements complexes dans l'approvisionnement en matières

premières, ajoutant une couche de complexité à la gestion quotidienne de l'usine FPT. Les coûts de production sont ainsi soumis à des pressions fluctuantes, tandis que la stabilité des chaînes d'approvisionnement devient un enjeu crucial pour maintenir la performance opérationnelle. De plus, la volatilité de la demande client constitue un autre facteur majeur du contexte actuel. Les changements économiques rapides, les progrès technologiques fulgurants et les préoccupations environnementales croissantes ont engendré des changements constants dans les préférences des clients. Cette dynamique exige une agilité opérationnelle et une capacité d'adaptation continue de la part de l'usine FPT pour rester en phase avec les attentes du marché et les normes en constante évolution. L'usine doit également faire face à des obstacles internes. Son système de production, vieillissant voire obsolète, devient un point de préoccupation majeur. Les technologies obsolètes peuvent entraver l'efficacité opérationnelle, la flexibilité et la capacité d'innovation. Les méthodes de prise de décision au sein de l'usine sont également scrutées, se penchant largement vers le côté économique à court terme. Cette focalisation peut potentiellement entraver la capacité de l'usine à investir dans des mises à niveau technologiques et des processus plus durables, créant ainsi une tension entre la nécessité de modernisation et les impératifs financiers immédiats. Dans le contexte de l'industrie 4.0, l'usine FPT de Bourbon-Lancy a entrepris sa transformation digitale avec détermination. En réponse aux évolutions technologiques et aux impératifs de compétitivité, l'usine a mis en œuvre diverses initiatives visant à moderniser ses opérations et à tirer parti des avantages offerts par les technologies numériques. Sous l'égide d'une stratégie établie localement, l'usine a lancé plusieurs projets de preuve de concept (POC), notamment le déploiement d'une plateforme IIoT (Industrial Internet of Things) permettant de surveiller en temps réel le statut des équipements de production. En parallèle, des projets de traitement des données ont été initiés pour exploiter efficacement les vastes quantités de données générées par les processus de fabrication. Il convient de noter que ces efforts ont été entrepris indépendamment, dans l'attente d'une stratégie globale définie par le groupe, illustrant ainsi l'engagement de l'usine à rester à la pointe de l'innovation technologique malgré l'absence d'une direction globale clairement définie.

2.6.2 Les défis de FPT-BLY

Au vu du contexte opérationnel complexe qui caractérise l'environnement actuel, FPT-BLY se trouve confrontée à une série de défis cruciaux. Parmi ces défis, la modernisation du système de production, la prise de décision équilibrée entre les aspects économiques à court terme et les investissements nécessaires à long terme, ainsi que l'intégration réussie du moteur XC13 et les prochains moteurs de cette nouvelle famille, émergent comme des impératifs stratégiques. Pour relever ces défis de manière efficace, l'adoption d'une méthode organisée et définie, capable de s'adapter aux changements prévus et imprévus, apparaît comme une nécessité incontournable. La modernisation du système de production, avec la nécessité de faire face à des équipements vieillissants voire obsolètes, représente l'un des défis majeurs auxquels FPT-BLY doit faire face. Pour y répondre, l'élaboration d'une méthodologie systématique pour évaluer les besoins de modernisation, identifier les technologies obsolètes et élaborer un plan d'action clair devient impérative. Cette approche structurée permettrait de cibler efficacement les domaines nécessitant des améliorations, tout en étant suffisamment flexible pour s'adapter aux évolutions du marché et aux changements technologiques prévus et imprévus. Parallèlement, la prise de décision axée sur le côté économique à court terme exige une réévaluation stratégique. Une méthode de gouvernance éclairée, favorisant une vision stratégique à long terme tout en prenant en compte les impératifs financiers immédiats, devrait être instaurée. Une méthodologie de sélection des projets basée sur des critères clairs et alignée sur les objectifs stratégiques permettrait de concilier les besoins de rentabilité immédiate et les investissements nécessaires pour assurer la durabilité à long terme, tout en restant adaptable aux fluctuations du marché.

2.6.3 L'intérêt de la thèse pour FPT-BLY

L'adaptation continue aux évolutions technologiques et aux demandes fluctuantes du marché est au cœur des défis auxquels fait face l'usine FPT de Bourbon-Lancy. Dans ce contexte, l'intégration de systèmes de production flexibles et reconfigurables, telle qu'explorée dans cette thèse, devient une pierre angulaire pour l'avenir de l'usine. La recherche menée offre des perspectives et des solutions concrètes pour surmonter les complexités inhérentes à l'industrie manufacturière contemporaine, marquée par une demande de personnalisation accrue et une nécessité d'efficacité optimale.

L'un des apports majeurs de cette thèse pour l'usine FPT-BLY réside dans son approche novatrice de la flexibilité de production. En identifiant précisément les types de flexibilité et en proposant des méthodologies pour leur mesure et leur optimisation, la recherche fournit des outils décisionnels essentiels pour améliorer la réactivité et l'adaptabilité de l'usine face aux demandes changeantes. Ces outils permettront à l'usine de mieux planifier ses capacités de production, d'optimiser l'utilisation de ses ressources et de réduire les délais de mise sur le marché, tout en conservant une qualité de production élevée. Par ailleurs, la thèse aborde de manière approfondie la question de la reconfiguration des systèmes de production, un aspect crucial pour l'intégration de nouvelles technologies et la mise en œuvre de l'Industrie 4.0. Les recommandations formulées à partir de l'étude de cas de FPT-BLY offrent un cadre méthodologique pour la transition vers des systèmes de production plus flexible, capables de s'adapter rapidement aux innovations technologiques et aux évolutions du marché. De plus, cette recherche met en lumière l'importance d'une collaboration étroite entre les acteurs industriels et académiques pour relever les défis de l'Industrie 4.0. L'interaction entre l'usine FPT-BLY et le milieu de recherche a permis d'identifier des solutions pratiques et innovantes, témoignant de la valeur ajoutée d'une approche collaborative pour la transformation industrielle.

En suivant les recommandations de cette thèse, il est possible d'identifier le niveau de flexibilité adéquat pour le système et de planifier les investissements nécessaires à l'amélioration du système existant. Ainsi, cela contribuera à renforcer la position de leader de l'usine FPT-BLY dans l'industrie des moteurs industriels. En exploitant les progrès scientifiques pour optimiser ses opérations, FPT-BLY se donne les moyens de répondre efficacement aux défis futurs, affirmant son engagement en faveur de l'excellence opérationnelle et de l'innovation.

3 Chapitre 3 : Etat de l'art

Dans ce chapitre, nous examinons l'état de l'art concernant la flexibilité des systèmes de production, les systèmes manufacturiers reconfigurables et l'Industrie 4.0. Cette revue de littérature vise à identifier les tendances, les schémas et les lacunes dans la recherche actuelle pour fournir une base solide à notre étude.

Nous débutons par une méthodologie de recherche documentaire détaillant les outils et techniques utilisés pour collecter et analyser les publications scientifiques pertinentes. L'utilisation d'analyses bibliométriques, notamment via VOSviewer, nous permet d'examiner les évolutions des publications, d'analyser les mots-clés et les influences, et de dégager les tendances actuelles.

Ensuite, nous explorons les différents paradigmes des systèmes de production, tels que les systèmes manufacturiers dédiés (DMS), les systèmes manufacturiers reconfigurables (RMS), les systèmes manufacturiers cellulaires (CMS) et les systèmes manufacturiers flexibles (FMS). Chaque paradigme est examiné en détail pour comprendre ses contributions et ses limites.

Nous nous focalisons également sur la flexibilité en tant que concept clé, en définissant ses différentes dimensions, types et classifications. Les axes de mesure de la flexibilité sont également abordés, avec des méthodologies spécifiques pour quantifier cette flexibilité de manière précise et fiable.

Enfin, nous discutons de l'Industrie 4.0 et des systèmes cyber-physiques, en soulignant comment ces avancées technologiques impactent la flexibilité des systèmes de production. La robustesse, la résilience et l'agilité sont également définies et comparées, fournissant un cadre théorique pour notre recherche.

Cette analyse exhaustive de l'état de l'art nous permet de cerner les défis et les opportunités liés à la flexibilité des systèmes de production et pose les bases pour le développement de nouvelles méthodologies d'évaluation et d'optimisation que nous présenterons dans les chapitres suivants.

3.1 Méthodologie recherche documentaire

L'analyse bibliométrique représente une méthode méthodologique cruciale dans le cadre de la recherche académique, particulièrement pour aborder des domaines en évolution rapide tels que la fabrication moderne. Cette approche quantitative vise à évaluer et à interpréter le vaste corpus de littérature scientifique afin de déceler les tendances, les schémas et les lacunes dans un domaine de recherche spécifique. L'objectif principal de cette analyse est de fournir une vue d'ensemble systématique et objective des développements passés et actuels, facilitant ainsi la compréhension des dynamiques et des axes principaux au sein d'un champ d'étude donné.

Dans le cadre spécifique de cette section, l'analyse bibliométrique sera appliquée à trois mots-clés centraux dans le domaine des systèmes de production : "*Flexible Manufacturing System*" (FMS), "*Reconfigurable Manufacturing Systems*" (RMS), et "*Industry 4.0*" (I4.0). Ces termes représentent des concepts clés dans l'exploration des capacités adaptatives des systèmes de production contemporains face aux exigences changeantes du marché et à l'intégration technologique. FMS explore la capacité des entreprises manufacturières à répondre de manière efficace et rentable aux changements de demande, personnalisation des produits, un aspect fondamental pour la compétitivité dans des environnements de marché instables et personnalisés. RMS se concentre sur l'aptitude des systèmes de fabrication à reconfigurer la partie physique du système de manière efficace pour l'introduction de nouveaux produits, pour s'adapter au besoin de changement de la production ou processus, soulignant l'importance de la flexibilité structurelle et opérationnelle. Enfin, I4.0 englobe l'intégration des nouvelles technologies,

comme l'IoT, la data science et l'IA, dans les processus de production, marquant une transformation vers des usines plus intelligentes et interconnectées, avec une capacité d'autoadaptations, et auto-configuration, ce qui impose une forte flexibilité et reconfigurabilité du système de production. Nous pouvons constater que ces trois termes sont très interconnectés. Ces mots clés sont largement détaillé dans la section 3.4.

L'objectif de cette analyse bibliométrique est donc de cartographier le terrain de recherche existant autour de ces concepts clés, de déterminer comment ils se croisent et influencent la fabrication moderne, et d'identifier les domaines de recherche émergents ainsi que les lacunes potentielles. Cela permettra non seulement de fournir un cadre académique solide pour la thèse mais aussi de souligner les directions futures pour la recherche et la pratique dans le domaine de la fabrication.

3.1.1 Evolution des publications scientifiques du domaine

Cette section détaille l'évolution des recherches académiques capturées dans trois domaines interdépendants et critiques pour l'innovation industrielle, illustrée par les tendances de publication sur la flexibilité du système manufacturier (FMS), les systèmes manufacturiers reconfigurables (RMS) et l'Industrie 4.0 (I4.0).

La Figure 11 dépeint une trajectoire de la recherche sur la flexibilité manufacturière qui connaît une augmentation graduelle depuis les années 1990. L'ascension marquée dans les années 2000 éclaire la montée de la flexibilité en tant que valeur centrale pour les entreprises cherchant à s'adapter et à se démarquer dans un marché volatil. L'attention soutenue aux publications récentes réaffirme que cette thématique garde toute sa pertinence dans un contexte d'évolution rapide des exigences de production.

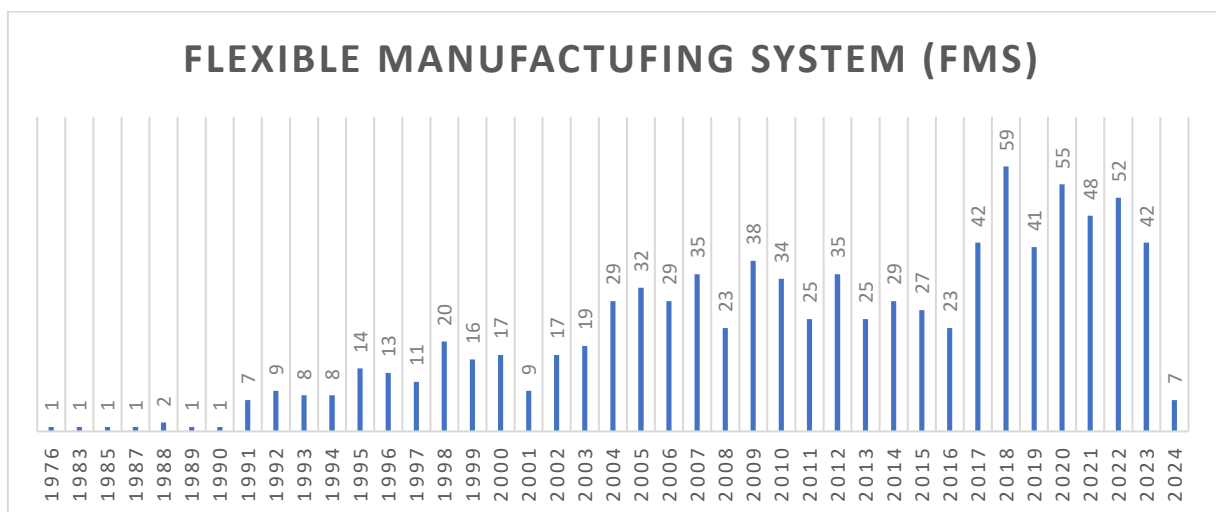


Figure 11. Evolution des publications sur FMS

La Figure 12 concernant les publications sur les systèmes de manufacturier reconfigurables prennent leur essor dans les premières années du nouveau millénaire, comme le montre le deuxième graphique. Le nombre croissant de recherches reflète la prise de conscience de l'importance de l'agilité et de la personnalisation dans les processus de fabrication. La récente baisse peut signaler une intégration et une standardisation des RMS dans la pratique manufacturière actuelle, indiquant une période de stabilisation et de réflexion sur les progrès réalisés.

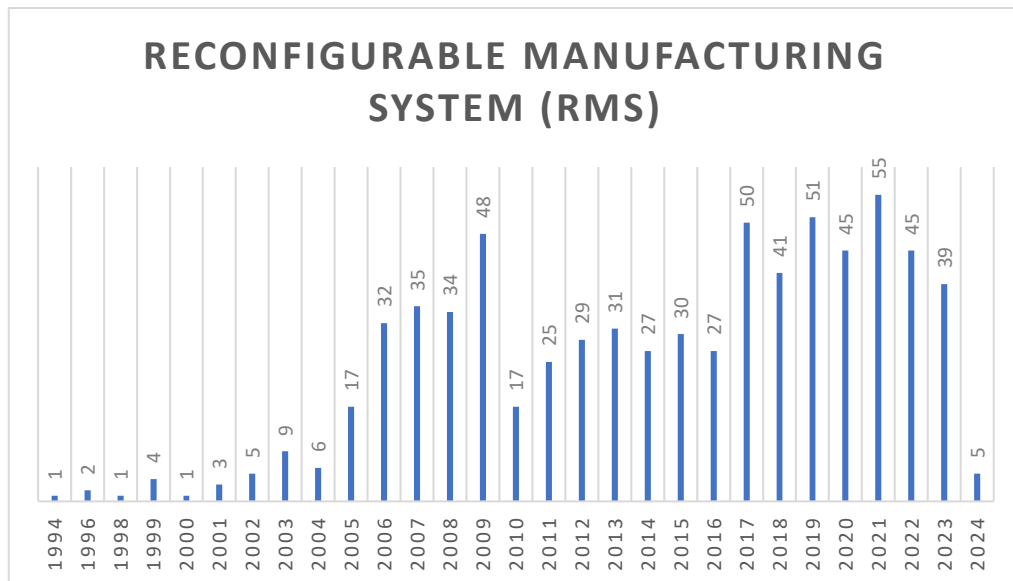


Figure 12. Evolution des publications sur RMS

La Figure 13 sur l'Industrie 4.0 présente un pic impressionnant de publications qui commence autour de 2012, montrant un intérêt exponentiel pour les technologies révolutionnaires qui redéfinissent le paysage manufacturier. La courbe atteint son sommet en 2021, suivie d'une baisse qui suggère une phase de digestion des concepts ou peut-être le prélude à la prochaine vague d'innovations industrielles qui dépasseront l'actuel paradigme de l'Industrie 4.0.

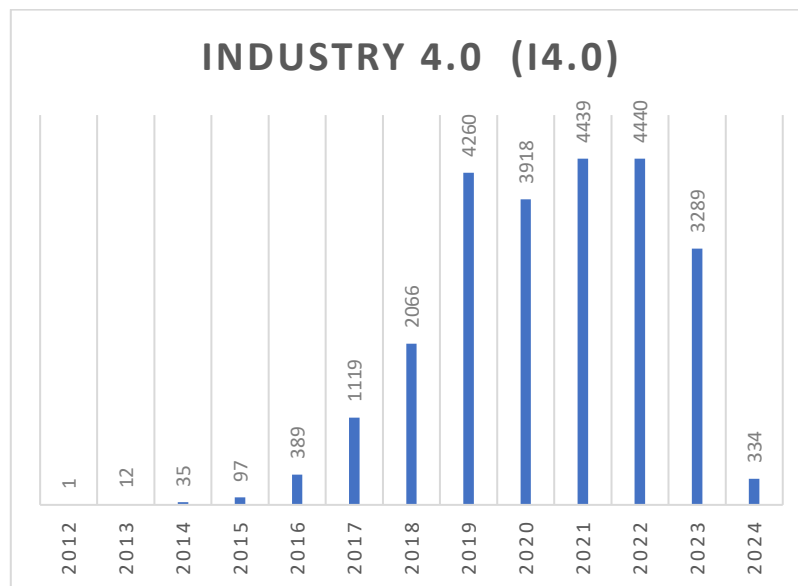


Figure 13. Evolution des publications sur I4.0

L'examen conjoint de ces graphiques révèle des tendances intéressantes. L'accent mis sur la flexibilité manufacturière et les RMS dans le passé récent démontre que ces domaines constituent le fondement sur lequel l'Industrie 4.0 s'est construite et a prospéré. Bien que les travaux sur l'Industrie 4.0 semblent ralentir, signalant peut-être une période de transition, l'importance persistante de la flexibilité et de la capacité de reconfiguration souligne le rôle inébranlable que ces concepts jouent dans la capacité d'innovation et de compétitivité des entreprises manufacturières. L'ensemble de ces tendances montre que la recherche sur ces sujets reste dynamique et évolutive, avec des phases de croissance rapide suivies de périodes de consolidation. Les cycles observés reflètent les réponses de la communauté académique

aux défis industriels émergents, aux progrès technologiques, ainsi qu'aux cycles économiques mondiaux. Nous pouvons noter en particulier l'augmentation des publications durant les cinq dernières années, ainsi que la forte corrélation entre le nombre de publications sur ces trois sujets. Ceci peut être interprété comme l'interconnexion entre ces différents mots-clés. Le nombre de publications a été doublé après l'avènement de I4.0, ce qui démontre un regain de recherche dans le RMS et dans le FMS dans le contexte de I4.0 qui pourrait améliorer et changer certains de leurs aspects, comme leur mise en place ou leur rentabilité. Ces observations offrent des leçons précieuses sur la manière dont les entreprises peuvent naviguer et se positionner pour l'avenir dans un environnement industriel en constante évolution.

Cette synthèse de l'évolution des publications offre un aperçu précieux des intérêts de recherche actuels et des mouvements futurs possibles dans l'innovation industrielle, soulignant l'interconnexion des avancées dans les FMS, les RMS et l'I4.0.

3.2 Analyses VOSviewer

VOSviewer est un outil logiciel sophistiqué conçu pour aider les chercheurs à visualiser et analyser des réseaux complexes de données scientifiques et académiques. Ce logiciel est particulièrement utile dans le cadre d'une thèse, car il permet d'effectuer des analyses bibliométriques approfondies et de cartographier les relations entre les documents, les concepts, les auteurs ou les mots-clés. Utilisé pour établir l'état de l'art d'un domaine de recherche spécifique, VOSviewer facilite la compréhension des tendances principales, des auteurs influents, et des articles clés, ainsi que des revues et institutions dominantes (Van Eck & Waltman, 2010). L'un des principaux avantages de VOSviewer réside dans sa capacité à identifier et visualiser les thèmes de recherche émergents en analysant les co-occurrences des mots-clés. Cette fonctionnalité aide les doctorants à repérer les domaines de recherche bien établis ainsi que ceux qui sont en marge ou peu explorés, permettant ainsi de mieux orienter leur travail de recherche. Les visualisations générées par VOSviewer, qui peuvent illustrer les interconnexions entre divers concepts ou auteurs, rendent les réseaux de connaissances complexes plus accessibles et plus compréhensibles pour le lecteur de la thèse.

3.2.1 Analyse des mots clés

L'objectif de cette analyse illustré par la Figure 14, réalisée à partir de 6500 articles académiques en utilisant le logiciel VOSviewer, était de dégager une compréhension globale des tendances et des domaines de recherche les plus pertinents dans les champs des systèmes manufacturier flexible (FMS), des systèmes manufacturiers reconfigurables (RMS) et de l'industrie 4.0 (I4.0). L'analyse des mots-clés sert à identifier les concepts centraux, les thèmes émergents et les relations entre les différents domaines de recherche. Cela aide à comprendre comment ces concepts s'interconnectent et évoluent dans le cadre de la fabrication moderne et des systèmes de production.

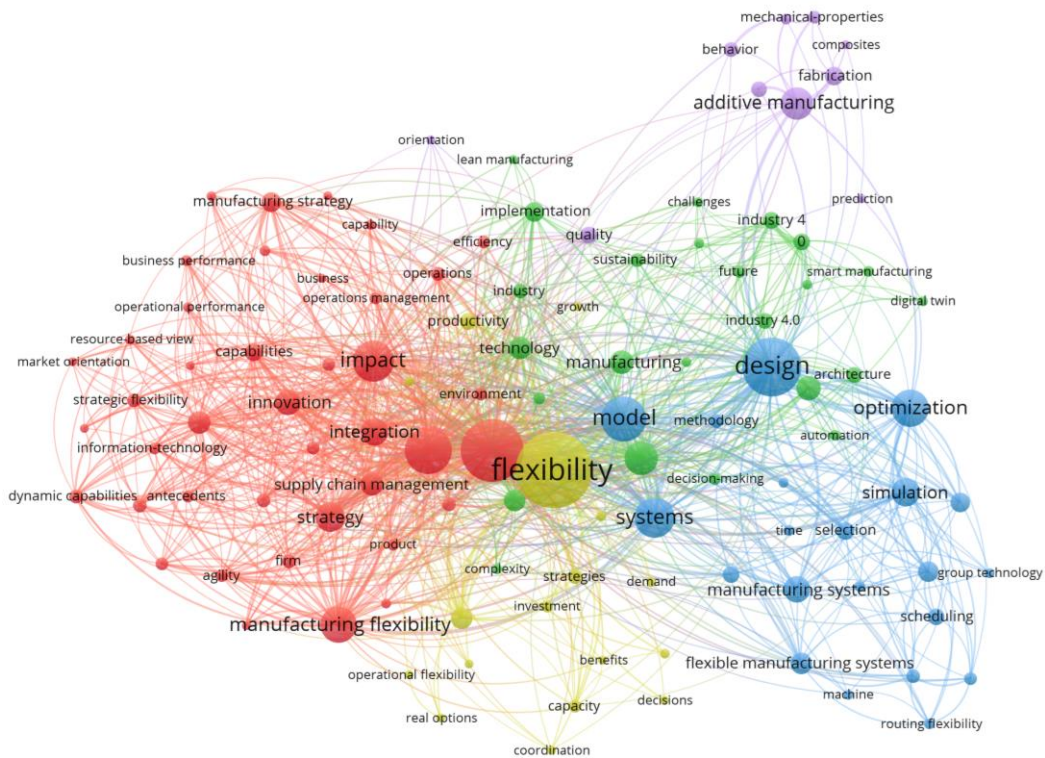


Figure 14. VOSviewer : Analyse mots clés

La Figure 14 issue de cette analyse illustre une carte de réseau de mots-clés, où chaque nœud représente un mot-clé et sa taille est proportionnelle au nombre de fois qu'il apparaît dans la littérature. Les lignes entre les nœuds représentent leur co-occurrence, indiquant à quel point deux mots-clés sont liés en termes de leur utilisation conjointe dans les articles. La carte est colorée en clusters qui indiquent des groupes de termes étroitement liés, représentant différents sous-domaines ou thèmes dans la recherche sur les systèmes de fabrication. Au centre de l'image, le mot "flexibilité" apparaît comme le plus dominant, reflétant sa centralité dans la recherche sur les systèmes de fabrication. Ce terme est fortement associé à des concepts comme "manufacturing flexibility", "systems", "integration", et "impact", indiquant que la flexibilité est un facteur crucial dans l'évaluation et l'amélioration des systèmes de fabrication. Les couleurs différentes autour de ce terme central représentent des thèmes variés : rouge pour les liens entre la flexibilité et l'innovation stratégique et la gestion de la chaîne d'approvisionnement, vert pour la flexibilité en conception, en optimisation et en modélisation des systèmes de fabrication, et bleu pour des aspects plus techniques comme la simulation, la programmation des machines et le routage. Le cluster rouge se concentre sur des thèmes stratégiques tels que l'agilité, la performance opérationnelle, et les capacités d'innovation, soulignant l'importance de la flexibilité pour améliorer la compétitivité et l'efficacité des entreprises. Le cluster vert, quant à lui, traite des défis liés à la conception et à l'optimisation des systèmes de fabrication, soulignant l'importance de l'innovation technologique et de la modélisation pour réaliser des systèmes de production plus flexibles et réactifs. Enfin, le cluster bleu explore les aspects techniques de la mise en œuvre de la flexibilité dans les systèmes de fabrication, mettant en avant l'importance de la simulation et de la programmation pour atteindre une flexibilité opérationnelle.

Malgré l'abondance d'informations et la richesse des thèmes abordés dans les 6500 articles analysés, l'image révèle également certains écarts dans la littérature existante, particulièrement en lien avec l'intégration et l'application pratique des systèmes de fabrication flexibles et reconfigurables au sein de l'Industrie 4.0. Alors que les concepts de "flexibilité", "systèmes" et "manufacturing" sont fortement représentés, il semble exister un manque relatif d'études qui abordent de manière approfondie la

convergence entre les FMS, les RMS et les technologies de l'Industrie 4.0, comme l'intelligence artificielle, le big data et l'Internet des objets (IoT), dans des scénarios de production réels. Un autre écart notable est le manque de recherches sur l'impact socio-économique et environnemental des systèmes de fabrication avancés. Bien que des termes tels que "sustainability" (durabilité) et "human factors" (facteurs humains) soient présents, ils apparaissent moins fréquemment et semblent périphériques par rapport au noyau central de la recherche. Cela suggère une opportunité pour des travaux futurs qui intégreraient ces dimensions importantes, offrant ainsi une perspective plus holistique sur la fabrication flexible et reconfigurable. Enfin, alors que l'analyse met en évidence une concentration forte sur la "conception", "l'optimisation" et "la modélisation", il y a un manque apparent de littérature traitant spécifiquement des défis liés à la mise en œuvre et à l'adoption des technologies de l'Industrie 4.0 dans des environnements de fabrication existants. Les études de cas détaillées, les retours d'expérience et les analyses de rentabilité restent relativement peu abordés, soulignant un besoin de recherches plus pragmatiques et orientées vers l'application, qui pourraient guider les entreprises dans la transition vers des systèmes de production plus flexibles et réactifs.

3.2.2 Analyse des influences

L'objectif de cette analyse, réalisée à l'aide de VOSviewer, est d'identifier et de visualiser les influences clés et les réseaux de citations dans un domaine de recherche spécifique, basé sur un ensemble de publications académiques. Cette carte d'influence aide à comprendre quelles études ont eu un impact significatif sur la recherche dans le domaine, en identifiant les auteurs, les articles et les journaux les plus cités.

La Figure 15 représente une carte de réseau de citations où chaque nœud (ou point) correspond à un article, un auteur ou un journal spécifique, et la taille de chaque nœud est proportionnelle au nombre de citations reçues. Les liens entre les nœuds indiquent les citations ou les références mutuelles entre les articles. Les différents clusters, représentés par des couleurs différentes, montrent les groupes d'articles qui sont fréquemment cités ensemble, suggérant des sous-thèmes ou des approches méthodologiques communes au sein du domaine.

Dans cette carte, on peut observer des clusters distincts, chacun reflétant une facette ou une école de pensée différente dans le domaine de la recherche. Par exemple, les articles regroupés en rouge pourraient représenter un thème spécifique comme la gestion de la chaîne d'approvisionnement, tandis que ceux en vert pourraient se concentrer sur des sujets liés à la gestion des opérations. La concentration de citations (comme illustré par les gros nœuds) indique les travaux de recherche ou les auteurs qui ont exercé une influence majeure sur le domaine.

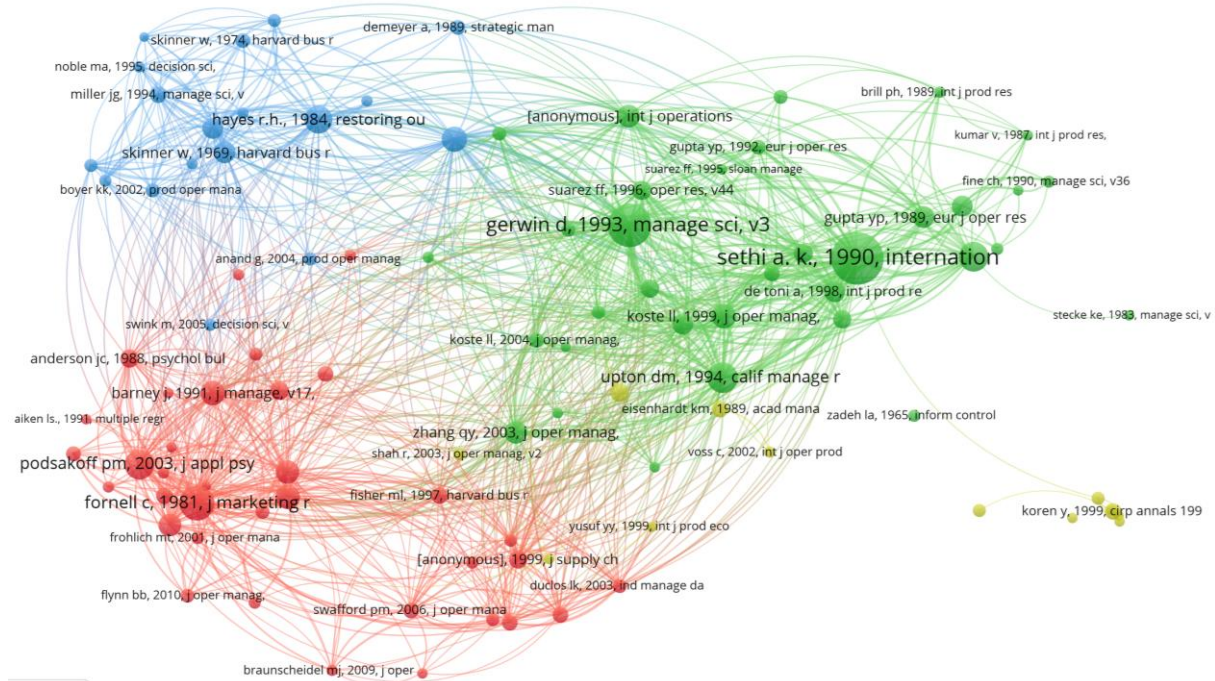


Figure 15. VOSviewer : Analyse des influences

L'analyse de réseau de citations réalisée via VOSviewer s'avère être un outil précieux pour cerner les piliers fondateurs de la recherche dans le domaine de la flexibilité de production. À travers cette visualisation, il a été possible de distinguer les cinq articles les plus influents, qui se manifestent comme les nœuds les plus importants dans le réseau et servent de référence centrale dans la littérature. Les articles fondateurs identifiés par leur prédominance dans le réseau de citations sont les suivants :

- (Skinner, 1969), qui a marqué un tournant en soulignant l'importance de l'intégration de la production dans la stratégie globale d'entreprise.
- (H. Hayes; C. Wheelwright, 1985) une œuvre qui a approfondi la discussion sur la compétitivité industrielle à travers des pratiques de production innovantes.
- (Gerwin, 1993), publié dans Management Science, qui a conceptualisé la flexibilité comme un avantage stratégique dans le secteur manufacturier.
- (Upton, 1994) présenté dans California Management Review, qui a analysé la gestion de la flexibilité comme un élément clé de performance opérationnelle.
- (Sethi & Sethi, 1990) publié dans The International Journal of Flexible Manufacturing Systems, qui reste une étude de référence sur la flexibilité des systèmes de production, souvent citée pour son exhaustivité et sa pertinence.

Ces articles servent de socle sur lequel s'appuie la recherche actuelle, y compris ma propre thèse, et ils délimitent les horizons théoriques et pratiques du domaine. Leur influence persistante reflète l'importance fondamentale de leurs contributions et oriente mon travail vers une compréhension approfondie des théories de la flexibilité et de leur application pratique dans l'industrie contemporaine. Cette reconnaissance des travaux fondateurs, grâce à l'analyse de VOSviewer, consolide les bases théoriques sur lesquelles se construisent mes investigations et soutient la démarche de situer mes propres recherches dans le prolongement de ces études pionnières.

3.2.3 Analyse des tendances

La Figure 16 produite via VOSviewer représente une analyse des tendances basée sur une collection de publications académiques. L'objectif principal de cette analyse est de visualiser comment différentes études, concepts et auteurs sont interconnectés au sein d'un champ de recherche spécifique, ainsi que d'identifier les tendances principales, les influences et les évolutions au fil du temps. En représentant graphiquement ces interrelations, les chercheurs et les doctorants peuvent identifier les domaines clés d'intérêt, les auteurs influents, et comment les idées et les approches ont évolué dans leur domaine d'étude.

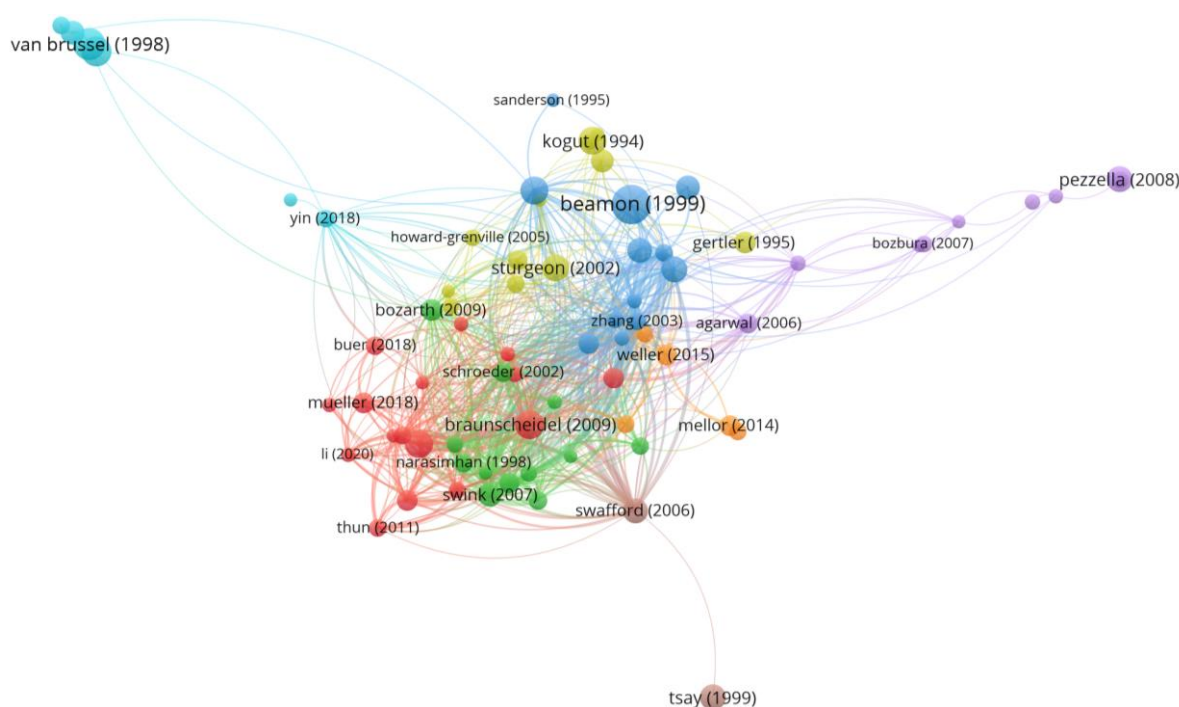


Figure 16. VOSviewer : Analyse des tendances

Dans Figure 16, chaque nœud (ou point) représente un auteur ou un document, et sa taille reflète le nombre de citations ou la fréquence d'apparition dans la littérature analysée, ce qui indique son importance ou son influence dans le domaine. Les liens entre les nœuds montrent les relations de citation ou les collaborations entre auteurs, et les différentes couleurs des nœuds et des clusters indiquent différents sous-domaines ou groupes thématiques. Cette représentation facilite l'identification des communautés de recherche et des principaux contributeurs. Par exemple, des nœuds comme (Beamon, 1999) ou (Yin, 2018) pourraient représenter des travaux centraux ou des auteurs clés dans leurs domaines respectifs. À partir de cette cartographie des citations, il est possible de distinguer cinq publications qui se démarquent comme des références centrales, symbolisées par les plus gros nœuds et constituant les contributions les plus influentes dans le domaine :

- (Beamon, 1999) cet article est une référence essentielle, abordant probablement les aspects de la chaîne logistique et de la performance opérationnelle, et se distingue par son impact considérable sur les recherches subséquentes.
- (Yin, 2018) représentant un ajout plus récent à la littérature, cet article a acquis une reconnaissance rapide, suggérant de nouvelles orientations méthodologiques ou thématiques dans le domaine.
- (Narasimhan & Jayaram, 1998) ce travail est vraisemblablement un pilier pour les recherches sur les processus de production et l'amélioration de la flexibilité.

- (Swafford et al., 2006) avec un fort nombre de citations, cette recherche offre probablement une analyse approfondie de la gestion de la production et de l'agilité opérationnelle.
- (Thun & Hoenig, 2011) ce nœud substantiel indique une contribution significative à la compréhension des systèmes de production et leur capacité d'adaptation aux changements.

Ces travaux constituent une base solide pour ma thèse, qui s'efforce de construire sur ces fondements établis et de pousser plus loin la compréhension et l'application de la flexibilité dans le contexte industriel. Cette reconnaissance des études influentes et des auteurs qui ont façonné le domaine me guide dans le ciblage des zones de recherche encore inexplorées et me permet d'inscrire mon travail dans la continuité des avancées académiques actuelles.

3.2.4 Discussion et conclusion des analyses VOSviewer

Les trois analyses réalisées avec VOSviewer fournissent une vision globale et approfondie des domaines de la recherche sur les systèmes de fabrication flexibles, reconfigurables et des tendances de l'Industrie 4.0, en dégagant les axes principaux de recherche, les auteurs et travaux de référence, ainsi que les évolutions thématiques au fil du temps.

La première analyse, focalisée sur les mots-clés des publications, a mis en évidence la centralité du concept de "flexibilité" au sein de la recherche en systèmes de fabrication, tout en révélant les différentes thématiques associées comme la gestion de la chaîne d'approvisionnement, l'intégration de systèmes et les défis de mise en œuvre. Cette vision nous montre que la flexibilité n'est pas un concept isolé mais bien un élément central intégrant divers aspects stratégiques, technologiques et opérationnels. La seconde analyse, se concentrant sur l'influence des auteurs et des publications, a révélé les principaux contributeurs dans le domaine et leurs travaux les plus cités, illustrant les fondements théoriques et les recherches influentes qui ont façonné le champ des systèmes de fabrication flexibles et reconfigurables.

Cependant, cette cartographie a également souligné certaines lacunes, notamment en ce qui concerne les travaux récents ou les connexions entre différentes sous-thématiques, suggérant des opportunités pour des recherches futures intégrant les avancées récentes ou établissant des ponts entre les silos de connaissances. Par exemple, le lien entre la flexibilité et l'industrie 4.0. Le fait que le RMS avait une meilleure rentabilité que le FMS devient questionnable grâce aux nouvelles technologies, comme la fabrication additive, et nouvelles méthodologies, comme les méthodologies d'analyse des données. La troisième analyse, portant sur les tendances, a montré comment les thématiques ont évolué au fil du temps, indiquant les domaines qui ont gagné ou perdu en importance. Cette dynamique des sujets de recherche fournit des indications sur les directions futures possibles et sur les domaines qui pourraient bénéficier de davantage d'attention. Par exemple, une corrélation possible entre la recherche sur les FMS et les méthodologies d'optimisation mathématiques et d'aide à la décision qui pourrait aider les industriels à appliquer certaines recommandations de la recherche scientifique.

La proposition de développer des cadres de recherche holistiques ouvre une nouvelle perspective enthousiasmante. L'ambition est de concevoir des modèles de recherche qui intègrent non seulement les considérations techniques et opérationnelles mais aussi prennent en compte les impacts économiques, environnementaux et sociaux liés à la flexibilité dans le domaine de la fabrication. Adopter une telle perspective élargie représente une avancée majeure, permettant d'englober de manière exhaustive les défis et les opportunités présents et futurs du secteur de la production industrielle, signalant ainsi un progrès notable dans l'étude de la flexibilité et de la réactivité des systèmes de production face aux exigences évolutives du XXI^e siècle. En somme, les analyses réalisées à l'aide de VOSviewer non seulement dressent un panorama complet des recherches actuelles dans le domaine des systèmes de fabrication, mais elles mettent également en évidence des zones sous-explorées et des opportunités de recherche.

Grâce aux analyses approfondies effectuées via VOSviewer, j'ai identifié dix articles pertinents qui constituent des fondations solides pour l'étude de la flexibilité dans les systèmes de production. Ces articles, cités précédemment dans le manuscrit, ont fourni un aperçu substantiel des types de flexibilité – une thématique que j'approfondirai dans une section ultérieure de ce travail. De plus, une lacune importante a été mise en évidence : à ce jour, il semble qu'il n'existe pas de méthodologie globale pour guider les industriels dans l'implémentation de la flexibilité au sein de leurs systèmes de production. Cette constatation souligne la nécessité de recherches supplémentaires et ouvre la voie à l'élaboration d'une approche intégrée qui serait d'une grande valeur pour le secteur manufacturier. Mon travail aspire à répondre à ce besoin en fournissant des stratégies et des cadres pratiques pour l'intégration de la flexibilité, soutenant ainsi les entreprises dans leur adaptation aux exigences évolutives du marché et dans l'optimisation de leurs capacités productives.

3.3 Analyse des articles principaux

A la suite des analyses précédentes, un corpus d'articles a été déterminé comme étant capital dans l'étude de la flexibilité industrielle. Cette section se concentrera à l'étude et l'analyse de ces articles dans le Tableau 1

Tableau 1. Analyses des articles principaux sur la flexibilité industrielle

Référence	Objectifs de Recherche	Types de Flexibilité Abordés	Étude de Cas Industrielle ?	Détails sur l'Expérimentation Industrielle
(Jain et al., 2013)	Synthétiser la recherche sur la flexibilité de fabrication.	Machine, opération, itinéraire, volume, expansion, mix	Oui	Analyse des usines en Asie pour évaluer l'impact des stratégies de flexibilité sur la performance opérationnelle.
(Gerwin, 1993)	Examiner l'utilisation stratégique de la flexibilité dans la fabrication.	Flexibilité stratégique	Non	
(Koste & Malhotra, 1999)	Développer un cadre théorique pour la flexibilité de fabrication.	Range-number, range-heterogeneity, mobility, uniformity	Non	
(Sethi & Sethi, 1990)	Étudier la flexibilité en tant que capacité stratégique dans les systèmes de fabrication.	Flexibilité de machine, opération, processus, produit, volume	Oui	Études de cas incluant des applications industrielles pour divers types de flexibilité.
(Brettel et al., 2016)	Évaluer l'impact des technologies de l'Industrie 4.0 sur la flexibilité de fabrication.	Stratégies proactives et réactives	Oui	Étude de cas dans une entreprise allemande utilisant des technologies de fabrication additive.
(Mehrabi et al., 2000)	Analyser la reconfigurabilité comme élément clé des systèmes de fabrication du futur.	Reconfigurabilité, flexibilité opérationnelle	Oui	Application de concepts RMS dans divers contextes industriels.
(Taylor & Spicer, 2007)	Améliorer la conception des systèmes de fabrication pour une meilleure flexibilité.	Flexibilité des machines, des opérations	Non	
(Gupta & Goyal, 1989)	Développer des mesures généralisables de la flexibilité de fabrication.	Flexibilité de machine, de main-d'œuvre, de manipulation de matériel	Non	
(Upton, 1994)	Évaluer comment la flexibilité permet aux entreprises de mieux répondre aux incertitudes.	Flexibilité opérationnelle, de produit	Non	
(Shi & Daniels, 2003)	Lier la flexibilité de fabrication aux performances de l'entreprise.	Flexibilité opérationnelle, stratégique	Non	
(Wheelwright & Clarke, 1976)	Explorer le rôle de la flexibilité dans l'exécution stratégique de la fabrication.	Flexibilité stratégique, opérationnelle	Non	

(Goldhar & Jelinek, 1985)	Discuter des applications de la flexibilité dans la gestion stratégique de la fabrication.	Flexibilité opérationnelle, de produit, de volume	Non	
(Suzaki, 1987)	Proposer des méthodes pratiques pour améliorer la flexibilité sur le terrain.	Flexibilité opérationnelle, de processus	Oui	Implémentation de techniques pour augmenter la flexibilité dans des usines spécifiques.
(Weckenborg et al., 2024)	Revoir les approches récentes de la conception des systèmes de fabrication en utilisant des méthodes de recherche opérationnelle, en se concentrant sur les types de flexibilité.	Machine, opération, produit, volume	Non	
Calisir et al.	Étudier comment les principes de l'Industrie 4.0 peuvent être intégrés dans l'ingénierie industrielle pour améliorer la flexibilité et l'efficacité des systèmes de production.	Flexibilité opérationnelle, flexibilité des systèmes	Oui	L'étude examine les applications dans des environnements de production réels, bien que des détails spécifiques sur les sites ou les résultats ne soient pas fournis.
(Jain et al., 2013)	Comprendre et classifier les différentes dimensions de la flexibilité de fabrication pour aider les entreprises à améliorer leur compétitivité.	Flexibilité de la machine, flexibilité du processus, flexibilité du volume	Non	
(Zuehlke, 2010)	Évaluer l'impact des technologies de l'Industrie 4.0 sur la flexibilité des systèmes de production et proposer des méthodes pour leur intégration.	Flexibilité des processus, flexibilité technologique	Oui	L'article inclut des exemples de l'industrie automobile où l'Industrie 4.0 a été appliquée pour augmenter la flexibilité et l'efficacité des lignes de produc

La synthèse de la littérature présentée dans ce tableau reflète l'évolution significative et la diversification de la recherche sur la flexibilité de la fabrication au cours des dernières décennies. De 1983 à 2018, les chercheurs ont exploré la flexibilité sous plusieurs dimensions - opérationnelle, stratégique, de processus, de produit, de volume, et en relation avec les avancées de l'Industrie 4.0. Alors que les premières études, telles que celle de (Goldhar & Jelinek, 1985), se concentraient sur la flexibilité en tant qu'outil stratégique, les travaux récents comme ceux de (Weckenborg et al., 2024) et (Zuehlke, 2010) mettent en lumière la nécessité d'intégrer les technologies de l'Industrie 4.0 pour accroître la flexibilité et la réactivité des systèmes de production. L'analyse détaillée révèle une tendance croissante vers la réalisation d'études de cas industrielles, soulignant une orientation pratique et applicable de la recherche. Ces études de cas, observées notamment chez (Jain et al., 2013) et (Brettel et al., 2016), illustrent comment la flexibilité peut être effectivement mise en œuvre pour améliorer la performance opérationnelle, surtout avec l'émergence de l'Industrie 4.0.

En outre, la présence récurrente de l'Industrie 4.0 dans les articles les plus récents témoigne de l'importance croissante des systèmes cyber-physiques et de l'automatisation avancée dans la réalisation de la flexibilité en fabrication. Cette tendance souligne l'évolution des défis auxquels les chercheurs et les praticiens doivent faire face passer d'une compréhension conceptuelle de la flexibilité à son application concrète dans des contextes technologiques en rapide évolution.

Finalement, il est essentiel de noter que si de nombreux articles discutent des dimensions et mesures de la flexibilité, il y a une opportunité manifeste pour de futures recherches afin de combler le fossé entre la théorie et la pratique. En particulier, des études empiriques plus approfondies et des cadres de mise en œuvre détaillés pourraient être bénéfiques pour les organisations cherchant à augmenter leur flexibilité dans l'ère de l'Industrie 4.0.

3.4 Les paradigmes des systèmes de production

La production industrielle a évolué à travers divers paradigmes au fil des décennies, chacun reflétant les avancées technologiques, les changements économiques et les exigences du marché de son époque. Comprendre ces paradigmes est essentiel pour appréhender les principes sous-jacents qui guident les systèmes de production actuels et futurs. Cette partie de la thèse se consacre à l'exploration et à la définition des différents paradigmes de production, de la fabrication en série initiée au début du XXe siècle à l'ère moderne de l'Industrie 4.0. L'objectif est de tracer un cadre clair qui permettra de contextualiser les discussions ultérieures sur la flexibilité dans les systèmes de production. En délimitant ces paradigmes, nous cherchons à établir une base solide pour analyser comment les entreprises peuvent adapter et optimiser leurs opérations pour répondre aux défis contemporains et futurs.

3.4.1 DMS

Les Systèmes de Fabrication Dédiés (Dedicated Manufacturing Systems, DMS) sont conçus pour répondre à des besoins de production spécifiques et restent inchangés tout au long de la durée de vie du système de fabrication (Dashchenko, 2006). Typiquement, un DMS est conçu pour produire une pièce unique à un volume élevé et constant. Ces systèmes, en raison de leur spécificité, offrent des performances robustes et représentent la solution la moins chère en termes de coût initial en capital. Cependant, ils ne deviennent économiques que lorsque les volumes de production restent relativement constants et que la durée de vie du système est longue. Les DMS ne sont pas conçus pour s'adapter efficacement aux changements dans les exigences de production, rendant ces systèmes économiquement non viables dans des environnements de production incertain où les exigences des produits changent rapidement.

3.4.2 RMS

À la fin du 20^e siècle, les entreprises manufacturières ont dû s'adapter à une nouvelle ère marquée par une économie mondialisée et une concurrence accrue. Cette situation a renforcé le pouvoir d'achat des clients, entraînant une fréquente introduction de nouveaux produits et de grandes fluctuations dans la demande de produits. Pour rester compétitives, les entreprises de fabrication doivent utiliser des systèmes qui non seulement produisent leurs biens avec une haute productivité, mais permettent également une réponse rapide aux changements du marché et aux besoins des consommateurs. Les systèmes de fabrication reconfigurables (RMS) offrent cette capacité indispensable (Dashchenko, 2006). Le concept de reconfigurabilité, introduit par (Koren et al., 2018), englobe la conception de machines de production et de systèmes manufacturiers qui peuvent être reconfigurés rapidement et de manière économique pour répondre aux changements du marché. Un RMS est ainsi un système de fabrication réactif dont la capacité la configuration du système peut être réajustée pour répondre au besoin de la production. Les RMS sont reconnus comme un concept nécessaire pour augmenter la productivité et soutenir les profits en dépit des changements abrupts du marché global. Un RMS typique peut inclure un ensemble d'équipements flexibles, tels que des machines CNC, et des équipements reconfigurables spéciaux – des outils de machine, des robots, et des machines d'inspection en processus. La reconfigurabilité d'un RMS se manifeste à deux niveaux : (1) dans l'agencement et les connexions des machines au niveau du système, et (2) dans certaines des machines du système qui sont reconfigurables. Ces deux niveaux sont conçus selon un ensemble de principes et possèdent des caractéristiques spéciales appelées Caractéristiques Fondamentales des RMS : Modularité, Intégrabilité, Personnalisation, Scalabilité, Convertibilité, et Diagnostiquabilité.

3.4.3 CMS

Un système de fabrication cellulaire, connu sous l'acronyme CMS, représente une configuration organisée de production qui vise à améliorer l'efficacité et la flexibilité (Tompkins et al., 2010). Il se base sur le regroupement d'équipements et de ressources similaires en suivant le concept de la technologie de groupe. Le but est de rationaliser le flux de production en créant des cellules spécifiques dédiées à la fabrication de familles de produits ayant des processus similaires. Ce système permet une gestion optimisée des processus de production pour divers produits, améliorant ainsi la réactivité et la flexibilité face aux fluctuations de la demande. Historiquement, le concept de CMS a vu le jour dans les années 1970, en réponse à un besoin croissant d'améliorer simultanément l'efficacité et la flexibilité des systèmes de production. Cette approche a été motivée par la volonté de pallier les limites des systèmes de production dédiés, qui se trouvaient souvent incapables de s'adapter rapidement aux changements de demande ou de diversification des produits. Les CMS ont été conçus pour faciliter une réorganisation rapide des ressources de production, pour minimiser les temps de configuration et pour réduire les mouvements de matériaux entre les différents postes, optimisant ainsi les flux de travail et réduisant les gaspillages. Les avantages principaux des CMS résident dans leur flexibilité accrue, permettant une adaptation facile aux changements de produits ou de volumes de production sans perturbations majeures. Ils offrent également une efficacité opérationnelle améliorée grâce à la réduction des temps de configuration et des délais, grâce à la spécialisation des cellules de production. De plus, la concentration des compétences et de l'expertise sur des produits similaires peut améliorer significativement la qualité et la cohérence des produits finis. En termes de coûts, les CMS permettent une réduction significative des coûts de main-d'œuvre et des dépenses en capital grâce à une utilisation plus efficace des équipements et à une réduction des stocks en cours. Cependant, les CMS présentent aussi certains inconvénients tels que la complexité de la gestion, qui nécessite une planification et une coordination précises pour un fonctionnement efficace. Les investissements initiaux pour la conception et l'implémentation des cellules peuvent être conséquents. Par ailleurs, ces systèmes peuvent être moins

efficaces pour les productions qui nécessitent une grande personnalisation ou des tailles de lot très variables. De plus, une forte dépendance aux prévisions de la demande peut conduire à une sous-utilisation ou une surutilisation des ressources, affectant l'efficacité globale du système.

3.4.4 FMS

Les systèmes de fabrication flexibles (FMS) sont abordés sous l'angle de la mesure de la flexibilité, considérée essentielle pour gérer les incertitudes dans la production industrielle (Rogalski, 2011). L'objectif principal des FMS, selon Rogalski, est de permettre une production qui peut rapidement s'adapter aux changements de demande et de technologie, tout en maintenant des coûts et une qualité optimisée. Les FMS sont conçus pour être hautement adaptatifs et capables de traiter divers changements dans les conditions de production sans compromettre l'efficacité. Cela est réalisé grâce à l'intégration de technologies avancées et de systèmes de gestion qui permettent une reconfiguration rapide des opérations de production en réponse aux fluctuations de la demande ou aux introductions de nouveaux produits. (Chatterjee et al., 1984) souligne l'importance de mesurer et d'évaluer la flexibilité des systèmes de production pour garantir leur capacité à s'adapter et à répondre efficacement aux besoins changeants du marché. Le concept de flexibilité dans les FMS est décrit comme multi-dimensionnel, englobant la flexibilité de volume, de mix et d'expansion, et autres types de flexibilité jusqu'à la flexibilité humaines. Chacune ayant un impact direct sur la capacité d'un système de production à répondre aux variations de la demande. [?] propose des méthodologies pour évaluer ces différents types de flexibilité, soulignant que la compréhension précise et la gestion de ces aspects de flexibilité sont cruciales pour maximiser l'efficacité opérationnelle et la compétitivité. Les FMS, tels que décrits dans (Ranta & Alabyan, 1988), représentent une approche systématique et technologiquement avancée pour atteindre une flexibilité de production optimale, permettant aux entreprises de rester compétitives dans des environnements de marché dynamiques et incertains. La capacité à mesurer et à ajuster la flexibilité est présentée comme un élément clé pour le succès à long terme dans le secteur manufacturier.

3.4.5 Conclusion sur les paradigmes de systèmes de production

L'examen des divers paradigmes des systèmes de production révèle non seulement leurs caractéristiques distinctives mais aussi les liens et interdépendances qui les unissent. Ces relations sont essentielles pour comprendre comment les entreprises peuvent tirer parti de différents systèmes en fonction de leurs besoins spécifiques et des dynamiques du marché.

Les Systèmes de Fabrication Dédiés (DMS) servent de base à cette analyse en représentant la forme la plus traditionnelle de production (Tompkins et al., 2010). Bien que principalement conçus pour des productions à grand volume et peu variables, ils établissent un fondement sur lequel des améliorations en termes de flexibilité et de réactivité peuvent être explorées. Par exemple, bien que rigides, les DMS créent un contexte de production stable qui peut être progressivement adapté ou complété par des éléments des Systèmes de Fabrication Cellulaire (CMS) ou Reconfigurables (RMS) pour introduire une certaine flexibilité sans perturber l'intégrité du processus de production initial. Les CMS, en se concentrant sur la rationalisation des flux de production pour des familles de produits similaires, peuvent être vus comme une évolution naturelle des DMS lorsque l'entreprise cherche à améliorer l'efficacité tout en maintenant ou en augmentant sa capacité à répondre à des demandes de production plus diversifiées. Les CMS permettent de restructurer l'organisation des DMS en groupes plus flexibles et spécialisés, facilitant ainsi une réponse rapide et ciblée aux exigences changeantes sans nécessiter une reconfiguration complète des lignes de production. Les Systèmes de Fabrication Reconfigurables (RMS) poussent cette adaptabilité encore plus loin en permettant une transformation rapide de la configuration de production pour répondre à des changements encore plus imprévisibles et diversifiés.

Les RMS peuvent intégrer des aspects des DMS pour la production de base, tout en exploitant la flexibilité des CMS pour des ajustements rapides et efficaces. Cette symbiose entre DMS, CMS et RMS permet aux entreprises de maintenir un équilibre entre efficacité, coût et réactivité. Enfin, les Systèmes de Fabrication Flexibles (FMS) représentent l'apogée de cette évolution, intégrant et étendant les capacités des autres systèmes pour offrir une flexibilité maximale. Les FMS utilisent la technologie avancée pour faciliter une adaptation rapide à de nouveaux produits ou à des changements de volume, tout en maintenant les avantages de chaque système précédent en termes de coût et d'efficacité. Cette intégration fait des FMS le choix préférentiel pour les entreprises opérant dans des environnements hautement dynamiques et personnalisés, typiques de l'Industrie 4.0.

Ainsi, ces paradigmes, bien que distincts, ne fonctionnent pas en isolement. Ils forment plutôt un continuum où chaque système peut contribuer à la flexibilité et à l'efficacité globales de la production, en fonction des besoins stratégiques de l'entreprise et des conditions du marché. Cette compréhension intégrée aide les entreprises à naviguer avec succès dans le paysage complexe de la production moderne.

3.5 La flexibilité

Afin de mieux comprendre le sujet de recherche et l'idée principale derrière l'aspect de la flexibilité, nous avons sélectionné quatre axes principaux à détailler, en commençant par la définition de la flexibilité et sa typologie. En ajoutant à cela l'aspect de l'incertitude liée à la flexibilité, et enfin les dimensions et la mesure de la flexibilité pour quantifier son niveau en vue de la prise de décision.

3.5.1 Définition de la flexibilité

En science, la flexibilité a connu différentes interprétations liées à chaque domaine d'expertise, cette différence étant due au nombre énorme de variables qui ont un impact direct sur la manière dont un système peut réagir. Dans le contexte de l'industrie, (Sethi & Sethi, 1990) a défini la flexibilité comme l'adaptabilité d'un système à différents environnements, après quoi (Gerwin, 1993) a adopté la définition comme la capacité à répondre efficacement aux circonstances changeantes. (Upton, 1994) a ensuite décrit la flexibilité comme la capacité d'un système à changer ou réagir avec peu de pénalités en termes de temps, d'efforts, de coûts et de performances. L'évolution de la définition de la flexibilité est remarquable depuis le début des études sur ce sujet, commençant par la simple définition de l'adaptabilité, avant d'ajouter l'aspect de l'incertitude lorsque les circonstances peuvent changer de manière aléatoire, et mettant en évidence la rentabilité en termes de temps, d'efforts, de coûts et de performances pour rendre la définition plus critique dans l'industrie. Ces travaux ont représenté la base des recherches en termes de flexibilité dans l'industrie, mettant en lumière l'importance de ce concept et ajoutant une nouvelle dimension à ce que les entreprises peuvent améliorer en interne. Ces définitions restent axées sur le processus interne de l'entreprise et n'ont pas mentionné l'aspect de la connexion entre les entreprises, bien qu'il exerce une grande influence sur leur comportement en cas de changement de circonstances.

Des recherches récentes ont élargi la portée de la flexibilité pour aborder cet aspect de la connexion entre le client, le processus interne et le fournisseur et observer ce sujet d'un point de vue de la chaîne d'approvisionnement (Sánchez & Pérez, 2005). Cette nouvelle perspective a ajouté de nouvelles dimensions à la flexibilité pour la rendre plus complexe avec de nouvelles variables liées au point de vue du fournisseur ou du client, voire à la logistique soutenant ces connexions. Ajoutant également le fait que les dimensions de la flexibilité n'ont pas nécessairement la même importance en termes d'impact sur la flexibilité globale du système (Fayez et al., 2014) et peuvent également changer selon différents environnements, augmentant ou réduisant ainsi leur importance.

Dans le cadre des opérations d'entreprise, la distinction entre *front office* et *back office* est essentielle pour comprendre comment les différentes fonctions contribuent à la valeur globale et à l'efficacité organisationnelle. Le *front office* fait référence aux segments de l'entreprise qui sont directement impliqués dans la gestion du produit lui-même, incluant des aspects tels que la production, la logistique, et la gestion de la chaîne d'approvisionnement. Ces activités sont directement liées à la création, la manipulation, et la distribution des biens ou services offerts par l'entreprise, jouant un rôle crucial dans la satisfaction des exigences du client et la réalisation des objectifs commerciaux. À l'opposé, le *back office* désigne les activités qui ne touchent pas directement au produit mais qui soutiennent le *front office*. Cela inclut des fonctions telles que les systèmes d'information, les ressources humaines, la comptabilité et le support administratif. Ces opérations sont vitales pour le bon fonctionnement de l'entreprise, mais elles n'interagissent pas directement avec la chaîne de valeur du produit. Dans la littérature concernant la flexibilité organisationnelle, les chercheurs se sont traditionnellement concentrés sur le *front office*, reconnaissant son impact immédiat et visible sur la production et la livraison des produits. Cette focalisation met en lumière comment les adaptations dans la production, la logistique et autres activités directement liées au produit peuvent rapidement influencer la capacité de l'entreprise à répondre aux changements de la demande du marché. Toutefois, cette approche peut parfois négliger l'importance stratégique du *back office*, dont les fonctions, bien que moins visibles, sont indispensables au support et à l'efficacité du *front office*.

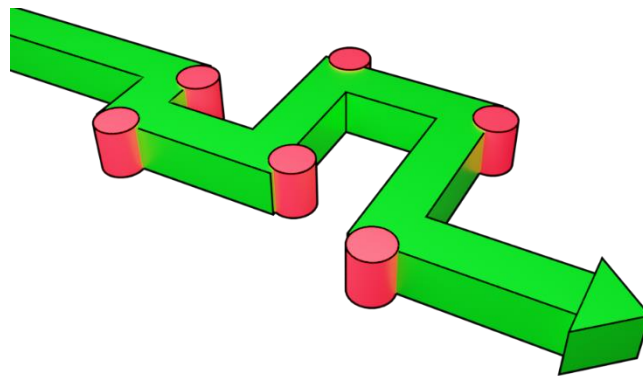


Figure 17. Illustration de la flexibilité

En s'appuyant sur les résultats de ces recherches précédentes, nous pouvons définir la flexibilité comme *la capacité d'un système à répondre efficacement à des événements attendus ou inattendus, prévenant les variations de profit, de temps et d'efficacité qui pourraient entraîner des changements de performance significatifs. Elle est multidimensionnelle, tant dans les dimensions physiques, de l'équipement jusqu'au regroupement de plusieurs usines, que dans les dimensions décisionnelles, du stratégique, à l'opérationnelle en passant par la tactique. Elle est observée comme une réponse aux décisions internes ou à l'incertitude externe qui peut être considérée comme une caractéristique ou une capacité d'un système à faire face à une large gamme d'événements ou de changements environnementaux.* Comme illustré dans la Figure 17, la flexibilité permet de tirer avantage des évènements (cylindres rouges) en se réorganisant pour tirer le maximum de profit (flèche verte).

3.5.2 Les types de flexibilité

Dans la littérature, il n'existe pas de définitions universelles des différents types de flexibilité. Notre objectif est de présenter une synthèse de ces définitions et de clarifier les frontières entre les onze principaux types de flexibilité généralement évoqués dans la littérature.

3.5.2.1 Flexibilité de la machine

La flexibilité machine est la capacité des machines à exécuter diverses opérations sans effort significatif de modification. Elle est une forme de flexibilité importante dans les systèmes de fabrication, souvent associée à des équipements tels que les machines à commande numérique (CNC) et les robots d'assemblage. En effet, ces équipements ont la capacité d'alterner entre des opérations de fraisage, perçage, taraudage, etc.

Cette flexibilité permet non seulement la réalisation de tâches variées, telles que l'usinage, le fraisage, le perçage ou l'assemblage, mais aussi la capacité d'adaptation aux changements des matériaux et la conformité à leurs spécifications (Sethi & Sethi, 1990). L'adaptation nécessaire pour changer d'opération, mesurée principalement en termes de temps et de coûts, évite les modifications majeures tout en permettant de petits ajustements comme le remplacement d'outils (Browne et al., 1984). En plus de ces aspects physiques, la flexibilité de la machine intègre également la capacité de s'adapter à de nouvelles opérations sans changements significatifs dans sa partie logicielle ou cybernétique, ce qui est capital lorsque ces modifications entraînent des coûts élevés et une complexité accrue. La mesure de cette flexibilité peut se faire par le nombre d'opérations différentes qu'une machine peut adopter sans dépasser un effort prédéfini, ce qui donne une indication claire de sa polyvalence opérationnelle. L'approche comprend également la "flexibilité des intrants", qui souligne la capacité de la machine à accepter des variations des matériaux entrants. Cette flexibilité est essentielle pour répondre aux besoins fluctuants de production sans nécessiter de rénovations importantes (Gerwin & Tarondeau, 1989). Cette flexibilité ne se limite pas à l'ensemble des opérations possibles mais englobe aussi la facilité de transition entre ces opérations ainsi que la flexibilité générale de l'équipement en interaction avec les autres équipements ou avec le système de production, selon les définitions établies par (Carter, 1986), et (Son & Park, 1987). Finalement, cette perspective globale sur la flexibilité de la machine est cruciale pour évaluer comment une machine spécifique peut améliorer la flexibilité de production d'un système, notamment dans des contextes où le système est en cours de spécification ou sujet à des changements majeurs à long terme (Gerwin, 1993). Ces caractéristiques sont renforcées par les contributions de divers auteurs mentionnés dans le Tableau 1 qui soulignent également l'importance de la flexibilité dans l'adaptation aux nouvelles exigences de production tout en maximisant l'efficacité opérationnelle.

3.5.2.2 Flexibilité d'opération (*Operation*)

La flexibilité opérationnelle est la capacité à réaliser une même opération de différentes manières (sur des machines substituantes) est essentielle (Sethi & Sethi, 1990). Par exemple un alésage pourrait se faire sur une machine de tournage ou sur une machine de fraisage. Dans ce contexte, nous nous concentrons sur une opération spécifique. Cette flexibilité constitue le prérequis nécessaire à la flexibilité des processus et des programmes

La flexibilité opérationnelle d'une pièce reflète sa capacité à être produite selon différents plans de processus (gamme opératoire), offrant ainsi diverses séquences d'opérations nécessaires pour sa fabrication (Browne et al., 1984). Cette flexibilité, inhérente à la pièce, permet des adaptations telles que le changement des opérations ou de leur ordre, par exemple, choisir entre l'ébavurage par un outil rotatif ou à la brosse métallique pour obtenir des résultats similaires (De Meyer et al., 1989). En outre, cette flexibilité peut être quantifiée par le nombre de plans de traitement alternatifs possibles pour la production de la pièce, ce qui inclut la possibilité de modifier la séquence des opérations entre différentes machines (Sethi & Sethi, 1990). Cela démontre la capacité d'une pièce à être fabriquée de manière interchangeable sur diverses machines, tels que le fraisage ou le perçage, garantissant ainsi la même qualité de résultat (Chatterjee et al., 1984). Cette forme de flexibilité étendue implique également la possibilité de varier l'ordre des opérations (par exemple, effectuer les opérations 1,2,3 ou 2,1,3) sur une même machine, augmentant ainsi la flexibilité globale du système de production. Toutefois, cette

capacité à ajuster les séquences opérationnelles peut accroître la complexité de la gestion des compétences et la charge cognitive des opérateurs, influençant potentiellement la qualité des produits finis (Weckenborg et al., 2024). En consolidant ces aspects, la flexibilité opérationnelle devient un élément clé pour évaluer la capacité d'un système de production à s'adapter à des changements de conception ou à des exigences de production variées, tout en maintenant efficacité et qualité dans le processus de fabrication.

3.5.2.3 Flexibilité de produit (*Product*)

La flexibilité du produit se définit comme la capacité et la facilité d'introduire un nouveau produit ou de substituer un produit existant (Sethi & Sethi, 1990). Par exemple en modifiant ou en adaptant facilement un produit existant pour le transformer en un nouveau produit ou un substitut. Comme une entreprise qui fabriquera des composants similaires pour plusieurs marques.

La flexibilité du produit est essentielle pour l'adaptabilité des systèmes de production aux exigences changeantes du marché. Concrètement, la flexibilité du produit se manifeste par la capacité d'une entreprise à ajuster les combinaisons de pièces produites actuellement, en transformant rapidement et efficacement le mix de production pour inclure de nouvelles conceptions. Cette réactivité est importante pour maintenir la compétitivité sur le marché et est particulièrement valorisée dans les industries où l'innovation est rapide (Weckenborg et al., 2024). Dans le contexte de la fabrication, ajouter de nouvelles pièces nécessite souvent une reconfiguration, mais la flexibilité du produit cherche à minimiser le temps et les coûts associés à ce processus. C'est cette capacité à changer sans effort excessif qui distingue la flexibilité du produit de la flexibilité du processus. Les études, telles que celle menée par (Lim & Lee, 1994), montrent que de nombreuses entreprises perçoivent la flexibilité de fabrication principalement en termes de flexibilité du produit. Cette flexibilité n'est pas seulement une question de capacité de production, mais aussi de conception. Elle implique la redéfinition des produits pour utiliser des composants similaires ou interchangeables, ce qui facilite la création de produits substituables et soutient une gestion plus efficace des ressources (Brill & Mandelbaum, 1987). De plus, elle permet une planification réactive et une programmation flexible, essentiels en cas d'événements perturbateurs dans l'environnement de production (ZELENOVIĆ, 1982)(Chatterjee et al., 1987) Enfin, la flexibilité du produit peut être mesurée par le temps ou le coût requis pour passer d'un mélange de pièces à un autre, offrant un indicateur tangible de l'agilité du système de production. Ce paramètre est fondamental pour évaluer l'efficacité avec laquelle une entreprise peut ajuster ses opérations pour répondre à des changements imprévus ou à des opportunités de marché, maximisant ainsi sa capacité à innover tout en contrôlant les coûts.

3.5.2.4 Flexibilité de processus (*Process*)

La capacité du système à fabriquer un ensemble de produit (famille de produit) ou la famille des pièces qu'un système de production peut fabriquer (Sethi & Sethi, 1990). L'objectif est de réduire les coûts associés aux réglages et à la reconfiguration (en assurant une adéquation entre le temps fixe de réglage et les temps opératoires), ce qui permet de diminuer la taille des lots et d'apporter davantage de flexibilité dans la planification. Par exemple, comme à FPT-BLY où l'usinage joue un rôle de fournisseur direct au montage. Plus l'usinage pourra réduire sa taille de lot, en restant efficace, plus il sera réactif aux demandes du montage.

Contrairement à la flexibilité d'opération qui est liée à un produit, cette flexibilité est principalement liée à l'ensemble de produit (famille de produit) ou la famille des pièces qu'un système de production peut fabriquer. Cette flexibilité, souvent décrite comme la capacité du système à s'adapter sans coûts supplémentaires importants est essentielle pour maintenir l'efficacité opérationnelle face à des demandes de production fluctuantes (Browne et al., 1984). Elle est aussi connue sous plusieurs

appellations telles que la flexibilité des mélanges de type de produit, mentionnée par (Gerwin, 1993) et (Carter, 1986), et la flexibilité des tâches, qui selon (Buzacott, 1982), se réfère à l'aptitude du système à ajuster ses opérations pour gérer les changements dans les tâches traitées. (Atkinson, 1984) et (Melcher et al., 2002) parlent de *part-mix flexibility* pour décrire la capacité à gérer différents assemblages de pièces. Ce concept est également étendu par (Yamashina et al., 1986), qui introduisent la variante *flexibility*, indiquant la capacité à produire des variantes de produits. (Brozovic, 2018) considère qu'un système est flexible en termes de processus si les coûts de fabrication restent stables malgré la diversification des produits. La flexibilité à court terme, mise en avant par (Warnecke & Steinhilper, 1982), concerne la production rapide et efficace d'un ensemble varié de pièces. La flexibilité du processus est aussi définie par sa capacité à varier l'éventail des types de pièces produites sans ajustements majeurs, utilisant la même mise en œuvre de machines pour une famille de produits. Ce type de flexibilité, connu sous divers noms comme la flexibilité de *job* ou de *mix*, vise principalement à réduire les tailles de lots et les coûts d'inventaire, améliorant ainsi la réactivité et la flexibilité économique du système (Slack, 1988). La complexité de cette flexibilité réside dans sa capacité à permettre une planification et une programmation réactives, surtout lors d'événements disruptifs (Weckenborg et al., 2024). Le volume de types de pièces que le système peut produire sans temps de configuration majeur permet de mesurer cette flexibilité.

3.5.2.5 Flexibilité de production

La flexibilité de production se définit comme la capacité de fabriquer un ensemble de produits ou des familles de produits en exploitant la capacité de production existante, sans avoir besoin d'ajouter des équipements importants (en tenant compte du nombre de familles et de références) (Sethi & Sethi, 1990). Lors de la conception de nouveaux produits, il est essentiel de prendre en considération la capacité et les compétences existantes. C'est une flexibilité essentielle pour les usines d'un même groupe qui sont en compétition entre elles pour obtenir de l'investissement.

La flexibilité de la production décrit l'éventail des types de pièces qu'un système de fabrication peut produire sans nécessiter l'ajout de grands équipements, permettant seulement l'introduction de ressources mineures comme de nouveaux outils pour élargir la gamme de production (Browne et al., 1984) (Warnecke & Steinhilper, 1982). Cette capacité permet à une entreprise de rester compétitive sur un marché où la demande pour de nouveaux produits est fréquente, en minimisant le temps nécessaire pour lancer de nouveaux produits ou pour apporter d'importantes modifications aux produits existants (Carter, 1986). Contrairement à la flexibilité du produit, qui se concentre sur l'adaptation des produits existants pour répondre à de nouveaux besoins, la flexibilité de la production vise à élargir l'éventail de ce qui peut être produit sans transformations majeures de l'infrastructure existante. Elle permet donc des ajustements significatifs au sein du système de production, mais sans les coûts associés à l'acquisition de nouveaux équipements majeurs. La flexibilité de la production, selon (Slack, 1988), est une flexibilité de gamme qui permet de répondre efficacement aux changements du marché sur le long terme. Cette approche est appuyée par (Browne et al., 1984) et (Carter, 1986) qui considèrent que la flexibilité de la production inclut non seulement la capacité de fabriquer une grande variété de pièces mais aussi la facilité de passer d'une production à une autre. (Ropohl, 1971) et (Buzacott & Mandelbaum, 1985) lient également ce concept à la flexibilité structurelle et opérationnelle du système de fabrication, où la capacité d'adaptation rapide et efficace est cruciale. (Fine & Freund, 1990) et (Kusiak, 1985) développent ce concept en soulignant que la flexibilité des modules de fabrication et des systèmes d'usine doit permettre une diversification rapide des types de produits sans investissements lourds en équipement. (H. Hayes; C. Wheelwright, 1985), ainsi que (Stecke & Suri, 1986), suggèrent que la flexibilité de la production peut être envisagée comme une dimension critique de la matrice produit-processus qui influence directement la compétitivité de l'entreprise. La complexité de la

flexibilité de la production réside dans sa capacité à intégrer de nouvelles capacités de production de manière fluide et rentable(Weckenborg et al., 2024), où la taille de l'ensemble des pièces que le système peut produire et le temps de réaction nécessaire pour s'adapter aux demandes du marché sont des indicateurs clés de cette flexibilité.

3.5.2.6 Flexibilité de programme (*Program*)

La flexibilité de programmation désigne la capacité du système à fonctionner pratiquement sans surveillance pendant une période prolongée (par exemple, sur 3 équipes et plusieurs jours), sans compromettre le programme de production (Sethi & Sethi, 1990). Nous estimons que cette définition peut être étendue en incluant la capacité d'auto-adaptation sans intervention externe (fonctionnant de manière autonome). La capacité à proposer une planification et un ordonnancement de production flexibles et auto-ajustables doit être considérée comme un élément important de ce type de flexibilité.

Cette capacité est importante pour maintenir l'efficacité opérationnelle, surtout pendant les périodes où la supervision directe est réduite, comme pendant les deuxièmes et troisièmes équipes. Selon (Buzacott & Mandelbaum, 1985), cette forme de flexibilité, que l'on peut aussi qualifier de flexibilité d'état, permet au système de rester opérationnel malgré les variations potentielles dans le processus de production. (Buzacott, 1982) a introduit la notion de flexibilité adaptative, qui est une capacité du système à s'ajuster de façon autonome aux changements sans intervention humaine, réduisant ainsi les interruptions potentielles et augmentant la productivité. (Jaikumar, 1984) précise que cette autonomie est particulièrement valorisée lorsqu'il est nécessaire de réaliser des inspections, des réparations, ou des maintenances qui sont habituellement effectuées pendant les premières équipes (Dixon, 1992). L'efficacité de cette flexibilité est améliorée par la réduction des temps de préparation, l'amélioration des procédures d'inspection et de calibrage, et l'utilisation optimisée des dispositifs de fixation et des outils, comme noté par (Jaikumar, 1984). Cependant, planifier et ordonnancer la production sans tenir compte des ajustements en temps réel peut s'avérer difficile. La flexibilité du programme doit donc également considérer la gestion efficace de ces ajustements pour minimiser les perturbations et maximiser le temps de fonctionnement (Buzacott, 1982). La mesure de cette flexibilité peut être quantifiée par le pourcentage de temps de fonctionnement effectif attendu durant un quart de travail ou une journée de production, offrant ainsi un indicateur de la stabilité opérationnelle et de la capacité de réaction du système aux exigences changeantes du marché.

3.5.2.7 Flexibilité d'acheminement (*Routing*)

La flexibilité d'acheminement se définit comme la capacité du système à fabriquer un produit en utilisant des gammes alternatives, qui peuvent solliciter des machines différentes (mais substituables), tout en respectant l'ordre des opérations (la succession des opérations est préservée) ou en modifiant la séquence des opérations si nécessaire (Sethi & Sethi, 1990). Pour cela, il est essentiel d'avoir la flexibilité au niveau de l'acheminement des pièces en cours de fabrication. Par exemple, on peut distinguer entre un AGV (véhicule autoguidé), qui suit une trajectoire prédéfinie, et un AMR (robot mobile autonome), qui possède une trajectoire dynamique.

La flexibilité de l'acheminement dans un système de fabrication est fondamentale pour la gestion optimale de la production. Cette flexibilité permet à un système de produire une pièce en utilisant différents itinéraires à travers l'ensemble des équipements disponibles, en exploitant diverses machines et opérations dans des séquences variées, telles que machine 1, 2, 3 ou machine 3, 1, 2 (Kegg, 1984).(Stecke & Suri, 1986) Ce type de flexibilité, clairement distinct de la flexibilité opérationnelle, améliore l'efficacité de la planification des pièces et contribue à un meilleur équilibrage des charges sur les machines. En introduisant cette variabilité dans les itinéraires, la flexibilité de l'acheminement augmente la résilience du système face aux événements perturbateurs, permettant ainsi la production

continue malgré des interruptions potentielles (Gerwin, 1989). Ce niveau de flexibilité est particulièrement important car il influence directement la gestion de la manutention des matériaux, englobant la complexité de l'alimentation des pièces aux machines ou aux lignes de production. De plus, la capacité d'un système à offrir plusieurs chemins pour traiter un type de pièce peut être mesurée par le nombre moyen de voies possibles qu'un système peut soutenir, offrant ainsi un indicateur précis de la flexibilité de l'acheminement (Chatterjee et al., 1984) (Chung & Chen, 1989). Cette mesure est essentielle pour évaluer la capacité du système à s'adapter aux variations de la production de manière efficiente sans compromettre la qualité ou la continuité des opérations (Weckenborg et al., 2024). Les discussions autour de cette flexibilité se retrouvent dans les travaux de nombreux chercheurs tels que (Atkinson, 1984) (Kegg, 1984), qui ont tous souligné l'importance de la capacité du système à réacheminer les pièces en cas de panne de machine. Cette capacité est également abordée par (Jaikumar, 1984) (Herrman et al., 2011) (Mostert, 2011) qui ont noté l'importance de cette flexibilité dans la gestion optimale des ressources de production et la réduction des temps d'arrêt.

3.5.2.8 Flexibilité du système de manutention (*Material handling*)

La flexibilité d'un système de manutention dépend de sa capacité à déplacer différents types de pièces, en tenant compte de variables telles que la forme, le poids, les dimensions et la fragilité, vers une position de destination pour les traiter conformément aux spécifications de l'installation. (Sethi & Sethi, 1990). Par exemple, certains systèmes de préhension offrant une grande flexibilité de manutention incluent les préhenseurs à vide d'air et les préhenseurs aimantés.

Cette capacité couvre les actions essentielles telles que le chargement et le déchargement des pièces, ainsi que leur transport d'une machine à l'autre et leur stockage potentiel sous diverses conditions au sein de l'installation. L'intégration de technologies avancées comme les robots de manutention, les véhicules guidés automatisés (AGV) et les robots mobiles autonomes (AMR), en plus des convoyeurs automatisés, augmente la capacité du système à traiter de nouveaux produits tout en ajoutant à la complexité de la maintenance et du traitement de l'information du système (Rattner et al., 1988). Les travaux (Diebold, 1952), (Stecke & Suri, 1986) et (Chatterjee et al., 1987) ont défini la capacité du système de manutention en termes d'emplacement physique de chaque groupe de machines, des liens entre chaque paire de groupes et au sein de chaque groupe, ainsi que du temps nécessaire pour chaque mouvement possible entre les machines. Ces informations permettent de déterminer l'ensemble des chemins matériels possibles qui peuvent être pris en charge dans l'usine. (Vilko et al., 2014) met en évidence l'importance de la capacité à ajuster les itinéraires pour accommoder des pièces de différentes formes et tailles, et la nécessité de réajuster les parcours en cas d'expansion de l'installation. La flexibilité dans ce contexte peut être mesurée par le ratio du nombre de chemins que le système peut soutenir par rapport au nombre de chemins qu'un système universel pourrait supporter (Weckenborg et al., 2024). Cette définition inclut également la flexibilité des montages de palettes, qui reflète le degré de liberté dans les plannings de chargement des pièces, selon (Zhong et al., 2017). Cette approche globale est essentielle pour comprendre comment un système de manutention spécifique peut augmenter la flexibilité de production dans un environnement industriel dynamique.

3.5.2.9 Flexibilité de volume

La flexibilité du volume dans un système de fabrication se définit par sa capacité à fonctionner de manière rentable à différents niveaux de production, en tenant compte exclusivement des niveaux de production réalisables et rentables (Sethi & Sethi, 1990). Cela nécessite de trouver un équilibre entre les coûts de réglage/configuration et les coûts opérationnels. Par exemple, en cas de baisse de la demande, la flexibilité du volume permet de réduire la capacité de production maximale d'une ligne de production afin de maintenir sa rentabilité. Pour ce faire, elle permet d'ajuster le nombre de machines ou de personnel en conséquence.

Cette flexibilité doit prendre en compte deux aspects principaux : le temps de réaction et l'amplitude des variations, sans pour autant étendre la capacité de production existante, afin d'exploiter au mieux la capacité déjà en place (Slack, 2005), (Gerwin, 1993; Kegg, 1984) décrivent la flexibilité du volume comme similaire à la flexibilité de la demande, telle que conceptualisée par (Son & Park, 1987), qui se concentre sur la capacité à ajuster les volumes de production en réponse aux demandes du marché tout en conservant une rentabilité. Cette forme de flexibilité est également comparable à la flexibilité de livraison décrite par (Chatterjee et al., 1984), qui implique la capacité à modifier les dates de livraison prévues pour s'adapter aux fluctuations de la demande sans engendrer de coûts supplémentaires. La complexité principale de cette flexibilité réside dans sa relation avec la flexibilité du système de manutention des matériaux et des activités d'entreposage. Il est crucial que le système puisse s'adapter rapidement et efficacement à la variation des besoins sans nécessiter des investissements onéreux en nouvelles capacités de production ou en espace de stockage supplémentaire (Weckenborg et al., 2024). La mesure de la flexibilité du volume peut se faire en déterminant la plus petite quantité de produit qui peut encore être produite de manière rentable (Chan et al., 2017), ce qui permet d'évaluer l'efficacité avec laquelle le système de fabrication peut répondre à des changements sans compromettre sa viabilité économique.

3.5.2.10 Flexibilité d'expansion

La flexibilité d'expansion d'un système de fabrication indique la facilité avec laquelle sa capacité et ses capacités peuvent être augmentées pour répondre aux besoins (Sethi & Sethi, 1990). Cette flexibilité permet l'introduction de nouvelles machines ou technologies grâce à la modularité de l'équipement, à l'utilisation de machines polyvalentes ou à l'ajout de nouveaux quarts de travail. Par exemple, lors de l'introduction d'un nouveau produit sur une ligne de production existante, augmenter la cadence de production de ce nouveau produit prendra du temps. Il est alors préférable de ne pas investir dans toutes les machines dès la première année, mais de répartir l'investissement sur plusieurs années. Cela n'est possible que si la ligne dispose d'une grande flexibilité d'expansion, ce qui permet d'ajouter des machines selon les besoins sans avoir d'impact négatif sur la production.

La capacité, dans ce contexte, se mesure en termes de taux de production par unité de temps, tandis que la capacité englobe des caractéristiques telles que la qualité, l'état technologique, et d'autres types de flexibilités. Contrairement à la flexibilité de volume, qui s'attache aux ajustements de production au sein des capacités existantes, la flexibilité d'expansion se concentre sur l'accroissement maximal réalisable de la production (Browne et al., 1984). Elle inclut non seulement les coûts directs associés à l'expansion (Carter, 1986), mais aussi les coûts indirects découlant des interruptions de production nécessaires lors de l'expansion et la rapidité avec laquelle l'expansion peut être mise en œuvre (Atkinson, 1984). (Buzacott & Mandelbaum, 1985) élargissent cette définition en incluant la capacité du système à se contracter. Ce type de flexibilité est déterminant pour la réactivité d'une entreprise, en particulier lorsqu'il s'agit de pénétrer de nouveaux marchés ou de répondre à des augmentations soudaines de la demande. Elle permet une adaptation graduelle de l'expansion du système, ce qui facilite une planification plus stratégique et moins disruptive des activités de production. Les impacts humains et sociaux de ces changements doivent également être pris en compte, car ils jouent un rôle déterminant dans la réussite de l'expansion (ZELENOVIĆ, 1982) (Son & Park, 1987). La mesure de cette flexibilité peut se faire en évaluant l'effort et les coûts globaux nécessaires, tant en termes de temps que de ressources, pour ajouter une capacité donnée au système. Cette approche holistique permet de comprendre et d'optimiser les ressources existantes tout en préparant le système à des adaptations futures.

3.5.2.11 Flexibilité du Marché (*Market*)

La flexibilité du marché désigne la capacité d'un système de fabrication à s'adapter rapidement et efficacement à un environnement de marché en constante évolution. Ce concept souligne l'importance de l'orientation vers le marché dans les décisions stratégiques d'un système de fabrication. (Sethi & Sethi, 1990). Cette flexibilité permet d'allouer la capacité de production de manière flexible à différents marchés afin de suivre les besoins et tendances.

La flexibilité du marché est importante pour la survie d'une entreprise dans des environnements incertain, marqués par des changements dans les préférences des clients, des incertitudes concernant les sources d'approvisionnement, et des innovations technologiques rapides. Dans ce cadre, (Gerwin & Tarondeau, 1989) identifient les flexibilités de produit, de processus et de volume comme étant directement orientées vers le marché, en y ajoutant la flexibilité de modification qui permet d'ajuster les caractéristiques d'un produit en fonction des incertitudes du marché au moment de la conception. Cette flexibilité permet des ajustements mineurs dans la conception pour mieux répondre aux attentes des clients. De plus, la flexibilité du marché englobe aussi la flexibilité de distribution, comme décrite par (Ranta, 1989), qui inclut la gestion de l'inventaire, du transport et des dispositifs administratifs pour offrir une flexibilité en termes de lieu, de temps, de taille et d'assortiment des livraisons, afin de satisfaire les besoins spécifiques des clients. La principale complexité de cette flexibilité réside dans la nécessité de maintenir une vision intégrée de bout en bout et de prendre en compte tous les maillons de la chaîne d'approvisionnement, du client au fournisseur. La mesure de la flexibilité du marché peut s'évaluer à travers les efforts en termes de temps et de coûts requis pour introduire un nouveau produit sur le marché, ainsi que pour augmenter ou diminuer le volume de production en réponse aux fluctuations de la demande.

3.5.2.12 Conclusion et perspective

L'analyse de la flexibilité dans un environnement industriel, telle qu'elle est présentée, couvre avec précision et détail les différents aspects de la flexibilité qui sont cruciaux pour la compréhension et l'amélioration de la capacité d'adaptation des systèmes de production. Cependant, cette exploration révèle également des manques importants et indique des directions pour des recherches futures. Il est essentiel de reconnaître que la discussion se concentre largement sur la flexibilité directement liée au produit et aux processus de fabrication, négligeant ainsi d'autres types de flexibilité qui, bien que n'étant pas directement liés au produit, sont fondamentaux pour la compétitivité et la réactivité des entreprises. La flexibilité organisationnelle et la flexibilité stratégique, par exemple, permettent aux structures internes de l'entreprise et à ses stratégies de s'adapter rapidement aux changements, jouant un rôle tout aussi vital dans le succès industriel. L'impact des innovations technologiques sur la flexibilité représente une autre dimension qui mérite une attention approfondie. L'intégration de technologies émergentes comme l'intelligence artificielle, l'Internet des Objets et la fabrication additive peut ouvrir de nouvelles voies pour augmenter la flexibilité, notamment en permettant une personnalisation de masse et en réduisant les délais de mise sur le marché. Cela souligne l'importance de rester à la pointe de la technologie et d'explorer continuellement de nouvelles méthodes pour intégrer ces avancées dans les systèmes de production. De plus, la gestion de la flexibilité est directement liée à la résilience des systèmes de production. Une analyse plus poussée sur la manière dont la flexibilité peut contribuer à la planification de la continuité des activités et à la gestion des risques pourrait offrir des insights précieux sur la manière de maintenir des opérations stables malgré les incertitudes. Cela inclut la capacité d'ajuster rapidement les niveaux de production en réponse à des variations de la demande ou à des pannes d'équipement, soulignant l'importance d'une planification et d'une préparation minutieuses.

En conclusion, bien que la discussion actuelle offre une base solide pour comprendre la flexibilité dans les systèmes de production, elle met également en lumière le besoin d'une exploration plus

profonde et d'une évaluation plus rigoureuse de ce concept. La reconnaissance que la flexibilité est un concept dynamique, nécessitant une adaptation continue aux changements technologiques, de marché, et opérationnels, est essentielle pour le succès dans l'environnement industriel moderne.

3.5.2.1 Discussion

Nous constatons que les différents types de flexibilité sont étroitement corrélés, ce qui rend complexe la détermination de leur périmètre. Il est difficile de cadrer clairement et distinctement les types de flexibilité directement liés au système de production. Les cinq premiers types de flexibilité (machine, opération, produit, processus et production) sont interdépendants, et la flexibilité de l'un dépend de la flexibilité de l'autre. Par exemple, une machine d'usinage flexible qui permet plusieurs types d'opérations (fraisage, perçage, etc.) n'a de pertinence que si le produit possède une flexibilité d'opération.

Il est important de se poser la question de la classification des types de flexibilité afin de définir leur contour. Nous constatons déjà que certaines flexibilités sont fondamentales, telles que la flexibilité du produit ou de la machine, tandis que d'autres découlent de plusieurs types de flexibilité, comme la flexibilité de processus et la flexibilité de production. Cette question sur la classification est l'objet de la section suivante

3.5.3 Classification de la flexibilité

Comme discuté dans la section précédente, l'importance de l'étude de la classification des types de flexibilité réside dans la clarification et l'amélioration de la compréhension de ces types de flexibilité. Avec l'accent mis sur l'étude de la flexibilité dans l'industrie, le concept des dimensions de la flexibilité a émergé et suscité l'intérêt des chercheurs. L'objectif étant de regrouper les types de flexibilité en fonction de la dimension commune dans laquelle ils opèrent.

Pour (Sethi & Sethi, 1990), les types de flexibilité qu'ils choisissent fonctionnent dans trois dimensions représentées dans le Tableau 2.

Tableau 2. Dimensions de la flexibilité selon Sethi et Sethi (1990)

Composant ou flexibilité basique	Flexibilité de système	Flexibilité agrégée
Machine	Processus	Programme
Manutention	Acheminement	Production
Operations	Produit	Marché
	Volume	
	Expansion	

- Flexibilités de base ou de composants : regroupant les flexibilités de la machine, de la manutention des matériaux et des opérations, cette catégorie constitue le fondement de la flexibilité nécessaire au fonctionnement des autres types. Cette dimension est plus orientée vers des composants individuels tels que les machines ou les opérations.
- Flexibilités du système : à une échelle de travail plus large, elles englobent les différentes caractéristiques du système de fabrication telles que le processus et le volume.
- Flexibilités agrégées : regroupent les types de flexibilité de manière plus générique.

(Sánchez & Pérez, 2005) ont adopté la même analogie que pour leur catégorisation des types de flexibilité de la chaîne d'approvisionnement (Tableau 3), en séparant le processus et la logistique en trois niveaux qui diffèrent par la largeur de leur définition :

Tableau 3. Dimensions de la flexibilité selon Sánchez & Pérez 2005

Basique - Atelier	Système - Entreprise	Agrégé - chaîne
Produit	Livraison	Lancement
Volume	Report	Réponse
Acheminement	Stockage	Approvisionnement
		Accès

Néanmoins, la caractérisation la plus fondamentale des types de flexibilité réside dans la différenciation entre la flexibilité du processus et celle de la chaîne d'approvisionnement, créant ainsi la première grande dimension de la variabilité de la flexibilité entre le processus interne et la logistique externe du système de fabrication.

La deuxième grande dimension de la flexibilité dans la littérature concerne le niveau de décision, variant entre le niveau opérationnel et stratégique en termes de prise de décision. Ce niveau évolue en fonction du moment d'application de la décision.

En nous appuyant sur ces classifications, nous proposons une classification plus étendue en y intégrant une dimension supplémentaire concernant l'impact de ces types de flexibilité sur chaque domaine de l'entreprise. Cette proposition est présentée dans la section 4.1.2.

3.5.4 Axes de mesure de la flexibilité

Pour donner suite à l'identification et à la classification des types de flexibilité, l'objectif principal de l'analyse de la flexibilité est de déterminer avec précision le niveau de flexibilité du système de fabrication afin de prendre des décisions éclairées. Ainsi, mesurer chaque type de flexibilité constitue une étape essentielle pour évaluer le niveau global et les niveaux individuels de flexibilité. Cette évaluation permet ensuite d'élaborer des plans d'action pour améliorer et maintenir ces niveaux.

Prenons, par exemple, le niveau de flexibilité du produit, qui peut être mesuré par le temps ou le coût nécessaire pour passer d'une conception de pièce à une autre (Browne et al., 1984). (Jaikumar, 1984) le mesure en utilisant le nombre et les types de pièces produites par an. De même, la flexibilité d'expansion peut être évaluée par le rapport entre le coût de doublement de la capacité de production et son coût initial (Sethi & Sethi, 1990). Une autre approche consiste à mesurer la taille maximale que le système peut atteindre, bien que cette mesure nécessite d'autres indicateurs pour évaluer pleinement l'expansion potentielle du système (Koste et al., 2004). Ils ont également répertorié différentes méthodes pour évaluer la flexibilité du marché, comme le coût de la pénurie en cas de retard pour satisfaire les commandes des clients.

Pour faciliter la détermination des mesures pertinentes, (Gerwin, 1993) et (Upton, 1994) ont initié deux axes largement acceptés pour mesurer la flexibilité, à savoir la portée et la réponse.

(Sánchez & Pérez, 2005) ont approfondi ces dimensions, en se concentrant sur ce que le système peut proposer comme alternatives pour s'adapter et sur la variété de solutions permettant de continuer à fonctionner efficacement. Cette dimension, appelée portée, reflète l'efficacité du système et peut être mesurée par le nombre de solutions alternatives disponibles. Par exemple, la portée de la flexibilité de distribution peut indiquer dans quelle mesure le système peut distribuer ses produits. La dimension de la réponse mesure la facilité d'adaptation au changement, en termes de temps de réaction, de coût ou de capacité, et est associée à l'efficacité du système. Par exemple, le nombre d'unités pouvant être déployées pour répondre à la demande du client représente la réponse de la flexibilité de distribution.

Cette méthodologie de mesure est particulièrement appropriée pour évaluer la flexibilité, car elle fournit des informations pertinentes permettant de mieux comprendre le niveau de flexibilité de chaque type. Mesurer la portée permet de déterminer l'état actuel du système pour chaque paramètre et

d'identifier les limitations pouvant être améliorées avec des plans d'action appropriés. En mesurant la réponse, on peut évaluer les différentes solutions que le système peut adopter pour s'adapter à chaque nouvel événement, ce qui peut influencer le rythme de fonctionnement normal et suggérer la variété de solutions aidant le système à répondre efficacement à ces événements.

En conclusion, les axes de mesure de la flexibilité, à savoir la portée et la réponse, offrent un cadre structuré pour évaluer le niveau de flexibilité des systèmes de fabrication. Ces axes permettent de comprendre et d'améliorer les capacités d'adaptation des systèmes face aux changements. Toutefois, il manque une application pratique concrète de ces mesures, ce qui est essentiel pour intégrer pleinement ces concepts dans une méthodologie de mesure de la flexibilité.

La partie suivante présente l'état de l'art des méthodologies de mesure de la flexibilité, offrant un aperçu des approches existantes et des défis à relever pour développer une méthodologie pratique et applicable.

3.5.4.1 Méthodes de mesure

Une recherche approfondie de la littérature révèle un grand nombre de méthodes pour mesurer la flexibilité dans les systèmes de production. Cela montre un intérêt actif pour ce sujet, mais aussi un manque d'informations consolidées sur la flexibilité, ce qui entraîne l'absence de méthodes de mesure généralement acceptées. Étant donné qu'une partie de nos contributions de cette thèse se concentre sur la méthodologie de mesure de la flexibilité, nous examinerons dans cette section diverses méthodes et approches de mesure, en adoptant une perspective critique.

Bien que les mesures existantes soient souvent théoriques, notre objectif est de souligner leurs limitations et les possibilités d'amélioration, en mettant l'accent sur leur applicabilité dans des contextes réels. De nombreuses méthodes d'évaluation actuellement en usage pourraient être simplifiées et optimisées, comme le montrent les travaux préliminaires que nous examinons ici.

Notre but est de tirer des conclusions pertinentes sur les pratiques existantes dans l'évaluation de la flexibilité afin de contribuer à l'élaboration d'une méthode d'évaluation plus efficace et pratique pour les systèmes de production.

Méthodologie de la logique floue

La méthodologie d'évaluation de la flexibilité développée par (Ali & Seifoddini, 2006) utilise une approche basée sur la logique floue pour évaluer la flexibilité des systèmes de production en tenant compte des divers éléments tels que les ressources humaines, les capacités de production, et la gamme de produits. Cette approche considère des facteurs comme la qualité, le temps, la disponibilité et l'expérience du personnel, notés par des termes vagues tels que "élevé", "moyen", ou "très ancien". Leur modèle intègre ces variables dans un environnement de simulation pour prédire les réactions du système face aux fluctuations de la demande et aux changements dans la configuration de la production. L'évaluation est réalisée par des simulations qui appliquent des règles logiques floues, permettant ainsi une flexibilité dans l'interprétation des données et offrant une analyse de la flexibilité de mix et de volume à différents niveaux de l'organisation, allant des machines aux lignes de production complètes. Toutefois, cette méthode a ses limites, notamment son applicabilité qui varie selon le secteur industriel spécifique et le contexte d'application. Elle ne prend pas en compte les coûts liés aux changements de production, limitant ainsi les évaluations à des aspects non économiques. De plus, cette méthode n'évalue pas la flexibilité d'expansion, ce qui pourrait être crucial pour les entreprises cherchant à ajuster leurs capacités de production face à des changements à long terme. Un autre point critique de cette méthodologie est son manque de considération pour la dimension temporelle de manière précise, ce qui peut affecter l'efficacité des prévisions et des planifications. La dépendance aux jugements subjectifs

pour évaluer l'importance des différents paramètres ajoute une autre couche d'incertitude, rendant les conclusions potentiellement biaisées par les perceptions personnelles de l'évaluateur. Cette subjectivité, combinée avec l'usage de classifications qualitatives pour les paramètres influençant la production, peut restreindre la clarté et la comparabilité des résultats obtenus.

Méthodologie de Pénalité de Changement

(Chryssolouris, 2013) introduit une approche originale pour évaluer la flexibilité d'un système de production, basée sur les coûts de pénalité associés à l'insuffisance de flexibilité, à travers le concept de "pénalité de changement" (POC). Cette méthode évalue la flexibilité en calculant les coûts supplémentaires engendrés par les modifications nécessaires dans la production. Plus précisément, si un système peut s'adapter à un changement sans coûts supplémentaires, il est considéré comme pleinement flexible, avec une valeur POC de zéro. À l'inverse, des valeurs POC élevées indiquent une moindre flexibilité, traduisant des coûts de changement accrus. Le processus d'évaluation utilise un modèle d'arbre des événements pour estimer ces coûts en fonction de la probabilité de divers scénarios futurs. Par exemple, un moteur produisant 1 000 pièces par jour à moindre coût est jugé plus flexible qu'un autre dont les coûts de production sont significativement plus élevés pour un volume similaire. Cette méthode permet donc d'analyser et de comparer les coûts associés à différents scénarios de production, offrant ainsi une base pour optimiser la gestion de la flexibilité. Cependant, cette approche présente certains inconvénients. La dépendance aux probabilités des scénarios futurs peut introduire une subjectivité notable dans les résultats, dépendant largement de l'évaluation de l'utilisateur. De plus, la méthode ne prend pas en compte certains aspects tels que le temps et la réelle flexibilité en termes de variété et de quantité, se limitant souvent à des projections futures sans évaluation concrète de la flexibilité actuelle. La comparaison entre systèmes de différentes tailles peut également être problématique en raison de l'utilisation de données absolues pour les coûts de pénalité. Malgré ces limites, la méthode de la pénalité de changement reste un outil précieux pour évaluer et gérer les coûts des options d'expansion et pour améliorer la planification stratégique dans un contexte industriel varié.

Méthodologie par indicateurs économique

(Haller, 1999) propose une approche méthodique pour évaluer la flexibilité dans les systèmes de flux de matières automatisés, typiques des environnements de production à haut volume. Sa méthode distingue la flexibilité opérationnelle, qui se concentre sur la stabilité et la robustesse des opérations quotidiennes, et la flexibilité stratégique, qui se rapporte à la capacité d'un système à s'adapter et à intégrer des changements de volume, de variantes ou de produits. Cette évaluation est effectuée à l'aide de critères qualitatifs et quantitatifs, incluant des mesures comme le temps de traitement, l'arrêt et l'impact de la variété de produits sur la capacité du flux. La procédure de Haller utilise également des indicateurs économiques, tels que les indices de rentabilité et des calculs d'investissement dynamiques, pour exprimer les effets monétaires de la flexibilité. Ces évaluations combinées permettent de tirer des conclusions sur la flexibilité à divers niveaux organisationnels, des postes de travail individuels jusqu'à l'usine entière. Cependant, bien que la méthode de Haller soit conçue pour être appliquée de manière universelle à différents secteurs, elle présente certaines limitations. En particulier, la gestion du temps est sous-évaluée, ce qui pourrait compromettre la précision dans des environnements où les délais sont critiques. De plus, le modèle ne fournit pas d'outil explicite pour analyser la flexibilité des quantités ou de l'expansion, ce qui limite son utilité dans les situations nécessitant des ajustements rapides de la production face à des changements de la demande. Malgré ces limites, le modèle de Haller offre une structure solide pour comprendre et évaluer la flexibilité des systèmes de production, en se concentrant sur la transparence et l'objectivité de l'évaluation grâce à ses critères bien définis. Cette approche pourrait être particulièrement utile pour les entreprises cherchant à optimiser leur capacité de réaction

face aux évolutions du marché, bien que des améliorations soient nécessaires pour traiter adéquatement tous les aspects de la flexibilité dans un environnement industriel complexe.

Méthodologie FLEXIMAC

La méthode FLEXIMAC (Alexopoulos et al., 2007) offre une perspective innovante pour évaluer la flexibilité des systèmes de production en s'appuyant sur une analogie avec les systèmes mécaniques. Cette approche quantifie la capacité d'un système de production à réagir aux changements, similaire à un facteur d'amortissement dans un système mécanique. La flexibilité est évaluée en mesurant la capacité de réaction du système à des entrées dynamiques, où l'entrée est définie comme le temps de traitement prévu et la sortie comme le temps d'écoulement réel des produits. Idéalement, ces deux valeurs devraient correspondre sans retard, indiquant une flexibilité maximale. Pour calculer la valeur FLEXIMAC, la méthode commence par segmenter une période donnée en intervalles de temps égaux pour comparer le temps de traitement prévu et le temps d'écoulement réel. Ces données sont ensuite utilisées pour effectuer une transformée de Fourier discrète, permettant de déterminer une fonction de transfert basée sur le calcul des quotients. À partir de là, FLEXIMAC évalue les valeurs propres et l'amplitude des fréquences, avec la flexibilité du système quantifiée par la moyenne arithmétique des dix plus grandes amplitudes. Un avantage notable de FLEXIMAC est son approche objective, évitant les évaluations subjectives et n'exigeant pas de scénarios de référence spécifiques. Les données nécessaires pour le calcul peuvent être facilement collectées à partir des données opérationnelles ou des systèmes ERP de l'entreprise, facilitant son application à tous les niveaux organisationnels, du poste de travail individuel à l'ensemble de l'usine. Toutefois, cette méthode présente plusieurs inconvénients significatifs. Elle n'intègre pas les coûts dans l'évaluation, limitant ainsi son utilité pour les décisions financières. De plus, bien que FLEXIMAC mesure la flexibilité générale d'un système, elle offre une évaluation limitée de la flexibilité spécifique, telle que la flexibilité quantitative ou mixte, et ne permet pas d'évaluer la flexibilité d'expansion. Enfin, l'orientation historique de cette méthode nécessite des données de production existantes, ce qui limite sa capacité à comparer prospectivement différents systèmes de production sans données historiques préalables.

Méthodologie floue multi-niveaux

(Sri & Suresh, 2019) explore l'évaluation de la flexibilité de fabrication dans l'industrie du vêtement en utilisant une méthode floue multi-niveaux. Face à l'augmentation de la mondialisation et de la pression concurrentielle, la capacité des entreprises à s'adapter rapidement aux changements est cruciale pour leur survie. Cet article propose une approche innovante pour mesurer cette flexibilité, offrant un cadre pratique pour améliorer l'agilité et la réactivité des entreprises. L'objectif de l'étude est de développer un cadre conceptuel permettant d'évaluer le niveau de flexibilité de fabrication d'une entreprise de vêtements. La flexibilité est définie comme la capacité à s'adapter aux changements et aux incertitudes du marché. En se concentrant sur une entreprise de confection, l'étude identifie les critères et attributs de flexibilité pertinents et les évalue à l'aide de la méthode floue multi-niveaux pour déterminer les domaines nécessitant des améliorations. La méthode consiste à collecter des données auprès d'experts de l'industrie pour évaluer le poids et la performance de chaque attribut de flexibilité. Un modèle à trois niveaux est utilisé, englobant les types de flexibilité, les critères et les attributs de flexibilité. L'analyse de l'importance et de la performance (IPA) permet d'identifier les attributs nécessitant des améliorations et ceux bien performants. Les résultats montrent que l'entreprise étudiée est "flexible" mais qu'il existe un potentiel d'amélioration pour atteindre un niveau de "flexibilité extrême". L'IPA révèle que certains attributs, comme l'introduction de nouveaux produits et l'ajout de valeur aux produits, nécessitent une attention immédiate. D'autres attributs, bien que performants, pourraient bénéficier de ressources supplémentaires pour maintenir leur niveau élevé, tandis que certains attributs à faible priorité n'ont pas d'impact significatif sur la flexibilité globale.

La méthodologie floue multi-niveaux présente des limites telles que sa complexité, sa dépendance aux opinions subjectives des experts et son applicabilité restreinte à l'industrie du vêtement. Elle manque également de considérations pour les coûts, d'exemples pratiques et de stratégies pour gérer les événements perturbateurs exceptionnels. Pour améliorer cette approche, il est recommandé de la simplifier, de réduire la subjectivité, d'inclure des analyses de coûts et des cas pratiques, et d'intégrer des stratégies de résilience pour les aléas rares mais à fort impact.

Synthèse et discussion

La série d'évaluations méthodologiques, synthétisée dans le Tableau 4, présentées révèle une approche variée et nuancée de la flexibilité dans les systèmes de production, mettant en évidence l'importance de cette flexibilité pour s'adapter à un environnement industriel en constante évolution. Les différentes méthodes offrent des perspectives sur la manière de mesurer, d'évaluer et d'optimiser la flexibilité pour répondre aux défis posés par les fluctuations du marché, les innovations technologiques, et les contraintes de production.

Tableau 4. Synthèse méthodologie de mesure de la flexibilité

Méthodologie	Aspect financier	Notion de temps	Application industriel
La logique floue	Non	Oui	Non
Pénalité de Changement	Oui	Oui	Non
Indicateurs économique	Oui	Oui	Oui
FLEXIMAC	Non	Oui	Non
Floue multi-niveaux	Non	Non	Non

Toutefois, malgré la diversité des approches, plusieurs lacunes communes émergent de cette analyse. Un point notable est l'accent mis sur les aspects quantitatifs de la flexibilité, tels que le temps, les coûts et la variété, sans toujours tenir compte des dimensions moins tangibles mais tout aussi cruciales, telles que la flexibilité organisationnelle ou stratégique. Ces types de flexibilité, qui ne sont pas directement liés au produit mais qui influencent la capacité d'une entreprise à s'adapter et à innover, restent sous-explorés. De plus, bien que les méthodologies cherchent à évaluer la flexibilité à différents niveaux, de la machine individuelle à l'ensemble du système de production, l'application de ces méthodes au niveau stratégique global ou intersectoriel est moins claire. La capacité à extrapoler les résultats à des décisions stratégiques plus larges, telles que l'investissement dans de nouvelles technologies ou l'ajustement des modèles opérationnels, est essentielle pour maximiser l'efficacité de la production. Un autre manque important est l'absence d'une méthodologie unifiée pour évaluer la flexibilité. Bien que chaque méthode offre des perspectives précieuses, l'absence d'un cadre standardisé rend difficile la comparaison entre différents systèmes de production ou l'évaluation des améliorations de flexibilité au fil du temps. Cela suggère un besoin de recherche future pour développer des outils plus intégrés et holistiques qui peuvent prendre en compte une gamme plus large de variables et fournir des mesures de flexibilité plus comparables.

En conclusion, les méthodologies d'évaluation de la flexibilité présentées fournissent une base solide pour comprendre et améliorer la flexibilité dans les systèmes de production. Toutefois, l'élargissement de ces approches pour inclure des types de flexibilité plus diversifiés et le développement d'un cadre d'évaluation unifié pourraient offrir des perspectives encore plus riches pour optimiser la production dans un environnement industriel en rapide évolution. Il est essentiel que la recherche future se concentre sur ces lacunes pour améliorer la capacité des entreprises à naviguer dans l'incertitude et à tirer parti des opportunités d'innovation.

3.6 Industrie 4.0 et systèmes cyber-physique

3.6.1 L'industrie 4.0

Industrie 4.0 (I4.0), également connue sous le nom de quatrième révolution industrielle, se réfère à l'intégration des technologies numériques avancées dans les processus de production et les chaînes de valeur. Cette transformation vise à créer des usines intelligentes où les systèmes physiques et numériques collaborent de manière transparente pour améliorer l'efficacité, la flexibilité et la personnalisation de la production.

L'Industrie 4.0 représente une révolution dans le secteur manufacturier, marquée par l'intégration de technologies avancées et de systèmes intelligents dans les processus industriels. Un des principes fondamentaux est l'interconnexion, où les machines, dispositifs, capteurs et personnes peuvent se connecter et communiquer entre eux via l'Internet des objets (IoT) et l'Internet des services (IoS). Cette interconnexion permet une collaboration fluide et une optimisation en temps réel des opérations industrielles.

- La transparence de l'information est un autre principe clé. Elle repose sur la création de systèmes de données transparents grâce à la collecte massive de données issues des capteurs et dispositifs connectés. Ces données sont ensuite utilisées pour améliorer la prise de décision, en fournissant des informations précises et en temps réel sur les processus de production.
- La prise de décisions décentralisées est rendue possible grâce aux systèmes cyber-physiques capables de réaliser des tâches de manière autonome dans des limites définies. Ce n'est que lors de dysfonctionnements ou d'exceptions que les tâches sont remontées à un niveau supérieur pour intervention humaine. Cette autonomie améliore la rapidité et la flexibilité des processus de production.
- La virtualisation joue également un rôle important dans l'Industrie 4.0. Elle consiste à créer des modèles virtuels des usines intelligentes en utilisant des données collectées par les capteurs pour suivre et simuler les processus physiques. Cela permet une meilleure optimisation et une prévision plus précise des opérations.
- L'interactivité, rendue possible par des technologies comme la réalité augmentée (AR) et la réalité virtuelle (VR), améliore l'interaction entre les opérateurs et les systèmes. Ces technologies facilitent la formation, la maintenance et la gestion de la production, rendant les processus plus intuitifs et efficaces.
- L'automatisation et l'intelligence artificielle (IA) jouent un rôle central. L'IA et l'apprentissage automatique (ML) sont utilisés pour automatiser les processus de production, analyser les données en temps réel et améliorer continuellement les opérations. Ces technologies augmentent la précision, réduisent les erreurs et permettent une innovation constante dans les processus industriels.
- Enfin, Les méthodologies d'auto-ajustement et d'auto-configuration permettent aux systèmes de production de modifier automatiquement leurs paramètres et de se reconfigurer en réponse aux variations de la demande ou aux changements dans les processus de production. Ces technologies, au cœur des systèmes de l'Industrie 4.0, assurent une adaptation rapide et efficace, offrant ainsi une flexibilité et une résilience accrues face aux perturbations et aux évolutions du marché. Ces méthodologies sont la raison de l'existence de ce sujet de thèse.

Le concept d'Industrie 4.0 a été introduit pour la première fois en novembre 2011 par le gouvernement allemand à la suite d'une initiative concernant une stratégie de haute technologie pour 2020 (Monostori, 2014) (Kagermann et al., 2013) (Wan et al., 2015). "The Industrie 4.0 Working Group", dirigé par le Dr. Siegfried Dais (Vice-président du conseil d'administration de Robert-Bosch GmbH) et le Prof. Henning Kagermann (Président d'Acatech), a créé le premier ensemble de directives de mise en œuvre entre janvier et octobre 2012. Bien que l'origine d'I4.0 réside dans l'industrie manufacturière allemande, il existait déjà dans d'autres pays avant d'être regroupé sous l'intitulé Industrie 4.0 (I4.0). Il a été largement adopté par d'autres pays industrialisés de l'Union européenne, ainsi qu'en Chine, en Inde et dans d'autres pays asiatiques (Gilchrist, 2016).

I4.0 propose un nouveau modèle d'organisation (Bartodziej, 2017) et de contrôle de l'ensemble de la chaîne de valeur tout au long du cycle de vie du produit, de la phase de conception du produit à la production et à la livraison du produit aux clients finaux. I4.0 déploie les outils fournis par les progrès technologiques en matière de communication et d'échange d'informations pour augmenter les niveaux d'automatisation et de numérisation de la production dans la fabrication et les processus industriels mondiaux (Gilchrist, 2016). Il s'agit du paradigme de différents types de connectivité de dispositifs physiques enrichis par l'électronique intégrée (capteurs, actionneurs, RFID, etc.) et connectés à des réseaux ou à Internet pour interagir avec tous les composants du système. Dans la vision de I4.0, l'interaction continue et l'échange d'informations se produisent non seulement entre les machines, mais aussi entre les humains et entre les humains et les machines (Wan et al., 2015). Dans ce paradigme, les systèmes cyber-physiques (CPS) ou les systèmes de production cyber-physiques (CPPS) surveillent le processus physique, créent une copie virtuelle du monde physique et offrent des décisions décentralisées en temps réel (Posada et al., 2015).

I4.0 pourrait exercer des influences significatives sur l'environnement de production dans l'exécution des opérations, permettant une planification et un contrôle de production en temps réel (Sanders et al., 2016). Dans cet environnement, les entreprises devraient augmenter le niveau de numérisation et de collaboration avec leurs clients et fournisseurs dans des écosystèmes numériques (Tupa et al., 2017).

En résumé, I4.0 peut être considéré comme un processus de fabrication interopérable basé sur l'intégration de données et de connaissances hétérogènes à travers des algorithmes avancés, le Big Data (BD) et des technologies avancées telles que l'Internet des objets (IoT) et l'Internet des services (IoS), l'automatisation industrielle, la cybersécurité (CS), l'informatique en nuage (CC) et la robotique intelligente (Liao et al., 2017) (Peruzzini et al., 2017) (Baena et al., 2017). Les principales technologies de I4.0 sont présentées dans la Figure 18. Dans I4.0, un flux intelligent de pièces, machine par machine, station par station, avec une communication en temps réel entre tous les éléments du système est attendu. Dans cet environnement, les CPS rendront la fabrication intelligente et adaptable avec des systèmes flexibles et collaboratifs qui prennent les meilleures décisions (Peruzzini et al., 2017).

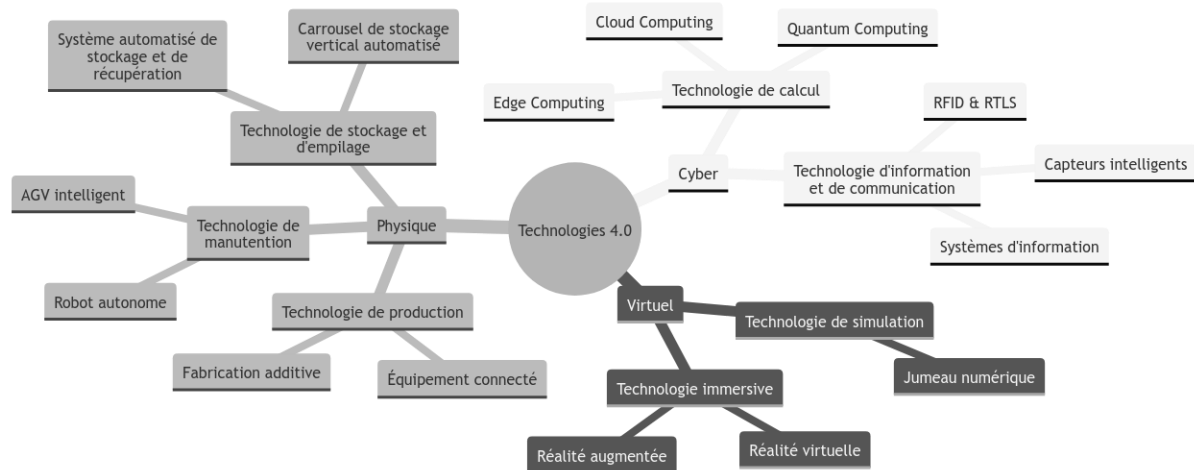


Figure 18. Technologies de l'industrie 4.0

La base de l'I4.0 est la disponibilité en temps réel de données et d'informations pertinentes en reliant tous les acteurs de la chaîne de valeur. L'I4.0 peut offrir la possibilité d'intégrer des modèles d'apprentissage à partir de données à tout moment, permettant une description, un diagnostic, une prédiction et une prescription plus précis du comportement du système, ce qui permet d'avoir un contrôle autonome. Dans ce système, nous devrions être en mesure de proposer un processus de prise de décision avec l'analyse des données (appelé "Dynamic Predictive Decision Making" (Ebrahimi et al., 2019)) qui est basé sur des informations et des données historiques et en temps réel. Cette fonctionnalité nous permet de prédire certains événements en utilisant des données et des informations historiques et de préparer la décision pour ces événements, puis de les réajuster si nécessaire, en utilisant les dernières informations et les données en temps réel. Cette capacité contribuerait à conduire l'usine du futur de manière plus efficace et deviendrait une nécessité au fil du temps.

Bien que la base des trois révolutions industrielles précédentes ait été le développement des technologies, de notre point de vue, l'aspect central de l'I4.0 repose davantage sur le développement méthodologique que sur la technologie. Néanmoins, il y a aussi un troisième aspect important concernant le management, qui est au centre des transformations et identifie les opportunités I4.0 pour les ressources humaines. Une gestion appropriée des ressources humaines est donc essentielle pour réaliser pleinement le potentiel de l'I4.0. Ces trois piliers de l'évolution de l'I4.0, tels que présentés dans la Figure 19, peuvent être brièvement caractérisés comme suit :

- Évolution technologique
 - Technologies de collecte, de stockage et d'échange de données
 - Technologies Edge, Fog et Cloud
 - IIoT, Système cyber-physique, cybersécurité
- Évolution méthodologique
 - Vision holistique et chaîne de valeur de bout en bout
 - Gestion du cycle de vie des produits
 - Analyse des données (analyse descriptive, prédictive et prescriptive)
 - Visualisation, jumeau numérique et réajustement dynamique

- Systèmes intelligents de soutien à la décision (utilisant des approches d'apprentissage, d'optimisation mathématique, de simulation, de graphique de connaissances, de système expert, etc.)
- L'auto-ajustement et l'auto-configuration qui permette au système de s'adapter automatiquement aux changements et aux besoins
- Évolution centrée sur l'humain
 - Suppression des barrières, formation et développement de nouvelles compétences
 - Changement de la culture organisationnelle, connaissance des employés et méthode de gestion

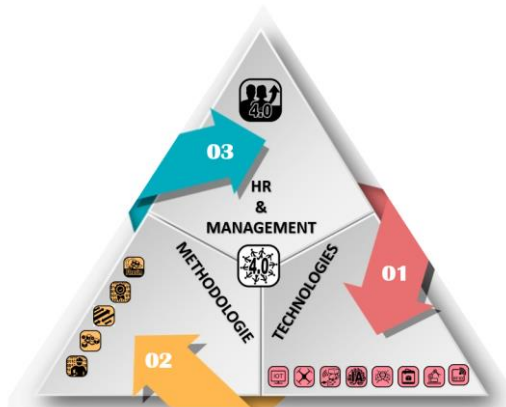


Figure 19. Piliers industrie 4.0 (Ebrahimi 2020)

Comme le montre la Figure 20, nous insistons sur le fait que les données sont au cœur de l'Industrie 4.0 et de la transformation numérique. Selon notre point de vue, l'Industrie 4.0 est accompagnée de trois défis majeurs : i) la génération et le partage des données, ii) la sécurité et le stockage des données, et iii) l'analyse des données et les actions. De plus, la couche externe de la Figure 20 illustre les sept éléments clés de l'I4.0 dans les entreprises manufacturières.

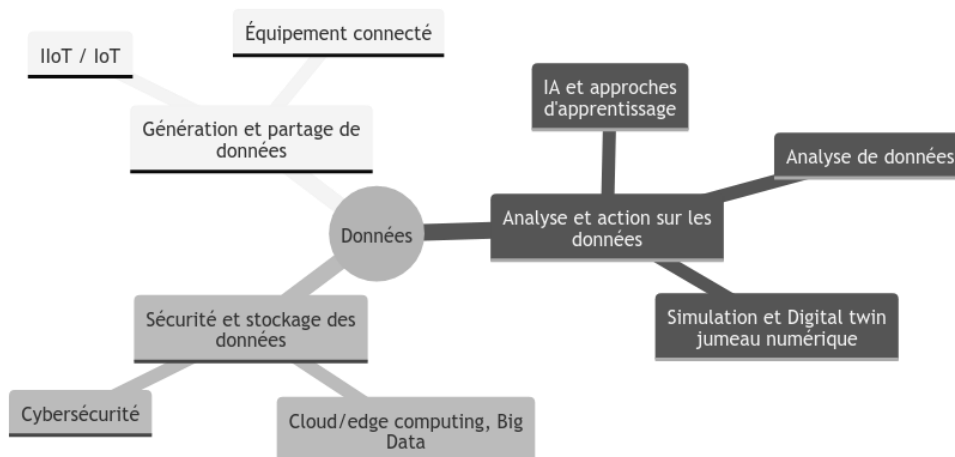


Figure 20. Les données dans l'industrie 4.0

Sur la base des quatre axes principaux d'une chaîne de valeur, à savoir "conception, production, distribution et marketing", il existe deux types d'activités. Les activités primaires sont directement liées

à la chaîne de production et concernent chaque étape du processus de production. Les activités de soutien couvrent des domaines tels que les affaires, les ressources humaines, les technologies de l'information, les achats, etc., jusqu'à l'administration (Gilchrist, 2016). La maintenance se situe dans les activités de soutien de la chaîne de valeur, et grâce aux intégrations de l'I4.0, elle serait en mesure d'augmenter la visibilité et d'améliorer la prise de décision.

En conclusion, la Figure 21 représente la vision de FPT-BLY de l'industrie 4.0 avec l'ensemble des aspects managériaux, méthodologiques et technologiques dans le domaine cyber-physique.

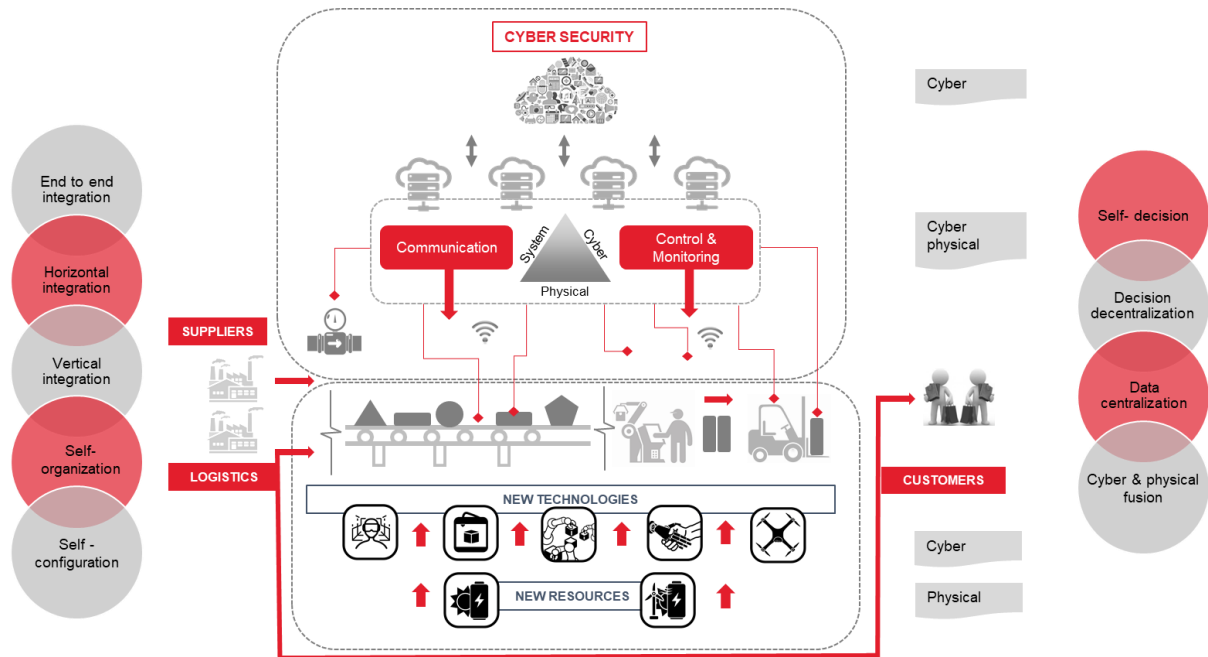


Figure 21. Vision 4.0 de FPT-BLY

3.6.2 Industrie 4.0 et flexibilité

L'avènement de l'Industrie 4.0 marque une transformation radicale des pratiques de fabrication, mettant en avant l'intégration de technologies numériques avancées dans les systèmes de production. Cette intégration favorise une flexibilité sans précédent, essentielle pour s'adapter aux exigences changeantes du marché, à la personnalisation des produits et à l'optimisation des processus de production. La flexibilité du système de production permet la mise en place des méthodologies d'auto-ajustement et d'auto-configuration qui sont les piliers clés de l'industrie 4.0 ciblé par cette thèse.

Au cœur de l'Industrie 4.0, les systèmes cyber-physiques (CPS) représentent l'intégration des capacités de calcul et de communication en temps réel avec les processus de fabrication physiques. Cette fusion permet une supervision et un contrôle précis des processus de production, favorisant ainsi une flexibilité opérationnelle accrue. Par exemple, dans les systèmes de fabrication cellulaires (CMS), l'implémentation de CPS peut faciliter une réorganisation rapide des cellules de production en réponse à des changements de demande ou à l'introduction de nouveaux produits. Cela permet une adaptation efficace aux fluctuations du marché, améliorant ainsi la flexibilité de volume en ajustant rapidement les niveaux de production pour répondre à la demande. De plus, les CPS permettent d'optimiser les itinéraires de production, ce qui renforce la flexibilité d'acheminement en utilisant des gammes alternatives pour fabriquer un produit. En intégrant ces systèmes, les installations de production peuvent également améliorer leur flexibilité de production, en fabriquant divers produits sans nécessiter de modifications significatives de l'équipement. Par exemple, une usine équipée de CPS peut rapidement

passer de la fabrication de pièces automobiles à celle de composants électroniques, en réorganisant simplement les cellules de production et en adaptant les processus de manutention.

L'exploitation du Big Data et des analyses avancées, telles que l'analyse descriptif, diagnostique, prédictif et prescriptif, permet aux entreprises de prévoir les tendances du marché, d'optimiser les chaînes d'approvisionnement et de personnaliser la production selon les besoins spécifiques des clients. Ces capacités analytiques améliorent la flexibilité de programme en fournissant des perspectives précieuses pour une prise de décision rapide et éclairée. L'intégration de l'intelligence artificielle et des approches d'apprentissage automatique, associée à l'utilisation d'algorithmes intelligents, du Cloud computing et de l'Edge computing, renforce encore ces capacités. Le cas de FPT BLY, et plus particulièrement la mise en place de sa plateforme IIOT, illustre parfaitement comment l'analyse des données de production en temps réel peut transformer les opérations. Grâce à cette plateforme, FPT peut identifier les goulots d'étranglement, prédire les défaillances des machines et adapter les plans de production pour maximiser l'efficacité. Cela agit directement sur plusieurs types de flexibilité. Par exemple, la flexibilité machine est améliorée grâce à la capacité de prédire les défaillances et de planifier la maintenance préventive, réduisant ainsi les temps d'arrêt et augmentant la disponibilité des équipements. La flexibilité de manutention est optimisée en permettant l'ajustement dynamique des systèmes de transport internes en fonction des besoins immédiats de la production. De plus, la flexibilité de processus est renforcée par la capacité à analyser et à ajuster les séquences de production en temps réel pour répondre aux variations de la demande ou aux interruptions imprévues. Enfin, la flexibilité de production est considérablement augmentée, car les données en temps réel permettent d'ajuster rapidement les volumes de production et de personnaliser les produits en fonction des exigences spécifiques des clients. Par exemple, FPT peut reconfigurer ses lignes de production pour passer de la fabrication de moteurs standard à celle de moteurs personnalisés, en utilisant des analyses prédictives pour optimiser les temps de réglage et les processus de fabrication.

La fabrication additive offre une flexibilité exceptionnelle dans la production de pièces complexes, réduisant considérablement le temps et le coût associés au changement de production. L'impression 3D permet la fabrication de produits personnalisés à la demande sans nécessiter d'outils ou de moules spécifiques. Dans le cas de FPT-BLY, l'impression 3D plastique a permis l'amélioration de plusieurs processus en permettant la fabrication rapide et à faible coût de pièces pour la maintenance, l'organisation du poste de travail et le prototypage. Depuis peu, FPT-BLY a investi dans une machine d'impression 3D métal afin d'ouvrir les possibilités à d'autres matières. L'impression 3D renforce plusieurs types de flexibilité dans un environnement de production. Par exemple, la flexibilité de produit est grandement améliorée car la fabrication additive permet de passer rapidement d'un produit à un autre sans nécessiter des changements significatifs dans les outillages ou les processus de production. La flexibilité de processus est également augmentée, car les techniques d'impression 3D permettent d'adapter facilement les méthodes de fabrication en fonction des exigences spécifiques de chaque pièce, ce qui est crucial pour le prototypage rapide et la production de petites séries personnalisées. De plus, l'impression 3D contribue à la flexibilité de production en permettant la fabrication de différentes familles de produits en utilisant la même infrastructure de production, réduisant ainsi les coûts et les délais liés aux changements de production. Par exemple, FPT-BLY peut rapidement produire des pièces pour la maintenance des équipements ou des prototypes pour tester de nouveaux concepts, ce qui améliore la réactivité et l'efficacité opérationnelle. L'investissement dans une machine d'impression 3D métal étend encore davantage cette flexibilité en permettant l'utilisation de matériaux plus robustes et adaptés à des applications exigeantes, ce qui élargit le champ des possibles pour FPT-BLY. Cela améliore non seulement la flexibilité de volume en permettant une production économique à différents niveaux, mais aussi la flexibilité de manutention en facilitant la création de pièces spécifiques pour les besoins logistiques internes, comme des outils de manutention personnalisés.

L'Internet des Objets (IoT) joue un rôle crucial dans l'amélioration de la flexibilité des systèmes de production en permettant une interconnectivité et une communication en temps réel entre les machines, les systèmes et les produits. L'IoT facilite le suivi précis des flux de matériaux, la gestion efficace des inventaires et l'optimisation des opérations de maintenance. Par exemple, l'utilisation de capteurs IoT dans les systèmes de fabrication cellulaires (CMS) permet de superviser l'état des machines en continu et d'ajuster automatiquement les paramètres de production pour répondre à des critères de qualité spécifiques, minimisant ainsi les temps d'arrêt et augmentant la flexibilité opérationnelle. L'IoT améliore plusieurs types de flexibilité dans un environnement de production. Par exemple, la flexibilité de manutention est considérablement augmentée grâce à la capacité de suivre les flux de matériaux en temps réel, permettant des ajustements dynamiques et une gestion plus efficace des stocks. De plus, la flexibilité de processus est améliorée car les capteurs IoT fournissent des données précises sur l'état des machines et des systèmes, permettant des ajustements immédiats des paramètres de production pour maintenir la qualité et la productivité. En outre, l'IoT renforce la flexibilité de processus en facilitant la maintenance prédictive et réduisant les pannes. En surveillant continuellement l'état des machines, les capteurs IoT permettent d'anticiper les pannes potentielles et de planifier les interventions de maintenance de manière proactive, ce qui réduit les temps d'arrêt imprévus et améliore la disponibilité des équipements. Par exemple, chez FPT-BLY, l'intégration de capteurs IoT dans les machines permet de détecter les signes précurseurs de défaillance, ce qui permet de planifier les interventions de maintenance au moment le plus opportun, minimisant ainsi l'impact sur la production. L'IoT favorise également la flexibilité d'acheminement en permettant une gestion dynamique des itinéraires de production. Les données en temps réel fournies par les capteurs IoT peuvent être utilisées pour réorganiser les flux de travail et ajuster les séquences de production en fonction des besoins immédiats, améliorant ainsi l'efficacité et la réactivité du système de production. Par exemple, les systèmes de transport interne peuvent être automatiquement redirigés pour éviter les zones congestionnées ou pour prioriser certaines tâches urgentes, optimisant ainsi le flux de production.

La simulation et les jumeaux numériques (Digital Twin), combinés aux outils d'aide à la décision intelligente, jouent un rôle essentiel dans l'amélioration de la flexibilité des systèmes de production. Les jumeaux numériques permettent de créer des répliques virtuelles des processus physiques, offrant ainsi une visibilité complète et en temps réel des opérations. Ces outils permettent de simuler divers scénarios de production, d'optimiser les processus et de prévoir les impacts des changements sans perturber les opérations réelles. Par exemple, la simulation et les jumeaux numériques permettent de tester virtuellement différentes configurations de production, ce qui améliore la flexibilité de production en permettant des ajustements rapides et efficaces sans nécessiter de modifications physiques coûteuses. Chez FPT-BLY, les jumeaux numériques peuvent être utilisés pour simuler l'introduction de nouveaux produits ou la modification des processus existants, permettant d'identifier les meilleurs ajustements avant de les mettre en œuvre dans le monde réel. Les outils d'aide à la décision intelligente, tels que les algorithmes de machine learning et les systèmes experts, renforcent la flexibilité de processus en fournissant des recommandations optimisées basées sur l'analyse des données en temps réel. Ces outils peuvent analyser une grande quantité de données provenant des jumeaux numériques pour identifier des opportunités d'amélioration et suggérer des actions correctives. Par exemple, FPT-BLY peut utiliser ces outils pour optimiser les séquences de production, réduire les temps de cycle et minimiser les goulots d'étranglement. Enfin, ces technologies améliorent également la flexibilité de programmation en permettant des ajustements dynamiques des plans de production en réponse aux changements de la demande ou aux perturbations de la chaîne d'approvisionnement. Les jumeaux numériques peuvent simuler les impacts de ces changements et recommander des ajustements pour maintenir l'efficacité opérationnelle. Par exemple, FPT-BLY peut utiliser des jumeaux numériques pour réajuster les horaires de production et les séquences de travail en temps réel.

En conclusion, l'Industrie 4.0, à travers ses diverses technologies clés, offre des opportunités sans précédent pour accroître la flexibilité dans les environnements de production. En intégrant des systèmes cyber-physiques, en exploitant le potentiel du Big Data et de l'analytique, en adoptant la fabrication additive et en tirant parti de l'IoT, les entreprises peuvent réaliser une production plus proactive, adaptable et personnalisée. Par exemple, les systèmes cyber-physiques améliorent la flexibilité de production en permettant des ajustements rapides et précis des processus de fabrication. Le Big Data et l'analytique, avec leurs capacités descriptives, diagnostiques, prédictives et prescriptives, renforcent la flexibilité de programme et la flexibilité de processus, en fournissant des perspectives précieuses pour une prise de décision rapide et éclairée. L'adoption de la fabrication additive, notamment l'impression 3D, permet une flexibilité produit exceptionnelle en facilitant la production de pièces complexes à la demande, sans nécessiter d'outils ou de moules spécifiques. De plus, l'Internet des Objets (IoT) joue un rôle crucial en améliorant la flexibilité de manutention et la flexibilité d'acheminement grâce à une interconnectivité et une communication en temps réel entre les machines, les systèmes et les produits.

Les méthodologies d'auto-ajustement et d'auto-configuration, en particulier, illustrent le lien fort entre l'Industrie 4.0 et la flexibilité. Ces technologies nécessitent une flexibilité et une agilité accrues pour permettre une adaptation rapide et autonome des systèmes de production aux variations de la demande et aux perturbations de la chaîne d'approvisionnement. En tirant parti de ces technologies, les entreprises renforcent leur flexibilité en adaptant rapidement leurs capacités de production aux tendances et demandes du marché. En somme, l'intégration des technologies de l'Industrie 4.0 permet aux entreprises de maintenir une position compétitive et de prospérer dans une ère de transformation numérique rapide. Ces avancées technologiques favorisent non seulement l'efficacité opérationnelle, mais elles offrent également un avantage stratégique en permettant aux entreprises de s'adapter rapidement aux évolutions du marché et aux besoins des clients.

3.7 Définition robustesse, résilience, agilité

Afin d'éclaircir certaines confusions habituelles lors de discussion autour de la flexibilité, cette section définit clairement les différents termes confondus avec la flexibilité. Comme la robustesse, la résilience et l'agilité.

3.7.1 Robustesse

Dans l'écosystème manufacturier actuel, marqué par une complexité croissante et une volatilité des marchés, la robustesse émerge comme un attribut clé de la chaîne de production (Sabuncuoglu & Goren, 2009). Cette section explore la définition de la robustesse et son importance dans un contexte industriel. La robustesse, dans son essence, est la capacité intrinsèque d'un système de production à persister et à conserver son fonctionnement en dépit des perturbations internes et externes. Selon (Mondal et al., 2014), elle est perçue non seulement comme une réponse défensive aux aléas inévitables, mais aussi comme une approche proactive, requérant des investissements stratégiques en anticipation des phases de turbulence.

Ce concept s'inscrit profondément dans la philosophie de gestion des risques contemporaine, incarnant la capacité à maintenir une performance constante malgré la variabilité et les chocs, qu'ils soient d'origine économique, technologique ou naturelle. La robustesse se manifeste par une préparation et une planification minutieuse, visant à solidifier la chaîne de production contre les perturbations sans nécessiter de réajustements majeurs ou de reconception du système établi.

L'adoption des technologies de l'Industrie 4.0 souligne davantage la pertinence de la robustesse comme principe directeur. L'intégration de solutions numériques avancées au cœur des opérations

manufacturières exige une fondation robuste capable de supporter et d'exploiter le potentiel de ces innovations. Cela garantit non seulement la continuité des opérations en cas de dysfonctionnements mineurs, mais optimise également la capacité d'adaptation et l'agilité face aux mutations rapides du marché. En synthèse, la robustesse permet aux systèmes de production de résister aux chocs et d'assurer une continuité opérationnelle. Sa mise en pratique est un levier stratégique pour l'excellence manufacturière dans une ère caractérisée par un changement permanent et des défis imprévisibles.

Cependant, il est crucial de noter certains points négatifs, tels que la nécessité d'investissements importants, qui ne sont pas toujours mentionnés. Cela peut conduire à une mauvaise interprétation de la raison pour laquelle un système flexible pourrait être préféré à un système robuste. Par exemple, dans l'industrie pétrochimique, où les investissements sont considérables et où le plan de production est rarement modifié, la robustesse est souvent privilégiée. Comprendre ces nuances est essentiel pour faire des choix stratégiques éclairés entre flexibilité et robustesse en fonction des exigences spécifiques de chaque secteur.

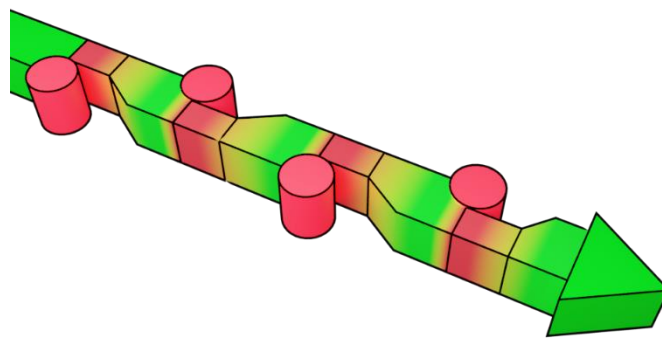


Figure 22. Illustration de la robustesse

En conclusion, comme illustré dans la Figure 22, la robustesse est le fait de traverser les différents événements (les cylindres rouges), en étant impacté négativement (largeur et couleur de la flèche) tout en continuant droit vers l'objectif de profit défini.

3.7.2 Résilience

Au cœur des débats actuels sur la pérennité des opérations industrielles se trouve le concept de résilience. Cette capacité permet aux systèmes de production de minimiser la perte de capacité et de récupérer rapidement après des perturbations, d'assurer la continuité des opérations et de s'adapter face à des changements inattendus (Herrman et al., 2011). La résilience ne se limite pas à la capacité de résister aux crises, mais inclut également l'aptitude à évoluer dans un environnement en mutation, en utilisant les perturbations comme des opportunités de transformation et d'innovation. Contrairement à la robustesse, qui se concentre sur la prévention et la stabilité, la résilience est dynamique et itérative, caractérisée par la rapidité et l'efficacité avec lesquelles une organisation peut retrouver ses niveaux de performance après un choc ou une perturbation. Elle englobe la réorganisation flexible de la chaîne d'approvisionnement, l'adaptabilité des modèles d'affaires et la capacité à réapprendre et à innover en réponse à de nouveaux défis.

Un système résilient doit être préparé à des événements perturbateurs très rares mais extrêmement impactants. Ces événements peuvent entraîner des perturbations significatives nécessitant une capacité de réponse rapide et efficace. La résilience implique donc des décisions stratégiques à long terme qui génèrent souvent des surcoûts importants, comme la constitution de niveaux élevés de stocks ou la mise en place de capacités de production supplémentaires qui ne sont pas utilisées en temps normal. Ces

mesures, bien que coûteuses, sont essentielles pour garantir que l'entreprise peut continuer à fonctionner efficacement même en cas de perturbations majeures.

L'application de la résilience dans l'industrie va au-delà de la simple récupération. Elle implique la création d'une culture et de pratiques qui favorisent une veille continue, un apprentissage organisationnel et une capacité à se réinventer. Cela est particulièrement pertinent dans le contexte de l'Industrie 4.0, où l'intégration des technologies numériques avancées, telles que l'analytique de données, l'intelligence artificielle et l'IoT, offre des opportunités sans précédent pour anticiper et répondre aux perturbations. Dans une époque marquée par l'incertitude, la résilience se manifeste également dans la capacité d'une entreprise à naviguer parmi les risques globaux, des fluctuations économiques aux crises sanitaires, en passant par les changements réglementaires.

En conclusion, la résilience est une philosophie opérationnelle et stratégique qui transcende la simple réaction aux crises pour embrasser une approche proactive de l'adaptation et de l'innovation. Son incorporation dans les systèmes de production industrielle est vitale pour assurer non seulement la survie mais aussi le succès dans un paysage industriel complexe et en constante évolution. Comme illustré dans la Figure 23, la résilience est la capacité d'un système à être modifié par un événement mais à revenir à son objectif de profit sans intervention extérieure.

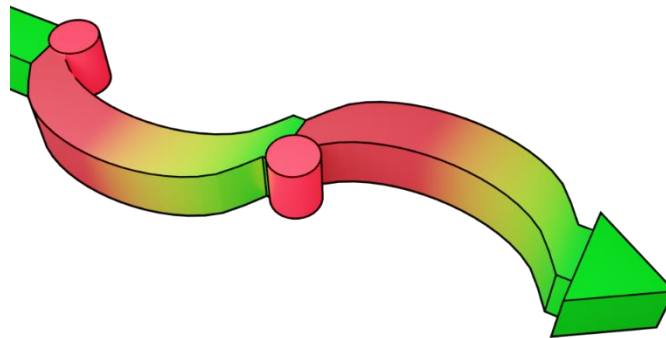


Figure 23. Illustration de la résilience

3.7.3 Agilité

L'agilité est une qualité pour les entreprises du paysage industriel moderne, dictée par un marché où les changements sont la seule constante. Elle représente la capacité d'une organisation à se mouvoir rapidement et efficacement pour s'adapter, évoluer, répondre, ou se préparer aux dynamiques du marché. Cette faculté d'adaptation rapide est fondamentale dans un écosystème où l'évolution des besoins des clients, les avancées technologiques et les pressions concurrentielles sont incessantes. L'agilité industrielle va au-delà de la réactivité ; elle encapsule une proactivité stratégique, la capacité à anticiper et à initier le changement plutôt qu'à y répondre. Elle englobe des processus de décision accélérés, une innovation continue, et une réorganisation rapide des opérations pour saisir les opportunités émergentes ou contourner les risques potentiels. L'agilité est intrinsèquement liée à l'efficacité, car les actions rapides doivent également être des actions justes, optimisant les ressources et les résultats. Dans le contexte de l'Industrie 4.0, l'agilité se manifeste par l'intégration de systèmes cyber-physiques, de solutions d'intelligence artificielle, et d'autres technologies numériques qui permettent une plus grande réactivité et une prise de décision basée sur les données. Ces technologies offrent aux industries les moyens d'accélérer leur cycle de production, de personnaliser en masse et de répondre instantanément aux changements de la demande. Enfin, l'agilité est essentielle pour la survie et la croissance dans l'économie mondiale actuelle. Elle permet aux entreprises de s'adapter rapidement face aux perturbations, aux crises et aux transitions. La capacité à pivoter rapidement assure une avance

compétitive durable et une performance optimale. En somme, l'agilité en industrie est l'élément moteur qui permet non seulement de naviguer mais aussi de prospérer dans un environnement commercial en perpétuelle mutation. Elle incarne une culture d'entreprise dynamique essentiels pour maintenir le cap dans un monde où le changement est la seule certitude.

3.7.4 Conclusion et comparaison avec la flexibilité

Dans le paysage industriel contemporain, les concepts de flexibilité, d'agilité, de robustesse et de résilience sont souvent entrelacés, mais chacun apporte une contribution unique à la performance et à la durabilité des entreprises. La flexibilité est la pierre angulaire permettant une adaptation aux exigences variées sans modifications profondes des systèmes de production. L'agilité, quant à elle, se concentre sur la vitesse de réponse aux changements du marché. La robustesse est synonyme de prévention et de capacité à résister aux chocs sans perturber les opérations, tandis que la résilience se rapporte à la récupération et à l'adaptation après des perturbations. Dans le contexte de cette thèse, la flexibilité est particulièrement priorisée en raison de la nature des industries contemporaines, où la capacité à modifier la production rapidement et efficacement en réponse à la variabilité des demandes des clients est essentielle. Elle est le facteur déterminant de l'efficacité opérationnelle et de la satisfaction du client, critères qui dictent le succès commercial dans un environnement où les modèles économiques évoluent rapidement. L'agilité est importante, mais sans une base de flexibilité, les entreprises ne peuvent pas réagir efficacement aux opportunités de marché. La robustesse garantit la continuité, mais elle peut parfois limiter la capacité d'adaptation en se concentrant trop sur la résistance au changement plutôt que sur l'innovation. La résilience est cruciale pour la survie à long terme, mais elle dépend de la flexibilité pour permettre une récupération rapide et une optimisation après les perturbations. En définitive, bien que l'agilité, la robustesse et la résilience soient toutes des caractéristiques vitales d'un système industriel moderne performant, c'est la flexibilité qui est fondamentale pour naviguer dans le paysage actuel marqué par des changements rapides et des incertitudes. Elle doit donc être privilégiée dans le cadre de cette étude car elle soutient et renforce les autres attributs. En maximisant la flexibilité, l'entreprise acquiert la capacité de se transformer de manière proactive, assurant non seulement sa survie mais aussi sa prospérité face à l'avenir imprévisible.

3.8 Conclusion de l'état de l'art

Notre étude approfondie de l'état de l'art a permis de révéler des déficits cruciaux dans la recherche actuelle sur la flexibilité des systèmes de production. Cette analyse a souligné des opportunités significatives pour approfondir ce domaine essentiel. Cinq objectifs principaux ont été formulés pour guider notre recherche vers la résolution de ces lacunes identifiées.

1. L'une des principales observations est que, malgré la reconnaissance de la flexibilité comme un levier de compétitivité industrielle, il existe une absence de définitions claires et complètes qui permettent de distinguer les différents types de flexibilité.
2. En complément de cette taxonomie, il est devenu évident qu'une classification stratégique et opérationnelle des flexibilités est également manquante. Il est donc impératif de classer ces flexibilités selon leur importance stratégique et leur applicabilité opérationnelle. Ce processus de classification affinera le périmètre d'action pour l'activation des différents types de flexibilité, facilitant ainsi une gestion optimisée des ressources et une réponse adaptée aux changements du marché et aux innovations technologiques. Ceci permet également d'identifier rapidement les solutions envisageables pour les différentes décisions et les leviers d'action à travers les types de flexibilité liés à chaque classe

3. Cela indique un besoin pressant de développer une taxonomie détaillée (identifier les paramètres influant sur chaque type de flexibilité, caractériser) des types de flexibilité, ce qui est essentiel pour leur exploitation efficace afin d'améliorer la réactivité et l'adaptabilité des systèmes manufacturiers. Ce travail de définition permettra de clarifier les concepts et de fournir un cadre structuré pour les mesurer correctement et définir le niveau approprié de chaque type de flexibilité.
4. Par ailleurs, nous avons constaté un manque de méthodes robustes pour évaluer le niveau de flexibilité. Cela nous motive à développer des indicateurs de performance qui aideront les entreprises à diagnostiquer et à améliorer leur état de flexibilité. Cette mesure précise est cruciale pour permettre une amélioration continue et ciblée. De plus, il est essentiel de déterminer le niveau optimal de flexibilité nécessaire pour divers scénarios de production et types d'industries. De ce fait, il est nécessaire de concevoir un modèle décisionnel qui guidera les entreprises dans l'ajustement de leur flexibilité, en tenant compte des contraintes opérationnelles et économiques.
5. Enfin, le développement d'une feuille de route stratégique pour atteindre le niveau de flexibilité nécessaire est impératif. Cette feuille de route, établi par une modélisation mathématique du problème et optimisation économique des investissements, comprendra également des recommandations pratiques, des étapes clés et des indicateurs de suivi pour soutenir les entreprises dans leur démarche d'amélioration continue de la flexibilité. Ce plan d'action permettra de structurer les efforts économique et humain vers l'atteinte d'une flexibilité globale optimale, renforçant ainsi la compétitivité dans un paysage industriel en évolution.

Pour répondre efficacement aux lacunes identifiées, la partie suivante de ce manuscrit se concentrera sur le développement de solutions innovantes et applicables. Chaque objectif sera abordé de manière spécifique, avec des méthodes de définition, de classification, de mesure et d'optimisation de la flexibilité, ainsi qu'une feuille de route détaillée pour leur mise en œuvre pratique. Ces contributions visent non seulement à combler les insuffisances relevées, mais aussi à offrir aux entreprises les outils nécessaires pour adapter leurs systèmes de production aux exigences dynamiques de l'Industrie 4.0, telles que l'accès en temps réel aux informations et aux données, ainsi que la capacité d'auto-configuration et d'auto-organisation rapide des systèmes physiques.

À travers une série de propositions concrètes, nous établirons un cadre méthodologique robuste pour intégrer ces aspects de flexibilité dans la pratique industrielle. Cette approche renforcera la capacité des entreprises à innover et à rester compétitives sur le marché global, en permettant des ajustements dynamiques et auto-réglables des systèmes de production.

Partie 2 : Méthodologie et résultats

Dans cette seconde partie de la thèse, nous allons déployer notre cadre méthodologique et présenter les résultats obtenus, en prenant appui sur des études de cas concrètes et pertinentes. L'ensemble des réflexions et analyses développées ici s'articule autour de l'entreprise FPT BLY, l'usine au sein de laquelle j'occupe le rôle de responsable de la transformation digitale. Cette immersion professionnelle me permet de contextualiser profondément les problématiques abordées et de tester directement les solutions envisagées. L'entreprise FPT BLY, point focal de nos études, est actuellement engagée dans le processus d'introduction du nouveau moteur XC13 sur ses lignes de production existantes. Ce projet, d'une importance stratégique, sert de toile de fond à notre exploration des capacités de flexibilité et de réadaptation des systèmes manufacturiers. Ainsi, les chapitres qui suivent détaillent les démarches méthodologiques adoptées et les modèles développés, tout en mettant en lumière leur application directe et leur efficacité au sein de l'usine FPT BLY.

Dans cette deuxième partie de la thèse, nous allons explorer en détail les contributions méthodologiques développées pour répondre aux défis de flexibilité et de reconfigurabilité des systèmes de production dans le contexte de l'Industrie 4.0 (principalement l'auto-configuration et l'auto-ajustement). Ces contributions, articulées autour de cinq méthodologies principales, visent à fournir un cadre structuré et pratique pour évaluer, optimiser et planifier la flexibilité dans les environnements de production industriels comme illustré dans la Figure 24 . (Détails des liens entre les différentes méthodologies en Annexe D)

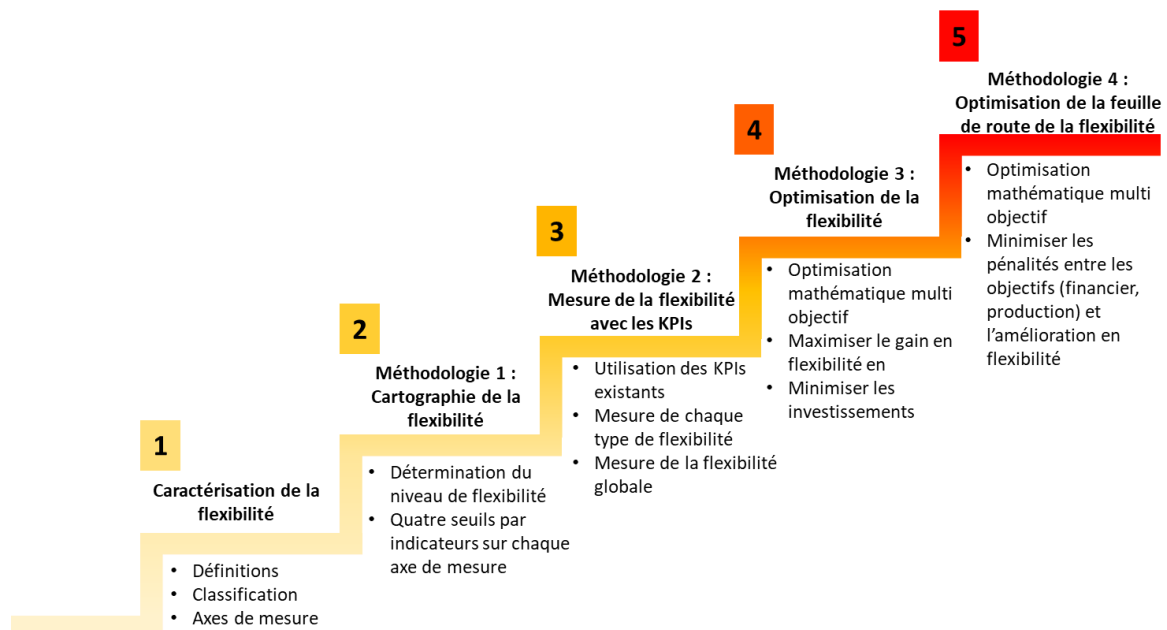


Figure 24. Illustrations des contributions

La première contribution se concentre sur la caractérisation de la flexibilité. Cette étape essentielle consiste à définir et classer les différents types de flexibilité afin de mieux comprendre leurs rôles et impacts dans les systèmes de production. Nous avons proposé une classification en trois dimensions : Physique, Décisionnelle et d'Impact (PDI), et déterminé trois axes de mesure : Portée, Réactivité et Alternative (PRA). Cette caractérisation est fondamentale pour établir une base théorique solide sur laquelle s'appuient les contributions suivantes.

Pour aller au-delà de la simple caractérisation, la deuxième contribution propose une méthodologie pour la cartographie de la flexibilité. Cette approche permet de déterminer les indicateurs pertinents pour chaque type de flexibilité, en les classant par dimensions et axes. En fournissant une cartographie structurée, cette méthodologie aide à visualiser les différentes facettes de la flexibilité et à identifier les leviers potentiels pour son amélioration. Bien que cette méthodologie soit simple et structurée, elle ne fournit pas de mesures quantitatives précises, ce qui a conduit au développement de la contribution suivante.

La troisième contribution introduit une méthodologie pour la mesure quantitative de la flexibilité à l'aide des indicateurs de performance (*Key Performance Indicators, KPI*). Cette approche permet de quantifier la flexibilité en utilisant des KPIs existants, normalisés en fonction de leur sens (bénéfique ou coût). En calculant des indicateurs de flexibilité spécifiques et globaux par la méthode des sommes pondérées, cette méthodologie offre une évaluation précise et fiable de la flexibilité des systèmes de production. Cependant, elle n'intègre pas les aspects financiers ni un plan d'action détaillé, d'où la nécessité d'une approche plus intégrée.

Pour répondre aux limites des contributions précédentes, la quatrième contribution propose une optimisation mathématique de l'index de flexibilité. Cette méthodologie utilise des modèles mathématiques pour identifier et pondérer les alternatives technologiques et évaluer leurs impacts sur la flexibilité. En tenant compte des relations entre les alternatives et en estimant les coefficients de synergie, cette approche permet de maximiser les gains en flexibilité tout en minimisant les investissements nécessaires. Néanmoins, elle requiert une expertise approfondie et des données détaillées, et ne fournit pas de feuille de route pratique pour les investissements.

Enfin, la cinquième contribution se concentre sur l'élaboration d'une feuille de route pour l'investissement en flexibilité. Cette méthodologie permet de planifier de manière optimisée les investissements nécessaires pour améliorer la flexibilité, en définissant des objectifs de capacité de production et d'investissement par période. En évaluant les importances des violations par rapport aux objectifs et en modélisant les problèmes, cette feuille de route offre une vision claire et structurée des étapes à suivre pour atteindre les niveaux de flexibilité souhaités. Bien que complexe et dépendante des résultats de l'optimisation mathématique, cette méthodologie fournit un cadre pratique et stratégique pour les entreprises.

Chacune de ces contributions est détaillée dans les chapitres suivants, où nous présentons les méthodologies développées, les résultats obtenus et les implications pratiques pour les systèmes de production industriels. Ensemble, elles constituent une approche intégrée et cohérente pour améliorer la flexibilité et rendre possible les méthodologies l'auto-ajustement et l'auto-configuration de l'Industrie 4.0.

4 Chapitre 4 : Cadre de la méthodologie conceptuel

L'objectif de ce chapitre est d'apporter une meilleure compréhension de la flexibilité et des méthodologies pour que les décideurs puissent prendre des décisions en se basant sur des informations claires. Nous commencerons par la caractérisation de la flexibilité, puis, en nous basant sur ces propositions, nous développerons deux méthodologies permettant d'évaluer et de mesurer la flexibilité.

4.1 Caractérisation de la flexibilité

Dans cette section, nous nous concentrons sur la caractérisation de la flexibilité dans les systèmes de production industriels. Cette caractérisation se décompose en trois étapes clés permettant d'acquérir une haute compréhension de la flexibilité :

- Identification des types de flexibilité
- Classification des types de flexibilité
- Axes de mesure de la flexibilité

4.1.1 Identification des types de flexibilité

Les recherches antérieures, bien qu'importantes, ont fréquemment circonscrit la flexibilité à des domaines traditionnels tels que la flexibilité des machines ou des processus, sans pleinement saisir ou intégrer les aspects nouveaux et émergents qui sont cruciaux dans le contexte actuel. Par exemple, la flexibilité dans l'intégration des systèmes cyber-physiques, essentielle pour l'Industrie 4.0, reste peu explorée. De même, les types de flexibilité relatives à la cybersécurité, à la durabilité, ou à l'intégration des données client dans les processus de production requièrent une attention accrue. Nous reconnaissons, à travers des cas concrets comme chez FPT Industrial, que l'introduction de nouveaux produits dans un environnement de production existant nécessite une adaptation rapide non seulement au niveau des machines, mais également dans la gestion des ressources humaines, des chaînes d'approvisionnement et des processus informatiques. Par exemple, le lancement d'un nouveau moteur de véhicule par FPT Industrial a nécessité une réévaluation de la flexibilité de leur chaîne d'approvisionnement, ainsi qu'une adaptation de leurs systèmes de gestion de données pour accueillir les spécifications et les demandes personnalisées des clients. Ainsi, dans cette section, nous proposons d'élargir le cadre conceptuel de la flexibilité pour prendre en compte ces nouvelles dimensions, offrant ainsi un modèle plus complet et applicable aux défis contemporains des systèmes de production. Cette exploration inclura une analyse détaillée de chaque nouveau type de flexibilité identifié, soulignant leur importance stratégique, leurs défis spécifiques, et les méthodes par lesquelles ils peuvent être mesurés. En outre, nous examinerons comment ces nouvelles flexibilités interagissent entre elles et avec les types traditionnels, et comment elles peuvent être intégrées de manière synergique pour optimiser la réactivité et l'efficacité globale des systèmes de production.

Les types de flexibilité traditionnels, représentés en rose dans la Figure 25, tels que la flexibilité des machines, des opérations, des processus, et des marchés, ont été largement discutés dans la littérature existante et présentés dans la section 3.5.2. Ces flexibilités sont plutôt liées au système physique de production qu'on peut le nomme comme flexibilité *front office*. Ces concepts ont fourni une base solide pour comprendre comment les systèmes de production peuvent s'adapter à divers changements et contraintes. Cependant, à mesure que nous approfondissons notre compréhension des défis actuels posés par les avancées technologiques, les attentes des consommateurs et les pressions environnementales, il devient évident que ces types de flexibilité traditionnels ne suffisent plus à couvrir

l'ensemble des besoins des systèmes de production modernes. De ce fait, nous pensons que d'autre type de flexibilité nommées Back Office devrait être étudié et formaliser pour exploiter davantage la capacité globale d'un système de production.

En nous basant sur les discussions précédentes et les déficits identifiés dans la littérature actuelle, il est clair qu'il est nécessaire d'introduire et de définir de nouveaux types de flexibilité, comme illustré par les éléments en bleu dans la Figure 25. Ces nouveaux types de flexibilité, tels que la flexibilité face aux exigences des clients, la gestion des fournisseurs, les réponses aux crises sanitaires, l'adaptation aux changements énergétiques, la gestion des ressources humaines, et l'interopérabilité des systèmes d'information, reflètent les enjeux contemporains et les dimensions supplémentaires que les entreprises doivent maintenant naviguer peuvent être considérer comme quelques types de flexibilité *Back office*. En intégrant ces nouveaux types de flexibilité, nous visons à fournir un cadre plus complet et actualisé qui répond mieux aux exigences complexes et interconnectées des environnements de production d'aujourd'hui.

Machine	Client
Manutention	Fournisseur
Opération	Sanitaire
Acheminement	Énergie
Processus	Humain
Volume	Informatique
Expansion	Stockage
Programme	Législation
Produit	
Production	
Marché	

Figure 25. L'ensemble types de flexibilité

Certains types sont déjà apparues dans la littérature mais nous proposons un complément à leur définition et une mise à jour, comme la flexibilité du client et du fournisseur. D'autres, n'ont, à notre connaissance pas été abordé ou de manière trop succincte, comme la flexibilité d'informatique et la flexibilité sanitaire.

Flexibilité client : Elle permet de personnaliser les produits pour répondre spécifiquement aux besoins individuels. Cette personnalisation enrichit l'expérience client et confère un avantage concurrentiel significatif. Cependant, elle nécessite l'intégration de systèmes informatiques avancés et une logistique complexe pour gérer efficacement les commandes personnalisées. La flexibilité client ne se limite pas à la personnalisation des produits. Elle inclut également la capacité à ajuster les options disponibles pour un produit, comme proposer des alternatives similaires ou éliminer certaines options en fonction des besoins et des contraintes. En outre, la flexibilité client englobe les délais de livraison, la qualité des produits et les coûts. Ainsi, les entreprises doivent être en mesure de s'adapter rapidement et efficacement aux exigences spécifiques de chaque client, tout en maintenant des standards élevés de qualité et en contrôlant les coûts.

Flexibilité du fournisseur : Elle joue un rôle important dans l'amélioration de l'efficacité de la production et la réduction des coûts. Une collaboration étroite et flexible avec les fournisseurs permet une chaîne d'approvisionnement plus réactive, essentielle pour ajuster la production en fonction des fluctuations du marché. Cela requiert des relations solides et un partage constant d'informations pour une meilleure coordination, ce qui peut être complexe à maintenir mais est vital pour la stabilité opérationnelle. La flexibilité du fournisseur englobe également l'ensemble des types de flexibilité

traditionnellement présentés, que ce soit chez un partenaire ou un fournisseur. Cette flexibilité peut inclure la capacité à modifier les volumes de commandes, à ajuster les spécifications des produits, à offrir des délais de livraison variables et à maintenir une qualité constante malgré les changements. En intégrant ces différentes dimensions de flexibilité, les entreprises peuvent mieux répondre aux défis imprévus et aux opportunités du marché, tout en renforçant la fiabilité et la performance de leur chaîne d'approvisionnement.

Flexibilité sanitaire : L'émergence récente de défis sanitaires mondiaux, comme la pandémie de Covid-19, a mis en lumière la nécessité d'une flexibilité sanitaire, permettant aux entreprises de continuer à opérer en toute sécurité. Cette flexibilité implique une adaptation rapide aux nouvelles exigences sanitaires, nécessitant des investissements en sécurité humaine et en formation des employés. Elle garantit également la continuité des activités en périodes incertaines, en assurant que les protocoles de santé et de sécurité sont rigoureusement suivis. La flexibilité sanitaire se traduit par la mise en place de mesures telles que la distanciation physique, le télétravail, les équipements de protection individuelle (EPI), et des procédures de nettoyage renforcées. De plus, elle inclut la capacité à réagir rapidement aux changements de réglementation sanitaire et à gérer efficacement les impacts sur la chaîne d'approvisionnement et la production. En adoptant une approche proactive et adaptable face aux défis sanitaires, les entreprises peuvent non seulement protéger leurs employés et clients mais aussi maintenir leurs opérations et leur compétitivité sur le marché.

Flexibilité énergétique : Dans le domaine de l'énergie, la flexibilité énergétique est devenue indispensable. Les entreprises intégrant des solutions de production d'énergie renouvelable locale, telles que le solaire ou l'éolien, ne se contentent pas de réduire leur impact environnemental ; elles optimisent également leur consommation énergétique en équilibrant production interne et externe, ce qui se traduit par des gains significatifs en termes d'efficacité et de coût.

Cette flexibilité énergétique permet aux entreprises de mieux gérer leurs besoins énergétiques en fonction des fluctuations de la demande et des conditions de production. Bien que cela nécessite des investissements initiaux substantiels et une planification soignée, les bénéfices à long terme en termes de durabilité et de coûts opérationnels sont considérables. En outre, l'adoption de ces technologies peut offrir une protection contre les variations des prix de l'énergie et renforcer la flexibilité de l'entreprise face aux perturbations de l'approvisionnement énergétique.

Ainsi, la flexibilité énergétique contribue non seulement à la durabilité environnementale mais aussi à l'optimisation des performances économiques et opérationnelles des entreprises, les positionnant favorablement dans un contexte de transition énergétique globale.

Flexibilité humaine : Dans un système de production, l'humain est l'élément le plus flexible, capable de s'adapter rapidement aux changements et d'apprendre de nouvelles activités. Cette flexibilité est cruciale pour encourager la polyvalence et l'innovation parmi les employés, permettant à l'entreprise de s'adapter rapidement aux nouvelles technologies et aux exigences des projets. La flexibilité humaine repose sur la capacité des employés à acquérir et à appliquer de nouvelles compétences, à résoudre des problèmes de manière créative et à collaborer efficacement au sein d'équipes diversifiées. Cela implique un investissement continu dans la formation et le développement des compétences, essentiel pour maintenir une main-d'œuvre compétitive et adaptable. Les programmes de formation doivent être conçus pour répondre aux besoins spécifiques de l'entreprise et inclure des modules sur les nouvelles technologies, les méthodes de production avancées et les compétences interpersonnelles.

De plus, la flexibilité humaine se manifeste par la capacité des employés à gérer les imprévus et à s'adapter à des environnements de travail changeants. Cela peut inclure la rotation des postes, où les employés sont formés pour effectuer diverses tâches, augmentant ainsi leur polyvalence et leur

compréhension globale du processus de production. Cette approche non seulement améliore la réactivité de l'entreprise face aux perturbations, mais elle favorise également un environnement de travail plus dynamique et motivant, où les employés se sentent valorisés et engagés.

Pour maximiser la flexibilité humaine, les entreprises doivent également promouvoir une culture d'innovation et de collaboration. Encourager les employés à proposer des idées d'amélioration, à participer à des projets innovants et à travailler en équipe sur des défis complexes renforce leur capacité à s'adapter et à innover. En outre, les systèmes de gestion de la performance devraient reconnaître et récompenser la flexibilité et l'initiative, soutenant ainsi une mentalité de croissance continue.

Flexibilité Informatique : Elle englobe l'ensemble du système d'information, incluant les différentes applications métiers (MES, ERP, APS, PLM, etc.) et l'échange de données entre les diverses bases de données de l'entreprise (Data Lake, cloud, bases de données de chaque application), ainsi que tous les composants physiques constituant le système d'information. Avec l'avènement des technologies numériques, la flexibilité informatique devient un facteur clé de flexibilité. En permettant à différents systèmes informatiques de communiquer efficacement, les entreprises peuvent améliorer considérablement l'efficacité opérationnelle et la gestion des données.

Cette flexibilité permet aux systèmes d'information de s'adapter rapidement aux changements des processus de production et des besoins des clients. Elle facilite l'intégration de nouvelles technologies et fonctionnalités, ce qui est essentiel dans un environnement où les exigences en matière de données et d'automatisation évoluent constamment. Cependant, cela présente des défis en termes de compatibilité des systèmes existants qui doivent être soigneusement gérés pour éviter les interruptions et assurer une transition en douceur.

De plus, la facilité de développement et d'intégration de nouvelles fonctionnalités, telles que le développement de nouveaux algorithmes et l'intégration d'outils d'aide à la décision, est un aspect crucial de la flexibilité informatique. Un système d'information flexible doit permettre l'industrialisation rapide de ces outils, garantissant ainsi que l'entreprise puisse répondre rapidement aux nouvelles opportunités et aux défis émergents.

Pour maximiser cette flexibilité, les entreprises doivent investir dans des architectures de système d'information modulaires et évolutives, qui permettent une interconnexion fluide entre les systèmes. Cela inclut l'adoption de standards ouverts et l'utilisation de middleware pour faciliter l'interopérabilité. En outre, la formation continue des équipes informatiques sur les nouvelles technologies et les meilleures pratiques en matière d'intégration est essentielle pour maintenir un haut niveau de flexibilité informatique.

Flexibilité de stockage : Elle est particulièrement pertinente pour les entreprises de commerce électronique, qui doivent pouvoir ajuster rapidement leurs capacités de stockage pour répondre aux variations de la demande saisonnière. Par exemple, pendant les périodes de forte demande comme les fêtes de fin d'année, les soldes ou les promotions spéciales, la capacité à augmenter rapidement l'espace de stockage est cruciale pour gérer efficacement les volumes élevés de marchandises et de commandes. Inversement, en période de faible activité, la réduction des besoins en stockage permet de minimiser les coûts opérationnels.

Investir dans des infrastructures modulables et automatisées est essentiel pour répondre à ces besoins fluctuants sans compromettre l'efficacité. Les entrepôts modulaires, par exemple, peuvent être rapidement agrandis ou réduits en fonction des besoins de stockage. De plus, les systèmes de gestion d'entrepôt automatisés permettent d'optimiser l'utilisation de l'espace, de réduire les temps de traitement des commandes et d'améliorer la précision des stocks.

L'utilisation de technologies avancées telles que les robots de gestion de stock, les systèmes de tri automatisés et les solutions de suivi en temps réel contribue également à améliorer la flexibilité de stockage. Ces technologies permettent une gestion plus efficace des inventaires, une réduction des erreurs humaines et une augmentation de la vitesse de traitement des commandes. Elles facilitent également l'intégration de nouvelles stratégies de gestion des stocks, telles que le *dropshipping* ou la gestion en flux tendu, qui peuvent aider à répondre rapidement aux changements de la demande.

De plus, la flexibilité de stockage implique également la capacité à intégrer facilement de nouvelles fonctionnalités et technologies pour améliorer les opérations de stockage. Cela peut inclure l'adoption de logiciels de gestion de la chaîne d'approvisionnement basés sur l'intelligence artificielle, qui peuvent prévoir les tendances de la demande et optimiser la gestion des stocks en conséquence. L'utilisation de solutions cloud pour la gestion des données permet également une mise à l'échelle rapide des ressources de stockage en fonction des besoins en temps réel.

Flexibilité législative : La flexibilité législative est cruciale dans des secteurs fortement réglementés, où la capacité d'un système à répondre rapidement aux nouvelles réglementations représente un avantage compétitif non négligeable. Par exemple, des changements comme l'introduction de la norme Euro 7 ou des mises à jour des normes ISO peuvent avoir des impacts significatifs sur les opérations des entreprises. La capacité à s'adapter rapidement à ces nouvelles exigences sans perturber les opérations courantes est essentielle pour maintenir la conformité et la continuité des activités.

Cette flexibilité législative englobe plusieurs types de flexibilité abordés précédemment, tels que la flexibilité machine, la flexibilité client et la flexibilité de manutention. Elle nécessite une approche intégrée pour modifier rapidement les opérations, les produits ou les services en fonction des nouvelles exigences légales. Par exemple, la mise à jour des systèmes d'information pour se conformer aux nouvelles normes de sécurité des données, ou l'ajustement des processus de production pour respecter les nouvelles réglementations environnementales.

Pour garantir cette flexibilité, une veille réglementaire active est indispensable. Les entreprises doivent surveiller en permanence les évolutions législatives et anticiper les changements potentiels. Cela implique de disposer d'équipes dédiées à la veille réglementaire et de systèmes d'information capables de collecter et d'analyser les données pertinentes.

Dans cette partie, nous avons élargi le concept de flexibilité en ajoutant de nouveaux types de flexibilité qui permettent de prendre en compte les nouveaux aspects de l'industrie actuelle. Ces nouveaux types, tels que la flexibilité client, la flexibilité fournisseur, la flexibilité sanitaire, la flexibilité énergétique, la flexibilité humaine, la flexibilité informatique, la flexibilité de stockage et la flexibilité législative, enrichissent notre compréhension de la flexibilité dans les systèmes de production modernes. Ils soulignent l'importance de l'adaptabilité et de l'agilité dans un environnement industriel en constante évolution.

Ces explications permettent de mieux comprendre la flexibilité sous ses multiples dimensions et d'appréhender comment elle peut être appliquée de manière stratégique pour améliorer la compétitivité et la résilience des entreprises. En fournissant une vue d'ensemble détaillée de chaque type de flexibilité, nous avons mis en évidence les différents leviers que les entreprises peuvent actionner pour répondre aux défis contemporains.

Dans la section suivante, nous allons examiner comment chaque type de flexibilité a une importance différente selon son périmètre ou sa classification. Cette analyse nous permettra de mieux comprendre comment prioriser et intégrer ces divers types de flexibilité dans les stratégies opérationnelles des entreprises pour optimiser leurs performances et leur capacité d'adaptation.

4.1.2 Classification PDI

L'analyse approfondie de l'état de l'art révèle une lacune significative dans la classification et la compréhension systématiques des divers types de flexibilité au sein de l'industrie manufacturière, en particulier dans le contexte de l'Industrie 4.0. Bien que de nombreuses recherches aient exploré les différentes dimensions de la flexibilité, peu ont réussi à offrir une approche holistique permettant d'évaluer et de classer la flexibilité de manière qu'elle soit alignée avec les objectifs stratégiques, tactiques et opérationnels de l'entreprise, ainsi qu'avec les niveaux physiques variés au sein de la chaîne de valeur, de la ressource individuelle à la chaîne d'approvisionnement dans son ensemble.

Cette lacune dans la recherche existante souligne le besoin d'une matrice de classification des flexibilités qui facilite une approche systémique et structurée pour intégrer la flexibilité dans la planification et la prise de décision stratégique des entreprises. À cet égard, la matrice présentée dans la Figure 26 propose une telle approche en segmentant la flexibilité selon trois axes essentiels PDI : le niveau physique P (ressources, atelier, usine, chaîne d'approvisionnement), le niveau de décision D (stratégique, tactique, opérationnel et en temps réel), et l'impact sur les activités de l'entreprise I (de faible à très important).

La Figure 26 représente une classification matricielle des types de flexibilité dans un contexte industriel, spécifiquement adaptée aux exigences de l'industrie 4.0. Cette classification s'articule autour de trois axes principaux : le niveau de décision, le niveau physique et l'impact sur l'entreprise.

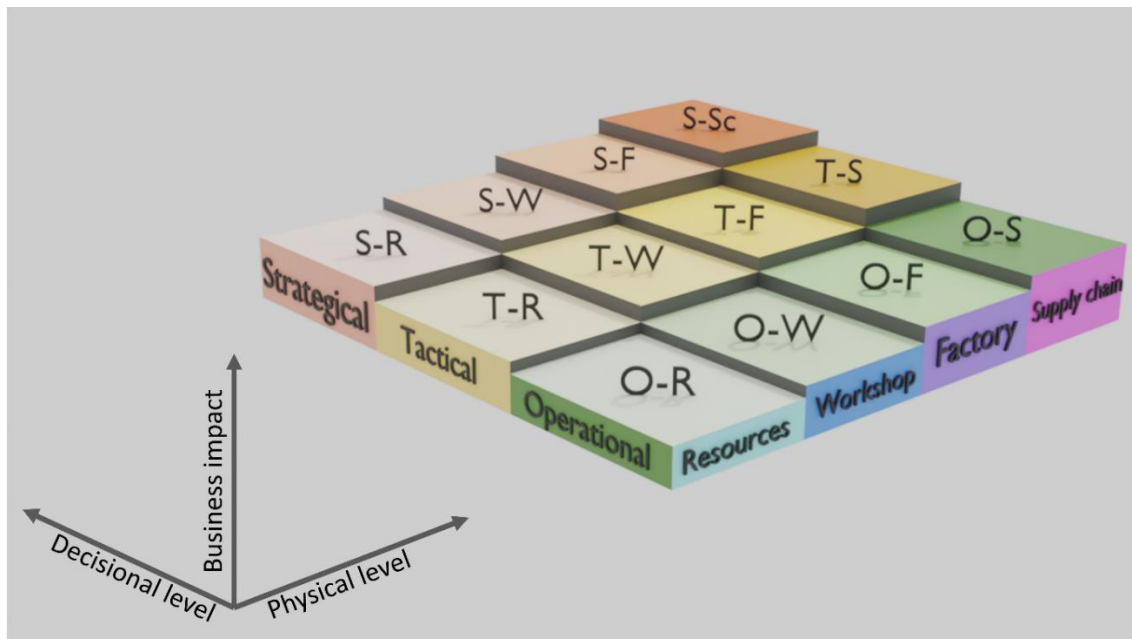


Figure 26. Matrice de classification de la flexibilité

Sur l'axe des abscisses, nous distinguons le **Niveau de Décision**, qui se segmente en plusieurs catégories essentielles : stratégiques (S), tactiques (T), opérationnelles (O) et en temps réel. Les décisions stratégiques façonnent la direction à long terme de l'entreprise, incluant des initiatives comme l'entrée sur de nouveaux marchés ou le lancement de nouveaux produits. Les décisions tactiques, de moyen terme, servent à atteindre les objectifs stratégiques et peuvent inclure la planification agrégée (famille de produit), des ajustements de capacité ou des modifications de la chaîne d'approvisionnement. À un niveau plus immédiat, les décisions opérationnelles concernent la gestion quotidienne, comme la l'opération de vente et d'exécution (*S&OE or Sales and Operation Excution*), planification opérationnelle de la production (produit par produit, Plan directeur de production ou PDP)),

l'ordonnancement et/ou le séquençage de production, ou la gestion des ressources humaines, tandis que les réactions en temps réel nécessitent un réajustement, une reconfiguration ou une adaptabilité instantanée pour répondre aux défis imprévus.

L'axe des ordonnées, le **Niveau Physique**, couvre différents niveaux de l'organisation industrielle. Au niveau des ressources (R, Resource), cela se traduit par la flexibilité des machines et des équipements, permettant une variété d'opérations ou des changements rapides. L'atelier (W, Workshop) concerne la flexibilité dans un département ou une zone spécifique de production, comme la capacité d'un atelier à passer d'un type de production à un autre sans perturbations majeures. À niveau de l'usine (F, Factory), nous considérons la flexibilité comme la capacité à réagir aux changements de demande globale ou aux perturbations de la production. Enfin, la chaîne d'approvisionnement (Sc, Supply Chain) englobe la flexibilité dans la gestion de tous les aspects de la chaîne d'approvisionnement, incluant la capacité à changer de fournisseurs ou à ajuster les niveaux de stock en réponse à des changements externes.

Ces éléments interactifs se manifestent concrètement dans des scénarios industriels. Par exemple, au niveau Stratégique-Ressources (S-R), une entreprise peut décider de développer une nouvelle gamme de moteurs électriques, ce qui implique l'investissement dans des équipements polyvalents adaptés aux besoins changeants du marché. À un niveau Tactique-Atelier (T-W), la réorganisation des lignes de montage pour améliorer l'efficacité illustre la flexibilité sans nécessiter de changements structurels majeurs dans l'infrastructure. Opérationnel-Ressource (O-R), ajuster rapidement les paramètres d'une machine pour produire une variante spécifique d'une pièce en réponse à une commande urgente démontre la flexibilité opérationnelle essentielle pour satisfaire la demande client.

La matrice de classification tridimensionnelle PDI offre une visualisation claire de l'impact des décisions à divers niveaux sur les performances et la réactivité des entreprises. Elle souligne l'importance d'une approche intégrée pour améliorer la flexibilité, réduire les coûts et accroître la compétitivité. Cette classification aide les managers à identifier précisément où et comment la flexibilité peut être optimisée à différents niveaux organisationnels pour mieux répondre aux défis du marché et de la production. Dans le Tableau 5, nous proposons une répartition de l'ensemble des types de flexibilité existant dans la littérature et présentés en section 3.5.2, ainsi que des nouveaux types de flexibilité proposés et présentés en section 4.1.1. Cette répartition est effectuée selon la classification proposée, distinguant les flexibilités du *back office* et du *front office*, ainsi que celles existantes et proposées.

Cette classification PDI offre un cadre structuré pour évaluer et améliorer les systèmes de production industrielle. Pour les managers industriels, ce tableau sert de support d'aide à la décision pour identifier et implémenter des stratégies de flexibilité à divers niveaux organisationnels, de manière ciblée et efficace. En distinguant les types de flexibilité selon les niveaux de décision (opérationnel, tactique, stratégique) et les niveaux physiques (ressources, atelier, usine, chaîne d'approvisionnement), les managers peuvent mieux comprendre où et comment investir dans des ressources et des processus pour améliorer la réactivité et l'efficacité de l'entreprise.

D'un point de vue de la recherche, ce tableau enrichit la littérature en proposant une structure multi-niveau qui peut être testée dans différents contextes industriels. Les chercheurs peuvent utiliser cette classification pour explorer les relations entre les types de flexibilité et la performance de l'entreprise, offrant ainsi des perspectives nouvelles sur la manière dont la flexibilité influence la compétitivité et la capacité d'adaptation. De plus, cette classification PDI permet d'entrevoir les interdépendances entre les différents types de flexibilité (à travers le type de flexibilité attaché à plusieurs classes), ce qui est crucial pour comprendre comment les décisions prises à un niveau de l'organisation peuvent influencer d'autres aspects et nécessiter des ajustements coordonnés à plusieurs niveaux.

Tableau 5. Proposition de classification PDI des types de flexibilité

		Dimension physique			
		Resources	Atelier	Usine	Chaine d'approvisionnement
Dimension decisionnel	Opérationnel	Machine	Manutention	Manutention	
		Manutention	Programme	Programme	
		Programme	Informatique	Machine	
		Humaine	Machine	Informatique	
		Sanitaire	Polyvalence humaine	Fournisseur	
			Stockage	Volume	
			Acheminement	Acheminement	
	Tactique	Volume	Opération	Processus	
		Processus	Processus	Fournisseur	
		Machine	Programme	Volume	
		Production	Volume	Production	
			Production	Stockage	
			Stockage		
			Informatique		
	Stratégique	Produit	Produit	Produit	Marché
		Machine	Stockage	Fournisseur	Législation
			Manutention	Client	Produit
				Energie	Fournisseur
				Législation	Client
				Administratif	Stockage
				Sanitaire	Informatique
				Informatique	Energie
					Administratif
					Sanitaire

En pratique, l'application de cette classification PDI permet de réaliser des diagnostics précis des capacités de flexibilité existantes au sein des organisations et d'identifier les lacunes spécifiques qui pourraient être comblées pour gagner en agilité. Pour les managers industriels, cela signifie une possibilité de réponse plus rapide et plus précise aux changements de la demande, aux perturbations de la chaîne d'approvisionnement, et aux innovations technologiques. Pour les chercheurs, cela offre un modèle empirique qui peut être utilisé pour quantifier l'impact de différentes stratégies de flexibilité sur les résultats opérationnels.

En conclusion, cette classification PDI des types de flexibilité sert non seulement à guider les pratiques actuelles des entreprises manufacturières mais aussi à orienter la recherche future sur l'optimisation des systèmes de production. Elle est essentielle pour développer une compréhension plus profonde des dynamiques complexes de la production industrielle moderne et pour concevoir des stratégies qui exploitent pleinement le potentiel de la flexibilité organisationnelle et opérationnelle. Elle

aide également à visualiser les effets cumulatifs des décisions interdépendantes dans le cadre d'une stratégie globale de flexibilité.

Dans la section suivante, nous allons présenter les axes de mesure PRA de chaque type de flexibilité dans chaque classe.

4.1.3 Axes de mesure PRA de la flexibilité

Malgré l'abondance de recherches sur la flexibilité dans les systèmes de production, un écart notable persiste dans la littérature existante, particulièrement en ce qui concerne une approche intégrée et multidimensionnelle de la flexibilité. Cette lacune est significative car elle empêche une compréhension complète de la manière dont les différentes dimensions de la flexibilité s'imbriquent pour influencer la performance globale du système de production. Bien que les recherches individuelles offrent des aperçus précieux sur les composantes distinctes de la flexibilité, elles ne parviennent souvent pas à capturer la dynamique complexe entre les différents aspects de la flexibilité. Ce manque d'une perspective holistique limite la capacité des praticiens et des chercheurs à développer des stratégies de production qui répondent de manière optimale aux défis de l'environnement de production moderne.

Dans cet esprit, la Figure 27 illustre notre analyse cherchant à éclairer le besoin de définir et d'exploiter ces dimensions de flexibilité. Ceci est important non seulement pour atteindre une flexibilité optimale mais aussi pour garantir que l'entreprise reste réactive dans un paysage industriel en évolution rapide. En abordant ces aspects, nous dévoilons les mécanismes à travers lesquels les systèmes de production peuvent être ajustés et adaptés.

Les trois axes principaux représentés sont :

Portée P: représentée par "Mix Flex," indique la performance en flexibilité d'un système de production. Elle mesure la diversité des opérations qu'une machine ou un système peut effectuer. Par exemple, pour une machine, cela peut inclure le nombre d'opérations différentes qu'elle peut réaliser, comme le fraisage, l'alésage, etc. Une plus grande portée signifie une capacité à exécuter un large éventail d'opérations, augmentant ainsi la flexibilité du système.

Réactivité R: représentée par "Response," mesure le temps nécessaire pour qu'un système se reconfigure ou s'adapte à une nouvelle opération ou situation. Par exemple, pour une machine, cela correspond au temps requis pour passer d'une opération de fraisage à une opération d'alésage. Une réactivité élevée implique un temps de réponse rapide, permettant au système de s'adapter rapidement aux changements et aux nouvelles exigences.

Alternative A: Les alternatives, représentées par "Volume Flex," indiquent le nombre de possibilités ou d'options disponibles dans le système. Pour une machine, cela correspondrait au nombre de types d'opérations différentes qu'elle peut effectuer. Une flexibilité élevée en termes d'alternatives signifie que le système possède plusieurs options pour accomplir diverses tâches, offrant ainsi une plus grande adaptabilité face aux variations de la demande ou aux imprévus.

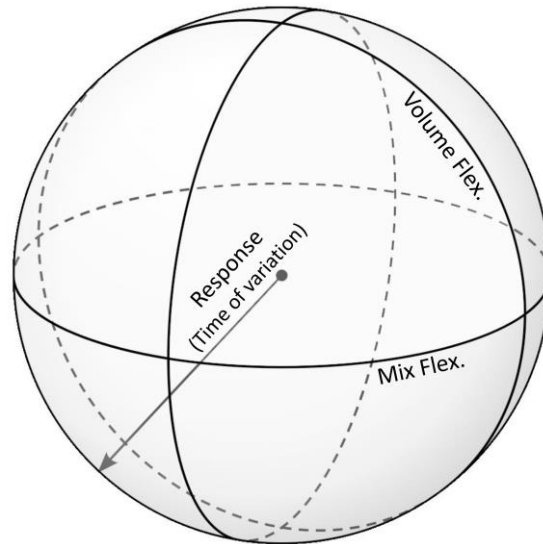


Figure 27. Dimensions de la flexibilité

Ces trois axes combinés PRA fournissent une vue d'ensemble complète de la flexibilité d'un système de production, en tenant compte de sa capacité à réaliser différentes opérations, de sa rapidité à s'adapter aux changements et de la diversité des options disponibles pour accomplir les tâches requises. Ensemble, ils permettent de mesurer et d'optimiser la flexibilité de manière holistique, améliorant ainsi la performance et la résilience du système de production.

4.1.4 Conclusion de la caractérisation

Dans cette partie, nous nous sommes concentrés sur la caractérisation de la flexibilité dans les systèmes de production industriels, en suivant trois étapes clés pour acquérir une compréhension approfondie de la flexibilité :

- Identification des types de flexibilité
- Classification des types de flexibilité PDI
- Proposition des Axes de mesure de la flexibilité PRA

En somme, ces trois points fournissent aux décideurs industriels un cadre complet pour identifier, classer et mesurer la flexibilité, leur permettant de créer des systèmes de production plus robustes, adaptables et compétitifs dans un environnement en constante évolution.

Dans les sections suivantes nous allons voir comment utiliser cette caractérisation à travers diverses méthodologies.

4.2 Cartographie de la flexibilité

Dans le but de mesurer le niveau de flexibilité, nous proposons de construire une matrice à quatre dimensions qui identifie les liens entre les trois dimensions de la classification de flexibilité PDI, les trois axes de mesure de flexibilité PRA, les indicateurs de mesure, et les quatre niveaux pour chaque indicateur ainsi que les seuils associés à chaque niveau. Les indicateurs, le nombre de niveaux et les seuils de chaque niveau sont illustrés à titre d'exemple dans le cas de FPT BLY. Ces éléments devront être spécifiés et personnalisés pour d'autres cas d'usage et adaptés aux besoins spécifiques de chaque entreprise.

4.2.1 Etapes de la cartographie de la flexibilité

Pour mesurer efficacement la flexibilité dans les systèmes de production, nous proposons une méthodologie en plusieurs étapes, structurée comme suit :

1. **Sélectionner une dimension physique** : La première étape consiste à choisir une dimension physique spécifique de l'organisation industrielle. Cela peut inclure les ressources (machines et équipements), l'atelier, l'usine ou la chaîne d'approvisionnement. Cette sélection permet de concentrer l'analyse sur une partie précise du système de production.
2. **Focaliser sur une dimension décisionnelle** : Ensuite, il est essentiel de se focaliser sur une dimension décisionnelle, qu'elle soit stratégique, tactique, opérationnelle ou en temps réel. Cette focalisation aide à aligner les efforts de flexibilité avec les objectifs décisionnels de l'entreprise, garantissant que les stratégies développées sont pertinentes et efficaces à chaque niveau de décision.
3. **Identifier les types de flexibilité influant sur ces dimensions** : Une fois les dimensions physique et décisionnelle déterminées, l'étape suivante consiste à identifier les types de flexibilité qui influent sur ces dimensions. Cela peut inclure la flexibilité client, fournisseur, sanitaire, énergétique, humaine, informatique, de stockage ou législative. Comprendre quels types de flexibilité est les plus pertinents permet de cibler les efforts de manière plus précise.
4. **Identifier les indicateurs pertinents sur chaque axe de mesure** : Pour chaque type de flexibilité identifié, il est crucial de déterminer les indicateurs pertinents sur les trois axes de mesure de la flexibilité PRA : la portée, la réactivité et les alternatives. Ces indicateurs fourniront des données quantitatives pour évaluer la performance en flexibilité.
5. **Déterminer les seuils de valeur de chaque indicateur pour chaque niveau** : Enfin, il faut établir les seuils de valeur pour chaque indicateur, correspondant à différents niveaux de performance. Ces seuils doivent être adaptés aux spécificités de l'entreprise et des cas d'usage étudiés. En définissant ces niveaux, les décideurs peuvent évaluer où se situe l'organisation par rapport à ses objectifs de flexibilité et identifier les domaines nécessitant des améliorations.

Cette méthodologie permet de structurer l'évaluation de la flexibilité de manière systématique et rigoureuse, fournissant aux décideurs industriels des outils pratiques pour améliorer la réactivité et l'efficacité de leurs systèmes de production.

4.2.2 Application de la cartographie de la flexibilité

Cette section se concentrera sur l'application de la méthodologie de cartographie proposé. Les indicateurs et les seuils présentés ont été défini par les experts de FPT-BLY pour leur système de production.

Le Tableau 6 présente notre proposition. Dans un souci de clarté nous présenterons seulement la dimension physique « Ressources ». Le reste de la cartographie est disponible à l'Annexe B.

Tableau 6. Cartographie flexibilité FPT-BLY "Ressource"

Dimension physique : Ressource							
Dimension décisionnel	Type de flexibilité	Axe de mesure	Indicateur	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Opérationnel	Machine	Portée	Nombre d'opération réalisable sur la machine	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
		Réactivité	Temps moyen pour changer d'opération (minutes)	> 60 min	30 à 60 min	15 à 30 min	< 15 min
		Alternative	Nombre de types d'opérations supportées	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
	Manutention	Portée	Nombre de pièces manipulées par heure	<= 20	21 à 40	41 à 60	> 60
		Réactivité	Temps de manutention par pièce (secondes)	> 30s	20 à 30s	10 à 20s	< 10s
		Alternative	Nombre de types de pièces manipulées	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
	Programme	Portée	Nombre de programmes gérés simultanément	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
		Réactivité	Temps de changement de programme (minutes)	> 45 min	30 à 45 min	15 à 30 min	< 15 min
		Alternative	Nombre de programmes alternatifs disponibles	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Humaine	Portée	Nombre de tâches différentes exécutées par les opérateurs	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9	
	Réactivité	Temps de formation pour une nouvelle tâche (heures)	> 20h	10 à 20h	5 à 10h	< 5h	
	Alternative	Nombre de tâches maîtrisées par les opérateurs	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9	
Sanitaire	Portée	Respect des protocoles sanitaires (%)	< 80%	80 à 90%	91 à 95%	> 95%	
	Réactivité	Temps de mise en conformité (minutes)	> 60 min	30 à 60 min	15 à 30 min	< 15 min	
	Alternative	Nombre de protocoles sanitaires disponibles	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6	
Tactique	Volume	Portée	Taux de production par heure (unités)	<= 100	101 à 200	201 à 300	> 300
		Réactivité	Temps d'ajustement du volume de production (minutes)	> 60 min	30 à 60 min	15 à 30 min	< 15 min
		Alternative	Nombre de niveaux de production réalisables	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
	Processus	Portée	Nombre de familles de produits traitées	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
		Réactivité	Temps de changement de famille de produits (minutes)	> 60 min	30 à 60 min	15 à 30 min	< 15 min
		Alternative	Nombre de processus alternatifs disponibles	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
	Production	Portée	Nombre de références produits fabriquées	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15
		Réactivité	Temps de mise en production d'une nouvelle référence (jours)	> 7 jours	4 à 7 jours	2 à 3 jours	< 2 jours
		Alternative	Nombre de configurations de production possibles	<= 3	4 à 5	6 à 7	> 7
Machine	Portée	Nombre de machines reconfigurables	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6	
	Réactivité	Temps de reconfiguration des machines (minutes)	> 60 min	30 à 60 min	15 à 30 min	< 15 min	
	Alternative	Nombre de configurations de machine possibles	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6	
Stratégique	Produit	Portée	Nombre de nouveaux produits introduits avec succès par an	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
		Réactivité	Temps de mise en production d'un nouveau produit (mois)	> 6 mois	4 à 6 mois	2 à 4 mois	< 2 mois
		Alternative	Nombre de variantes de produits disponibles	<= 3	4 à 5	6 à 7	> 7
	Machine	Portée	Investissement total en nouvelles machines (%)	< 5%	5 à 10%	11 à 15%	> 15%
		Réactivité	Temps de retour sur investissement (années)	> 5 ans	4 à 5 ans	2 à 3 ans	< 2 ans
		Alternative	Nombre de nouvelles technologies intégrées par an	<= 1	2 à 3	4 à 5	> 5

La méthodologie utilisée pour élaborer ce tableau se déroule en plusieurs étapes clés, permettant d'évaluer et d'améliorer la flexibilité à travers différents indicateurs et niveaux de performance.

- Sélection d'Indicateurs par Axe de Mesure de la Flexibilité PRA :
 - Pour chaque type de flexibilité identifié (machine, manutention, programme, etc.), nous sélectionnons un indicateur pertinent pour chacun des trois axes de mesure de la flexibilité PRA. Par exemple, pour la flexibilité machine, les indicateurs choisis sont le nombre d'opérations réalisables (portée), le temps moyen pour changer d'opération (réactivité), et le nombre de types d'opérations supportées (alternatives).
- Définition des Seuils de Performance :
 - Pour chaque indicateur, nous définissons des seuils de performance répartis en quatre niveaux, allant de 1 (le plus bas) à 4 (le plus élevé). Ces niveaux permettent de quantifier la performance actuelle de l'usine et d'identifier les améliorations nécessaires pour atteindre des niveaux supérieurs de flexibilité. Par exemple, pour l'indicateur "temps moyen pour changer d'opération", un temps supérieur à 60 minutes correspond au niveau 1, tandis qu'un temps inférieur à 15 minutes correspond au niveau 4.
- Évaluation du Niveau Actuel de Flexibilité :
 - Pour chaque périmètre (opérationnel, tactique, stratégique), nous évaluons la position actuelle de l'usine sur une échelle de 1 à 4 pour chaque indicateur. Cette évaluation permet de faire un état des lieux précis de la flexibilité actuelle. Par exemple, si le temps moyen pour changer d'opération est de 25 minutes, l'usine se situe au niveau 3 pour cet indicateur.
- Identification des Actions pour Atteindre le Niveau Supérieur :
 - Une fois l'évaluation terminée, nous identifions les actions spécifiques nécessaires pour améliorer la flexibilité et atteindre le niveau supérieur. Cela peut inclure des investissements dans de nouvelles technologies, des formations supplémentaires pour les opérateurs, ou des révisions de processus. L'objectif est de créer un plan d'action clair pour progresser vers une flexibilité optimale.

Cette méthodologie permet aux décideurs industriels de cartographier efficacement la flexibilité de leur système de production, de comprendre les lacunes actuelles et de planifier des améliorations ciblées. En utilisant cette approche structurée, les managers peuvent améliorer la réactivité et l'efficacité de leur organisation, renforçant ainsi leur compétitivité sur le marché.

4.2.3 Conclusion de la cartographie de la flexibilité

La méthodologie de cartographie de la flexibilité pour la dimension physique "ressource" présente plusieurs avantages significatifs :

- Points positifs :
 - Simplicité de la méthodologie : La méthodologie est simple et facile à comprendre, ce qui permet aux décideurs de l'appliquer rapidement et efficacement sans nécessiter de formations complexes ou de ressources supplémentaires.
 - Engagement sur la flexibilité : Elle permet de lancer un travail structuré sur la flexibilité au sein de l'organisation. En identifiant clairement les types de flexibilité,

les indicateurs et les niveaux de performance, les entreprises peuvent engager des initiatives ciblées pour améliorer leur flexibilité globale.

- Définition des actions pour atteindre le niveau supérieur : Connaître les niveaux supérieurs de flexibilité permet de définir précisément les actions à mettre en place pour progresser. Cela aide à élaborer des plans d'action concrets et mesurables pour atteindre des niveaux de flexibilité plus élevés, en alignant les efforts de l'entreprise sur des objectifs clairs et atteignables.
- Points à améliorer :
 - Absence de mesures objectives : La méthodologie repose sur des évaluations subjective plutôt que sur des mesures objectives. Bien que cela offre une vue d'ensemble utile, il est essentiel de compléter cette approche, si possible, par des données quantitatives et des mesures précises pour obtenir une évaluation plus complète et plus fiable de la flexibilité.

En conclusion, cette méthodologie constitue une première étape précieuse pour évaluer et améliorer la flexibilité dans les systèmes de production industriels. Elle fournit un cadre structuré et accessible pour initier des améliorations, tout en soulignant la nécessité d'intégrer des mesures réelles pour affiner et valider les évaluations effectuées.

Dans la section suivante, nous proposons une méthodologie qui permet de répondre au point négatif de cette cartographie. La prochaine méthodologie permet d'aller plus loin dans la mesure de la flexibilité.

4.3 Méthode de mesure de la flexibilité avec les KPIs

Dans la section précédente, nous avons proposé une méthodologie basée sur une cartographie de la flexibilité qui permet d'évaluer le niveau de flexibilité dans l'ensemble des aspects de l'industrie au travers des types de flexibilité et de leurs indicateurs.

Cette seconde méthodologie proposée a pour objectif de répondre au point négatif principale de la méthodologie de cartographie, c'est-à-dire, la quantification précise de la flexibilité. Pour ce faire nous proposons une méthodologie basée sur les indicateurs (*Key Performance Indicator*, KPI) existants de l'entreprise. Dans notre cas, nous utiliserons les KPIs de l'usine de FPT-BLY. Cette approche méthodologique est conçue pour intégrer efficacement ces mesures sans imposer de charges supplémentaires aux décideurs. En s'appuyant sur des données concrètes et des analyses quantitatives, cette méthodologie vise à faciliter la prise de décision en fournissant un outil de mesure simple et opérationnel.

L'utilisation des KPIs existants de l'entreprise présente plusieurs avantages significatifs. Elle permet de rester dans un domaine bien maîtrisé par les décideurs et les experts de l'entreprise, ce qui facilite l'acceptation et l'application de la méthodologie. De plus, cela évite l'ajout de processus supplémentaires pour calculer de nouveaux indicateurs, simplifiant ainsi le travail et réduisant les coûts associés. Enfin, en s'appuyant sur un historique de données déjà disponible, cette approche permet d'augmenter la précision des analyses en écartant les valeurs incohérentes et en s'appuyant sur des tendances de données fiables et éprouvées.

A chaque étape, nous présenterons le cas réel de FPT-BLY. L'objectif étant de définir le niveau de flexibilité global et par type de flexibilité afin de définir un plan d'action pour améliorer la flexibilité globale de l'entreprise

4.3.1 Formalisation mathématique de méthodologie

Cette section permet de présenter la formulation mathématique qui sera utilisée dans la section suivante en utilisant les KPIs de FPT-BLY.

Indices :

- i Index pour chaque type de flexibilité $i \in 1, 2, \dots, I$
 j Index pour chaque KPI normalisé $j \in 1, 2, \dots, J$

Paramètres :

- Y KPI existant de FPT-BLY
 X Type de flexibilité
 FI Indicateur de flexibilité
 GFI Indicateur de Flexibilité Global
 I Nombre total de type de flexibilité
 J Nombre total de KPI de FPT-BLY
 α_{ij} Facteur d'importance (Entre les KPIs et les types de flexibilité) ($0 \leq \alpha_{ij} \leq 1$)
 β_i Facteur d'importance (Entre FI & GFI) ($0 \leq \beta_i \leq 1$)
 v_j Valeur du KPI

Formulations mathématiques :

$$FI_{x_i} = \sum_{j=0}^Y \alpha_{ij} \cdot v_j \quad (1)$$

$$GFI = \sum_{i=0}^X \beta_i \sum_{j=0}^Y \alpha_{ij} \cdot v_j \quad (2)$$

L'équation (1) permet de calculer l'indicateur de flexibilité pour un type de flexibilité donné i , en utilisant une somme pondérée des valeurs des KPIs normalisés v_j et leurs facteurs d'importance respectifs α_{ij}

La seconde équation (2) combine les différents indicateurs de flexibilité FI_{x_i} pour obtenir un indicateur global de flexibilité. Ce calcul se fait également à travers une somme pondérée, en utilisant cette fois les facteurs d'importance β_i pour chaque type de flexibilité

L'utilité de ces équations réside dans leur capacité à quantifier la flexibilité de manière précise et intégrée, en tenant compte de multiples dimensions de performance. En appliquant cette méthodologie, les décideurs de FPT-BLY peuvent identifier les points faibles et forts de leur système de production en termes de flexibilité, et ainsi définir des plans d'action spécifiques pour améliorer leur compétitivité dans le cadre de l'Industrie 4.0. Les facteurs d'importance (α_{ij} et β_i) permettent d'ajuster les calculs en fonction des priorités stratégiques de l'entreprise, assurant que les mesures de flexibilité reflètent fidèlement les besoins et les objectifs organisationnels.

Pour certaines étapes décrites après, nous utiliserons une méthode de normalisation flou (*fuzzy*), comme illustrer par les équations suivantes :

$$\text{Bénéfique } \bar{x}_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

$$\text{Coût } \bar{x}_i = \frac{\max(x) - x_i}{\max(x) - \min(x)}$$

La normalisation floue est une technique utilisée pour transformer les données initiales en valeurs comprises entre 0 et 1, facilitant leur utilisation et comparabilité. Cette méthode distingue deux types de critères : bénéfiques et coût. Les critères bénéfiques (ascendants) sont ceux pour lesquels des valeurs plus élevées sont préférables, par exemple, l'efficacité ou la qualité, et sont normalisés en utilisant une formule qui augmente avec la valeur. Les critères coût (descendants), pour lesquels des valeurs plus faibles sont préférables, comme les coûts ou les délais, sont normalisés avec une formule qui diminue avec la valeur. Cette distinction permet d'adapter la normalisation aux caractéristiques spécifiques de chaque critère, assurant une évaluation plus précise et pertinente des données.

4.3.2 Application de la méthodologie

Afin d'établir le processus de mesure de flexibilité avec les KPIs, nous proposons une méthodologie à six étapes, présentée en Figure 28.

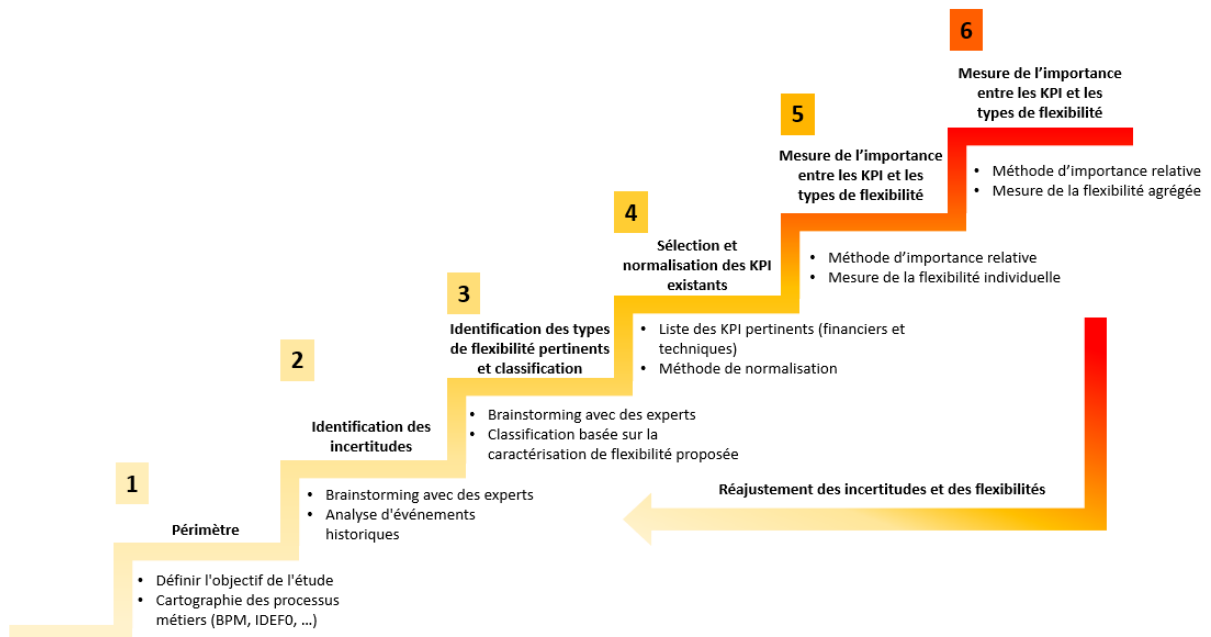


Figure 28. Etapes de la méthodologie par KPIs

Elle commence par la définition du périmètre, où l'objectif de l'étude est établi et les processus métiers sont cartographiés à l'aide d'outils tels que BPMN (Business Process Model and Notation) ou IDEF0 (Integration Definition for Process Modeling). La deuxième étape consiste à identifier les incertitudes par le biais de remue-méninges (*Brainstormings*) avec des experts et d'analyses d'événements historiques. Ensuite, la troisième étape implique l'identification et la classification des types de flexibilité pertinents, encore une fois par des discussions avec des experts. La quatrième étape se concentre sur la sélection et la normalisation des KPIs existants, en incluant des indicateurs financiers et techniques. La cinquième étape mesure l'importance relative entre les KPIs et les types de flexibilité, permettant ainsi de quantifier la flexibilité individuelle. Enfin, la sixième étape affine cette mesure en

évaluant l'importance agrégée des KPIs par rapport aux types de flexibilité, intégrant ainsi toutes les dimensions de flexibilité dans l'évaluation globale. Cette méthodologie structurée permet de réajuster les incertitudes et d'améliorer continuellement la flexibilité des systèmes de production.

Etape 1 Définir la portée et le périmètre de l'étude :

La première étape pour augmenter la probabilité de réussite du projet est de définir la portée du projet. Cela concerne l'aspect technique (la portée physique du projet) ou un aspect humain (le niveau de prise de décision concerné). De plus, la cartographie d'un modèle de gestion des processus métier peut être extrêmement utile. Cela serait bénéfique pour encadrer le projet en utilisant la méthodologie IDEF0. Nous pouvons modéliser la partie physique (machines, ...) et la partie cybernétique (information, réseau, décision, ...) du système de fabrication. Cette cartographie est une ressource pour l'identification des incertitudes les plus pertinentes.

Pour FPT-Bly le périmètre est l'ensemble de l'usine du site de Bourbon-Lancy. L'objectif est de mesurer la flexibilité sur le processus de fabrication du client au fournisseur. Un diagramme IDEF0 a été réalisé pour comprendre et définir les contours du périmètre. Une version simplifiée illustré par la Figure 29, une version détaillée en annexe A.

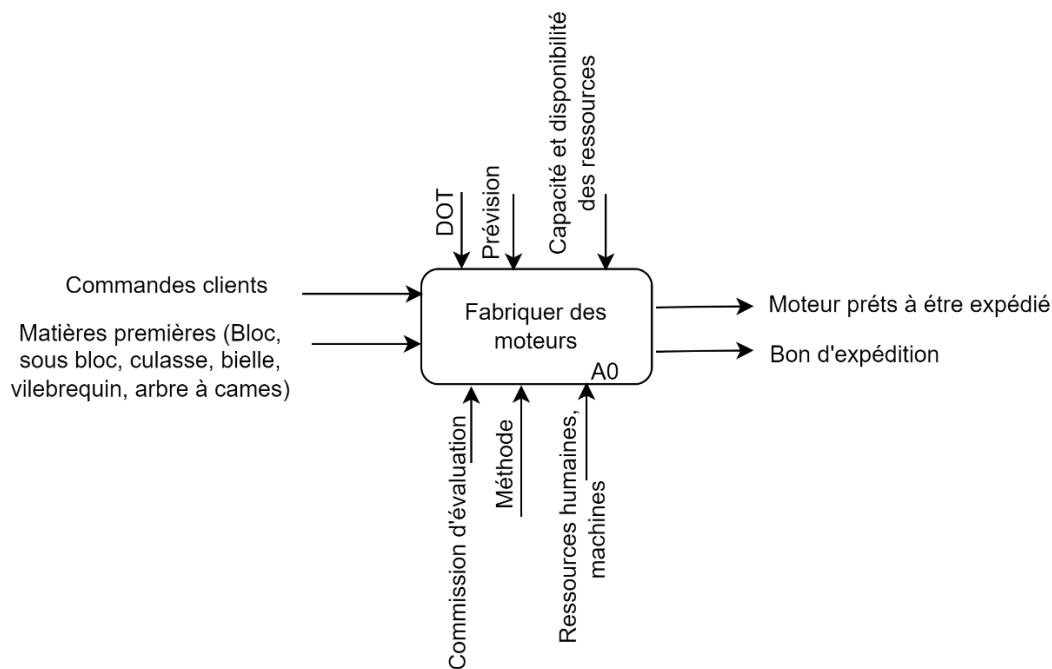


Figure 29. IDEF0 global de FPT-BLY

Etape 2 Identification des incertitudes :

La deuxième étape consiste à identifier les incertitudes les plus pertinentes dans une entreprise. Les informations historiques et les connaissances sur les événements incertains passés, ainsi qu'une séance de remue-méninges avec des experts, peuvent révéler des événements incertains susceptibles d'influencer la continuité des activités. En étant conscient des possibilités et de la complexité associée à la structure du système de production, les décideurs peuvent reconnaître les dangers des temps d'arrêt et définir le niveau approprié de flexibilité.

Pour FPT-BLY, comme présenté dans la section 2.6, dans le cadre de notre étude, l'incertitude réside dans sa capacité à intégrer rapidement et à moindre coût un nouveau moteur, le XC13, et de manière globale, l'ensemble de la famille Cursor X. Ce moteur, qui présente une conception différente par rapport à la gamme actuelle, inclut des composants spécifiques tels que la culasse, qui a une conception

complètement différente. De plus, à la suite de l'augmentation des coûts de l'énergie observée au moment de l'étude, FPT-BLY a également cherché à évaluer sa flexibilité en matière d'énergie.

Etape 3 Identification des types de flexibilité pertinents et classification :

En tenant compte de nombreux types de flexibilité, il est nécessaire de choisir un ensemble de types de flexibilité appropriés qui ont un impact significatif sur les projets et les objectifs stratégiques. Cet ensemble de flexibilité pourrait être sélectionné lorsque la portée de l'étude est bien définie et que les incertitudes qui affectent le système de production ont été identifiées. Pour ce faire, il est nécessaire de comprendre l'activité de l'entreprise, car il est vital de comprendre quels types de flexibilité ont le plus d'impact sur chaque partie du système de production. Pour cette étape, le remue-méninge avec des spécialistes ayant cette compréhension aiderait à sélectionner les types de flexibilité de manière plus précise. De plus, comme mentionné précédemment, un type de flexibilité sans portée peut être difficile à évaluer ; par conséquent, ils doivent être classifiés en utilisant la matrice de classification des types de flexibilité présenté à la section 4.1.2. Les méthodes de prise de décision multicritères peuvent également aider dans la sélection des types de flexibilité et leur classification.

Afin de répondre aux attentes de FPT-BLY défini à l'étape 2, cinq types de flexibilité ont été choisis. Pour améliorer la lisibilité, les types de flexibilité seront notés X_i comme illustré dans le Tableau 7.

Tableau 7. Types de flexibilité pour le cas d'étude de FPT-BLY

Notation	Types de flexibilité
X_1	Client
X_2	Énergie
X_3	Fournisseur
X_4	Produit
X_5	Humain

Etape 4 Sélection et normalisation des KPI existants :

Pour la quatrième phase, en raison de la complexité de la mesure directe de la flexibilité, il est proposé d'utiliser les KPIs actuellement disponibles dans l'entreprise. Ainsi, il est nécessaire d'identifier les KPIs pertinents en fonction du périmètre qui a été choisie. Ces KPIs sont particulièrement liés à chaque système de fabrication. L'entreprise surveille généralement et contrôle certains KPIs dans le cadre de sa stratégie de contrôle de la performance et de la fabrication lean.

Pour bien mesurer la flexibilité d'un système de production, il est essentiel de sélectionner des KPIs qui couvrent toutes les considérations technologiques, financières, humaines, informatique, de sécurité et de qualité. En ce qui concerne la nature de chaque KPI, des méthodes de mesure qualitative ou quantitative pourraient être utilisées. Dans ce cas, pour mélanger plusieurs mesures et avoir la possibilité de comparer les valeurs sur différente flexibilité et indicateur (avoir la même échelle de comparaison), il est nécessaire de normaliser les valeurs, ce qui signifie supprimer les unités et attribuer à chaque valeur une valeur entre 0 et 1 (Vafaei & Ribeiro, 2016). Ce processus permettra également de combiner les indicateurs dans les étapes suivantes pour produire des indicateurs globaux de flexibilité. Afin d'obtenir des valeurs comparables et normalisées, des méthodes de normalisation, telles que la méthode de normalisation flou (*fuzzy*) (expliqué en section 4.3.1), pourraient être utilisées. Puis, il faut définir le sens de chaque KPI (coût ou bénéfique) et normaliser les données. Un impact bénéfique sera établi si, lorsqu'un indicateur tend vers la valeur 1, cela est positif pour le système, comme pour l'efficacité où plus elle est élevée, mieux c'est. À l'inverse, les émissions de CO₂, lorsqu'elles tendent vers la valeur 1, pénalisent la performance du système.

Dans le cas de FPT-BLY nous avons utilisé les KPI de la « Scrore Card » qui est une suite de KPI jugeant de la performance de l'usine entière, voir le Tableau 8. Les Kpis seront notés Y_j .

Tableau 8. Liste des KPI de FPT-BLY

Notation	Kpi	Définition
Y_1	CAPEX	Budget disponible pour l'investissement
Y_2	Émissions de CO2	Émission totale de CO2
Y_3	Qualité de livraison du fournisseur	Qualité des composants livrés par le fournisseur
Y_4	Pièce manquante FTQ	Nombre de non-conformités au premier essai en raison de pièces manquantes
Y_5	Efficacité	Valeur ajoutée
Y_6	Coût de production	Coût interne de production
Y_7	Absentéisme total	Pourcentage d'absentéisme
Y_8	Valeur totale des stocks	Valeur de l'inventaire

CAPEX (Y_1) : Le CAPEX, ou *capital expenditure*, représente le budget dédié aux investissements importants ou aux dépenses en actifs fixes, tels que les équipements ou les installations. Cela inclut les achats qui sont prévus pour générer des bénéfices à long terme, ce qui est essentiel pour évaluer la capacité d'une entreprise à financer ses initiatives de croissance ou de modernisation sans compromettre sa santé financière.

Émissions de CO2 (Y_2) : Ce KPI mesure le volume total de dioxyde de carbone émis par l'entreprise, souvent exprimé en tonnes. Cette valeur est calculé chez FPT-BLY en fonction de la consommation énergétique. Il est important pour évaluer l'impact environnemental de l'entreprise et sa conformité avec les réglementations écologiques. Réduire ces émissions est également vital pour les initiatives de développement durable et peut influencer positivement l'image de l'entreprise.

Qualité de livraison du fournisseur (Y_3) : Ce KPI évalue la qualité des composants livrés par les fournisseurs, mesurant la proportion de pièces ou de matériaux qui répondent aux normes de qualité dès leur réception. Cela aide à maintenir la qualité des produits finis et à minimiser les retards de production dus à des matériaux défectueux.

Pièce manquante FTQ (Y_4) : Ce '*First Time Quality*' pour les pièces manquantes indique le nombre d'occurrences où les pièces n'étaient pas conformes aux spécifications initiales. Cet indicateur aide à identifier les faiblesses dans les processus de production ou de contrôle qualité, permettant de prendre des mesures correctives pour améliorer l'efficacité de la production.

Efficacité (Y_5) : Mesure la valeur ajoutée par l'entreprise à travers ses activités de production, souvent exprimée en termes de rendement ou de productivité. Cet indicateur est important pour évaluer l'efficacité des opérations et la capacité de l'entreprise à transformer efficacement les ressources en produits finis.

Coût de production (Y_6) : Ce KPI calcule le coût total engagé pour la fabrication des produits de l'entreprise, incluant les coûts directs tels que la main-d'œuvre et les matériaux, ainsi que les coûts indirects associés à la production. Gérer efficacement ce KPI aide à maximiser la rentabilité.

Absentéisme total (Y_7) : Mesure le pourcentage d'absences parmi les employés par rapport aux jours de travail prévus. Un taux élevé peut indiquer des problèmes de moral, de conditions de travail ou de santé parmi les employés, affectant directement la productivité de l'entreprise.

Valeur totale des stocks (Y_8) : Indique la valeur financière totale des biens et matériaux stockés par l'entreprise. Ce KPI est important pour la gestion de la chaîne d'approvisionnement et aide à optimiser les niveaux de stock pour répondre à la demande tout en minimisant les coûts de détention.

Les résultats des normalisations de ces indicateurs sont présentés dans le Tableau 9.

Tableau 9. Résultats des normalisations des indicateurs

Notation	Impact des critères	Valeur
Y ₁	Bénéfice	0,13
Y ₂	Coût	0,38
Y ₃	Bénéfice	0,79
Y ₄	Coût	0,29
Y ₅	Bénéfice	0,33
Y ₆	Coût	0,23
Y ₇	Coût	0,89
Y ₈	Coût	0,24

Etape 5 Mesure de l'importance entre les KPI et les types de flexibilité :

Une fois les valeurs normalisées des KPI calculées, la cinquième étape consiste à les transformer en indicateurs de flexibilité. Une approche doit encore être utilisée pour chaque type de flexibilité choisi afin de fournir le facteur d'interdépendance (Poids α) avec l'ensemble des indicateurs spécifiés. Pour cela, il faut déterminer l'importance de chaque indicateur Y à représenter chaque type de flexibilité. Plusieurs solutions sont possibles, nous conseillons d'utiliser la méthode BWM de (Rezaei, 2015) parce qu'elle est simple d'utilisation car elle ne nécessite de comparer l'importance de chaque type de flexibilité qu'une seule fois par KPI. De plus, c'est une méthode facile à mettre en place lors de réunion de remue-méninges. Pour donner suite à la détermination du facteur d'interdépendance, les indicateurs de flexibilité (FI) peuvent être calculés avec la valeur normalisée du KPI.

Le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** présente les résultats des sommes pondérées pour chaque type de flexibilité.

Tableau 10. Détails des valeurs pour les indicateurs de flexibilité

		Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8
Valeur normalisée des KPI		0,13	0,38	0,79	0,29	0,33	0,23	0,88	0,24
Flexibilité Produit	Poids (α)	0,06	0,18	0,18	0,12	0,09	0,27	0,02	0,06
	Somme pondérée	0,01	0,07	0,15	0,04	0,03	0,06	0,02	0,01
Flexibilité Client	Poids (α)	0,16	0,08	0,14	0,16	0,26	0,11	0,05	0,02
	Somme pondérée	0,02	0,03	0,11	0,05	0,09	0,02	0,05	0,01
Flexibilité Fournisseur	Poids (α)	0,10	0,13	0,30	0,20	0,08	0,10	0,03	0,07
	Somme pondérée	0,01	0,05	0,24	0,06	0,03	0,02	0,02	0,02
Flexibilité Energie	Poids (α)	0,10	0,32	0,07	0,07	0,14	0,14	0,03	0,14
	Somme pondérée	0,01	0,12	0,05	0,02	0,04	0,03	0,02	0,03
Flexibilité humaine	Poids (α)	0,14	0,03	0,07	0,07	0,14	0,14	0,33	0,07
	Somme pondérée	0,02	0,01	0,06	0,02	0,05	0,03	0,29	0,02

Ce graphique illustré par la Figure 30 présente les indicateurs de flexibilité, en utilisant la méthode d'agrégation poids pondéré, pour l'usine FPT-BLY, illustrant les différents niveaux dans cinq flexibilités clés : Humaine, le fournisseur, le produit, le client et l'énergie. Les pourcentages élevés indiquent une plus grande flexibilité dans le domaine respectif, avec la polyvalence humaine affichant le score le plus élevé à 49,4% et l'énergie le plus bas à 34,2%. Ces résultats quantifient la flexibilité de l'usine en se basant sur des indicateurs spécifiques à FPT-BLY.

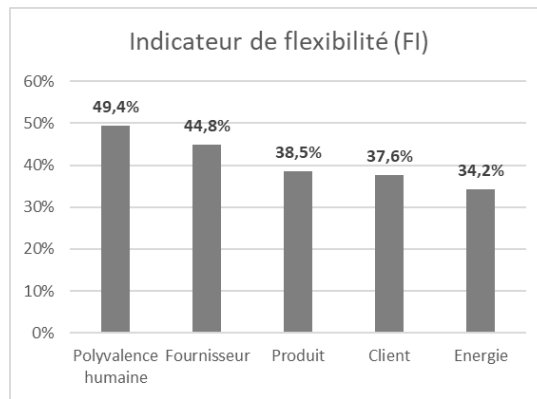


Figure 30. Résultat des indicateurs de flexibilité pour FPT-BLY

Il est important de noter que ces indicateurs sont relatifs, c'est-à-dire qu'ils sont utilisables seulement dans le contexte où il a été calculé et ils ne permettent pas de comparer directement les usines entre elles à moins que toutes les étapes de mesure soient identiques. Ils sont spécifiquement conçus pour mesurer et suivre l'évolution de la flexibilité au sein de cette usine particulière. Ainsi, ils offrent un moyen de quantifier les progrès au fur et à mesure des améliorations opérationnelles et d'identifier les domaines prioritaires pour de futures interventions. L'objectif principal de ces indicateurs est de fournir une vision claire des forces et des possibilités d'amélioration au sein de l'usine. En identifiant les domaines où la flexibilité est la plus élevée ou la plus faible, la direction peut mieux allouer ses ressources pour renforcer les aspects essentiels à sa compétitivité et à sa capacité à répondre rapidement aux changements du marché et aux exigences des clients.

Etape 6 Mesure de l'indicateur global de flexibilité agrégée :

En utilisant les FIs (Flexibilité individuelle), calculés à l'étape précédente, un Indicateur Global de Flexibilité (GFI) pourrait également être calculé. L'importance de chaque FI est encore identifiée via la BWM. Cette étape devrait être réalisée de la même manière que l'étape précédente pour agréger, par la méthode d'agrégation par poids pondéré les FIs et acquérir ce qui sera utilisé à l'étape suivante. Une fois de plus, le GFI doit indiquer la performance globale du système de fabrication. De plus, cela aiderait à construire les seuils objectifs à atteindre en fonction des événements incertains. Les formulations sont fournies à la section 4.3.1.

Dans le Tableau 11, nous présentons les résultats de GFI de FPT-BLY pour ce cas d'étude. Ces 39.6% doivent être considérés comme un indicateur relatif, reflétant la flexibilité globale de l'usine. Cet indicateur devrait être utilisé pour quantifier les performances des actions mises en place. Il pourrait également servir à évaluer différentes hypothèses, telles que le choix des types de machines ou leur emplacement dans un atelier.

Tableau 11. Détails de valeurs pour l'indicateur de flexibilité global

		Human polyvalent	Fournisseur	Produit	Client	Energy	Indicateur de Flexibilité Global (GFI)
Valeur normalisée des FIs		0,494	0,448	0,385	0,376	0,342	
Indicateur de Flexibilité Global (GFI)	Poids (β)	0,045	0,244	0,163	0,425	0,122	
	Somme pondérée	0,022	0,110	0,063	0,160	0,042	

4.3.3 Conclusion de la méthodologie avec KPIs

En conclusion, cette section propose et applique une méthode pour identifier le type approprié de flexibilité, ainsi que les niveaux de flexibilité individuels et globaux pertinents. Cette méthode propose de transformer les indicateurs clés de performance existants (KPI) en indicateurs de flexibilité (FI) pour caractériser et quantifier le niveau de flexibilité. Ces indicateurs pourraient être utilisés pour une meilleure compréhension du système de fabrication. La méthode proposée pourrait largement être utilisée dans un grand nombre de projets stratégiques. Elle pourrait également être utilisée pour déterminer l'importance entre différents types de flexibilité. Le GFI pourrait également être utilisé pour suivre le niveau de flexibilité et de performance et déclencher des modifications.

L'application de cette méthode dans le cas de l'industrie automobile, qui souhaite introduire un nouveau produit, met en lumière les avantages et limites de la méthode proposée. C'était également une bonne opportunité pour déterminer le niveau réel de plusieurs types de flexibilité et identifier les niveaux individuels et globaux appropriés de flexibilité. Une autre contribution de cette étude concerne la transformation des KPIs existants en indicateurs de flexibilité.

4.4 Conclusion du chapitre

Dans ce Chapitre, nous avons détaillé la caractérisation de la flexibilité ainsi que deux méthodologies simples pour l'évaluation de la flexibilité. Nous avons abordé la caractérisation des différents types de flexibilité, leur classification, et les axes de mesure associés. Cette approche méthodologique permet d'établir une base solide pour comprendre comment chaque type de flexibilité contribue à la compétitivité industrielle.

Nous avons ensuite présenté la cartographie de la flexibilité, qui sert à visualiser et analyser les divers aspects de flexibilité au sein de l'usine FPT-BLY. Cette cartographie est cruciale pour identifier les zones nécessitant des améliorations et pour planifier les futurs projets d'amélioration de la flexibilité de manière stratégique.

Un autre point clé de ce chapitre est la méthodologie de mesure de la flexibilité à travers les KPIs existants de l'entreprise. En utilisant les indicateurs déjà en place, nous pouvons fournir une évaluation précise et opérationnelle de la flexibilité sans imposer de charges supplémentaires aux décideurs. Cette approche facilite la prise de décision en s'appuyant sur des données concrètes et historiques, permettant ainsi de tendre vers plus d'exactitude en écartant les valeurs incohérentes. La formalisation mathématique des indicateurs de flexibilité et de l'indicateur global de flexibilité (GFI) offre un cadre quantitatif pour évaluer et comparer les niveaux de flexibilité. Cette formalisation permet non seulement de diagnostiquer l'état actuel de la flexibilité, mais aussi de définir un plan d'action pour son amélioration continue.

En conclusion, ce chapitre pose les bases des méthodologies d'évaluation et de mesure rigoureuse et intégrée pour évaluer la flexibilité des systèmes de production. En s'appuyant sur des outils conceptuels et mathématiques solides. Ces méthodologies sont simples pour permettre d'être appliqué facilement dans l'industrie et permette d'effectuer les premiers travaux sur la flexibilité. Ces méthodologies présentent également quelques faiblesses d'un point de vue de la recherche théorique, que nous tenterons de résoudre en proposant des modèles mathématiques et d'optimisation dans le chapitre suivant.

5 Chapitre 5 : Modèle d'optimisation mathématique de flexibilité global

Dans le prolongement des discussions et analyses présentées au chapitre précédent, ce chapitre vise à développer un modèle d'optimisation mathématique qui intègre les principes de flexibilité identifiés et mesurés précédemment. Le modèle proposé est conçu pour évaluer et optimiser la flexibilité globale des systèmes de production, un élément crucial pour les entreprises désirant exceller dans un environnement industriel marqué par une volatilité accrue et des exigences de personnalisation élevées.

L'objectif de ce modèle mathématique est de fournir un outil de décision stratégique qui permet aux managers de planifier et de réagir de manière proactive aux changements dans les demandes du marché et aux perturbations potentielles. En intégrant une approche mathématique robuste, ce modèle vise à offrir une méthode précise et fiable pour quantifier la flexibilité et pour identifier les leviers d'action qui peuvent améliorer la performance globale du système de production.

Cette démarche s'appuie sur les dimensions et indicateurs de flexibilité développés au chapitre 4, en les utilisant comme fondements pour construire un modèle global qui prend en compte à la fois les aspects opérationnels, tactiques et stratégiques. La spécificité de notre modèle repose sur sa capacité à incorporer des paramètres complexes et interdépendants qui influencent la flexibilité, tels que la capacité de réponse aux variations de la demande, la reconfiguration des ressources de production, et l'adaptabilité aux nouvelles technologies et processus.

Le modèle d'optimisation mathématique proposé sera structuré autour des axes suivants :

- Caractérisation des paramètres de flexibilité : Définition précise des variables du modèle basées sur les indicateurs de flexibilité.
- Formulation du problème d'optimisation : Établissement des fonctions objectives et des contraintes qui reflètent les priorités et les limites opérationnelles du système de production.
- Méthodes de résolution : Choix des techniques algorithmiques adaptées pour résoudre le modèle d'optimisation, tenant compte de sa complexité et de la nécessité d'une solution efficace.

5.1 Introduction et contexte du problème

L'introduction du moteur XC13 dans les lignes de production existantes de l'usine FPT de Bourbon-Lancy représente un défi significatif, illustrant parfaitement le besoin impératif d'accroître la flexibilité dans les systèmes de production industriels. Le moteur XC13, avec ses spécificités techniques et ses exigences de production différentes, requiert des ajustements majeurs dans les procédés et l'organisation des lignes de montage. Cela soulève la question centrale de cette recherche : comment augmenter la flexibilité nécessaire pour intégrer efficacement de nouvelles variantes de produits dans un système de production déjà complexe et saturé ?

Pour répondre à ce défi, il est crucial de développer une méthode robuste pour évaluer et augmenter la flexibilité des lignes de production existantes. Cette méthode doit permettre à l'entreprise de s'adapter rapidement et efficacement aux exigences changeantes sans perturbations majeures, tout en maintenant un haut niveau de performance et de qualité. Elle implique l'examen et la redéfinition des capacités actuelles des machines, la reconfiguration potentielle des espaces de travail, et l'intégration de nouvelles technologies capables de supporter des changements rapides et des configurations variées.

Parallèlement, la définition d'une feuille de route pour l'investissement dans ces adaptations est essentielle. Cette feuille de route doit être conçue sur une période définie, avec des étapes clairement établies et des jalons pour l'évaluation du progrès. Elle devrait inclure des investissements ciblés dans des technologies avancées comme l'automatisation modulaire et les systèmes cyber-physiques, qui peuvent offrir la réactivité nécessaire pour les changements de production à la demande. De plus, un accent sur la formation continue des employés pour travailler avec de nouveaux équipements et technologies est crucial, assurant ainsi que l'ensemble du personnel est préparé et capable de gérer les transitions de production.

En outre, la feuille de route devrait également tenir compte des aspects financiers, en proposant des scénarios d'investissement avec une analyse coût-bénéfice claire, permettant aux décideurs de comprendre les compromis entre les coûts initiaux et les bénéfices à long terme en termes de flexibilité accrue et de capacité à répondre aux exigences du marché. Cette approche stratégique aidera l'entreprise à naviguer dans les complexités de l'Industrie 4.0, en utilisant l'innovation et l'adaptabilité comme leviers pour maintenir la compétitivité et la croissance.

5.2 Modélisation du problème

5.2.1 Modèle 1 : Performance en flexibilité

Dans cette section, nous proposons une définition formelle du problème de sélection du niveau de flexibilité dans la fabrication en tenant compte des effets synergiques des technologies alternatives (Manufacturing Flexibility Level Selection - Synergistic Effects, MFLS-SE). Ensuite, nous développons un modèle de programmation mathématique pour aborder le problème de décision de manière exhaustive. Étant donné un ensemble de types de flexibilité $i \in I$ et leurs technologies alternatives associées $j \in J_i$, l'objectif est de sélectionner une technologie alternative pour chaque type de flexibilité, tout en respectant un budget limité, afin de maximiser l'utilité totale des technologies sélectionnées. Cette utilité englobe à la fois la capacité de flexibilité et les aspects de performance opérationnelle. Un défi majeur consiste à prendre en compte les exigences techniques (c'est-à-dire les alternatives incompatibles et les relations de prérequis) et les dépendances (c'est-à-dire les effets synergiques) entre les technologies alternatives. Deux types de relations de prérequis (ET/OU) sont considérés ici. La Figure 31 illustre de telles relations où $P_D^{AND} = \{A, B, C\}$ signifie que, pour appliquer la technologie alternative D, il est nécessaire d'avoir déjà sélectionné toutes les alternatives A, B, and C. À l'inverse, $P_F^{OR} = \{D, E\}$ signifie que, pour appliquer la technologie alternative F, il est nécessaire d'avoir déjà sélectionné au moins l'une des alternatives D ou E. La formulation mathématique de ce problème est présentée ci-après.

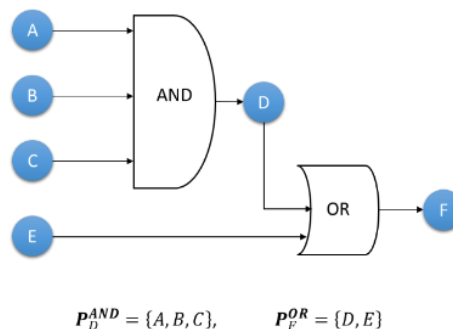


Figure 31. Illustration des relations de prérequis (ET/OU) entre les technologies alternatives

Ensembles et indices :

- I Ensemble de types de flexibilité, et indice $i \in I$
- \hat{I} Un sous-ensemble de types de flexibilité dépendants caractérisés par une sensibilité synergique ($\hat{I} \subseteq I$)
- D_i Ensemble de types de flexibilité ($D_i \subseteq I - \{i\}$) où l'état du type de flexibilité i dépend de leurs états ($i \in \hat{I}$)
- J_i Ensemble de niveaux technologiques alternatifs liés au type de flexibilité i , et indice $j \in J_i$
- P_{ij}^{OU} Ensemble d'alternatives où au moins un est indispensable pour appliquer la $j^{\text{ième}}$ alternative du type de flexibilité $i^{\text{ième}}$ (alternative ij), au moins une d'entre elles doit être sélectionnée ; $P_{ij}^{OU} = \{(i', j') | i' \in I, j' \in J_i\}$
- P_{ij}^{ET} Ensemble d'alternatives strictement indispensable pour appliquer l'alternative ij ; $P_{ij}^{ET} = \{(i', j') | i' \in I, j' \in J_i\}$
- g Ensemble de groupes incluant des alternatives incompatibles, et indice $g \in G$
- C_g L'ensemble des alternatives incompatibles liées au groupe g ; $C_g = \{(i, j) | i \in I, j \in J_i\}$

Paramètres :

- B Budget maximum
- N_{ij} Nombre d'unités qui doivent être utilisées en sélectionnant l'alternative ij
- $Capex_{ij}$ Dépenses en capital pour appliquer l'alternative ij (par unité)
- f_{ij} Valeur de la flexibilité obtenue en appliquant l'alternative ij
- f'_{ij} Valeur de performance opérationnelle obtenue en appliquant l'alternative ij
- $S_{i'j',ij}$ Coefficient synergique de l'alternative $i'j'$ sur la valeur de flexibilité de l'alternative ij , où $i \in \hat{I}$ et $i' \in D_i$
- w_i Poids d'importance du type de flexibilité type i
- α Taux d'importance de l'indice de performance opérationnelle par rapport à l'indice de flexibilité ($0 \leq \alpha \leq 1$)
- φ_g Nombre maximum d'alternatives acceptables dans le groupe g
- M Un grand nombre positif

Variables de décisions :

- x_{ij} Variable binaire. Si l'alternative ij est sélectionnée, $x_{ij} = 1$; sinon $x_{ij} = 0$
- z_i Coefficient d'efficacité synergique du type de flexibilité i

Formulations mathématiques :

$$\max \text{TUI} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} \left((1 - \alpha) f_{ij} z_i + \alpha f'_{ij} \right) w_i x_{ij} \quad (1)$$

Sous contraintes de :

$$\sum_{j \in J_i} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} N_{ij} Capex_{ij} \times x_{ij} \leq B \quad (3)$$

$$z_i = \prod \left(\sum_{j \in J_i} \sum_{j' \in J_{i'}} S_{i'j',ij} x_{i'j'} x_{ij} \right) \quad \forall i \in \hat{I} \quad (4)$$

$$z_i = 1 \quad \forall i \notin \hat{I} \quad (5)$$

$$x_{ij} \leq \sum_{(i',j') \in P_{ij}^{OR}} x_{i'j'} \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (6)$$

$$x_{ij} \leq x_{i'j'} \quad \forall i \in I, j \in J_i, (i',j') \in P_{ij}^{AND} \quad (7)$$

$$\sum_{(i,j) \in C_g} x_{ij} \leq \varphi_g \quad \forall g \in G \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (9)$$

$$z_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (10)$$

L'équation (1) est la fonction objective visant à maximiser l'Indice d'Utilité Totale (*Total Utility Index*, TUI), calculé en tenant compte de l'indice de capacité de flexibilité et de la performance opérationnelle des technologies alternatives sélectionnées. L'équation (2) garantit qu'une technologie alternative est sélectionnée pour chaque type de flexibilité. L'équation (3) assure que le budget total alloué aux alternatives sélectionnées respecte le budget maximal disponible. Les équations (4) et (5) calculent la valeur de flexibilité de chaque technologie alternative sélectionnée, en tenant compte des effets synergiques. Les équations (6) et (7) garantissent les relations de prérequis (AND/OR) entre les technologies alternatives sélectionnées. L'équation (8) assure la conformité aux alternatives incompatibles. Enfin, les équations (9) à (10) présentent les variables de décision. Les équations (1) à (10) fournissent une formulation de programmation non linéaire mixte (*Mixed-Integer Non-Linear Programming*, MINLP) pour le problème MFLS-SE. Dans ce qui suit, nous allons linéariser les équations (1) et (4) utilisation des lemmes (1) et (2), respectivement.

L'équation (4) fournit une formulation non linéaire pour calculer le coefficient synergique efficace du type de flexibilité i . Le Lemme (1) présente une formulation linéaire pour calculer z_i lorsque $|D_i| = 1$. Les formulations linéaires correspondantes pour les états $|D_i| = 2$ and $|D_i| = 3$ sont également fournies en Annexe C.

Les coefficients $S_{i'j',ij}$ indiquent le degré de synergie entre les paires d'alternatives, représentant comment une technologie peut renforcer ou affaiblir l'efficacité d'une autre lorsqu'elles sont utilisées conjointement.

Lemme 1. Lorsque $|D_i| = 1$, l'équation (4) peut être remplacée par les Équations linéaires (11) à (13), où la variable auxiliaire $x'_{i'j',ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } x_{ij} = 1 \text{ ET } x_{i'j'} = 1 \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases}$

$$z_i = \sum_{j \in J_i} \sum_{j' \in J_{i'}} S_{i'j',ij} x'_{i'j',ij} \quad \forall i \in \hat{I} \quad (11)$$

$$x'_{i'j',ij} \geq x_{ij} + x_{i'j'} - 1 \quad \forall j \in J_i, j' \in J_{i'} \quad (12)$$

$$2 \times x'_{i'j',ij} \leq x_{ij} + x_{i'j'} \quad \forall j \in J_i, j' \in J_{i'} \quad (13)$$

Preuve. L'équation (4) peut être réécrite comme $z_i = \sum_{j \in J_i} \sum_{j' \in J_{i'}} S_{i'j',ij} x_{i'j'} x_{ij}$ lorsque $|D_i| = 1$, i.e., $D_i = \{i'\}$. L'équation (11) présente une formulation linéaire pour calculer z_i où les équations (12)

et (13) garantissent les relations entre $x'_{i'j',ij}$, x_{ij} and $x_{i'j'}$. L'équation (12) assure que si à la fois x_{ij} et $x_{i'j'}$ valent 1, alors $x'_{i'j',ij}$ vaudra également 1, tandis que l'équation (13) assure que si x_{ij} et $x_{i'j'}$ valent 0, alors $x'_{i'j',ij}$ vaudra également 0.

Lemme 2. La fonction objectif (1) peut être linéarisée en utilisant l'Équation (14), en remplaçant la variable auxiliaire z'_{ij} par $z_i \times x_{ij}$, où $z'_{ij} = \begin{cases} z_i & \text{if } x_{ij} = 1 \\ 0 & \text{if } x_{ij} = 0 \end{cases}$ est définie comme suit :

$$TUI = (1 - \alpha) \times \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} w_i f_{ij} z'_{ij} + \alpha \times \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} w_i f'_{ij} x_{ij} \quad (14)$$

De plus, les contraintes (15) et (16) doivent être ajoutées pour prendre en compte les relations entre les variables.

$$z'_{ij} \leq M x_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (15)$$

$$z_i - M(1 - x_{ij}) \leq z'_{ij} \leq z_i + M(1 - x_{ij}) \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (16)$$

Preuve. Les équations (15) et (16) garantissent les relations entre z'_{ij} , z_i et x_{ij} . L'équation (15) assure que $z'_{ij} = 0$ lorsque $x_{ij} = 0$, tout en garantissant que $z'_{ij} = z_i$ si $x_{ij} = 1$. Le Tableau 12 illustre ces relations en fonction de l'activation / désactivation des équations (15) et (16).

Tableau 12. Relations entre les variables z'_{ij} , z_i et x_{ij}

	$x_{ij} = 0$	$x_{ij} = 1$
$z'_{ij} \leq M x_{ij}$	Actif	Inactif
$z_i - M(1 - x_{ij}) \leq z'_{ij} \leq z_i + M(1 - x_{ij})$	Inactif	Actif
z'_{ij}	0	z_i

Pour rendre la valeur de la fonction objective proposée plus perceptible, une version sans dimension de l'Indice d'Utilité Totale (*Total Utility Index*, TUI) peut être utilisée. La fonction objective basée sur un TUI normalisé est donnée par l'Équation (17).

$$\max \overline{TUI} = 100 \times \frac{TUI - TUI^{LB}}{TUI^{UB} - TUI^{LB}} \quad (17)$$

Où, TUI est calculé par l'équation (14). De plus, TUI^{LB} et TUI^{UB} sont également obtenus à l'aide des modèles MILP (18) et (19), qui ne tiennent pas compte de la contrainte de limitation du budget (3).

$$TUI^{LB} = \min (1 - \alpha) \times \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} w_i f_{ij} z'_{ij} + \alpha \times \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} w_i f'_{ij} x_{ij} \quad (18)$$

Sous contrainte de : (2), (5-13), (15), et (16).

$$TUI^{UB} = \max (1 - \alpha) \times \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} w_i f_{ij} z'_{ij} + \alpha \times \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} w_i f'_{ij} x_{ij} \quad (19)$$

Sous contrainte de : (2), (5-13), (15), et (16).

5.2.2 Modèle 2 : Planification de l'investissement

Dans le Modèle 1, il est supposé que l'intégralité du budget soit déjà disponible. Cependant, dans le monde réel, il existe souvent des défis liés à l'allocation et disponibilité du budget qui doivent également être pris en compte. Par exemple, le budget peut être réparti sur plusieurs périodes/années. De plus, lors de la création de nouvelles capacités de production, il est nécessaire de considérer les limitations liées aux demandes du marché et aux approvisionnements en pièces. Le plan de montée en puissance (Ramp-

up) inclut un horizon de planification de plusieurs périodes au cours desquelles un budget maximum et une capacité de production cible sont déterminés.

Dans le Modèle 2, nous visons à résoudre le problème MFLS-SE en tenant compte des considérations du plan de montée en puissance. De cette manière, un modèle mathématique bi-objectif est développé (Modèle 2). Le but premier objectif du Modèle 2 est de maximiser TUI, qui est identique à la fonction objective du Modèle 1. Le second objectif du Modèle 2 minimise les écarts par rapport au plan de montée en puissance nominal. Ce qui suit introduit les paramètres et variables supplémentaires nécessaires, ainsi que le modèle de programmation mathématique proposé.

Ensemble et index :

- \bar{I} Un sous-ensemble de types de flexibilité qui peuvent affecter la capacité de production ($\bar{I} \subseteq I$)
 T Ensemble de périodes de l'horizon de planification et index $t \in T$

Paramètres :

- B_t Budget maximum à l'exercice t
 TC_t Capacité de production cible attendue à la fin de la période t
 N_{ij} Nombre d'unités à utiliser en sélectionnant une alternative ij
 $Capex_{ij}$ Dépenses en capital pour appliquer l'alternative ij (par unité)
 AC_{ij} Capacité de production obtenu en appliquant des alternatives de rechange ij (par unité par période) où $i \in \bar{I}$
 ω_1^t Poids de capacité supplémentaire à la période t , la pénalité des violations lorsque la capacité réelle est supérieure à la capacité cible
 ω_2^t Poids de capacité insuffisant à la période t , la pénalité des violations lorsque la capacité réelle est inférieure à la capacité cible

Variables de décision :

- y_{ijt} Le nombre d'éléments de l'alternative ij qui commencent à être utilisés à la période t

Dans ce qui suit, le modèle de programmation mathématique bi-objectif pour le problème de planification de la montée en puissance de la capacité de production en tenant compte de la flexibilité de fabrication est présenté :

$$\max \overline{TUI} = 100 \times \frac{(1 - \alpha) \times \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} w_i f_{ij} z'_{ij} + \alpha \times \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} w_i f'_{ij} x_{ij} - TUI^{LB}}{TUI^{UB} - TUI^{LB}} \quad (20)$$

$$\min TVP = \sum_{t \in T} \left| TC_t - \min_{i \in \bar{I}} \left\{ \sum_{t'=1}^t \sum_{j \in J_i} AC_{ij} y_{ijt'} \right\} \right| \quad (21)$$

Sous contrainte de (2), (5-13), (15), (16), et:

$$\sum_{t \in T} y_{ijt} = N_{ij} x_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (22)$$

$$\sum_{t=1}^t \left(B_t - \sum_{i \in I} \sum_{j \in J_i} Capex_{ij} y_{ijt} \right) \geq 0 \quad \forall t' \in T \quad (23)$$

$$y_{ijt} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J_i, t \in T \quad (24)$$

$$z'_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J_i \quad (25)$$

L'équation (20) représente la version linéaire de la TUI sans dimension comme première fonction objective du modèle 2. L'équation (21) introduit la deuxième fonction objective, fournissant une fonction non linéaire qui calcule la pénalité totale pour infractions (*Total Violation Penalty*, TVP) à partir du plan de montée en puissance. Un exemple est fourni plus loin dans cette section pour mieux illustrer le concept connexe de l'équation (21). L'équation (22) garantit qu'en sélectionnant chaque technologie de rechange, le nombre d'unités connexes à installer au cours de chaque période est déterminé (le nombre total d'unités requises doit être respecté). L'équation (23) garantit les limites des budgets qui sont progressivement disponibles pendant les périodes d'horizon de planification de la montée en puissance.

L'équation (21) présente une formulation non linéaire pour calculer la TVP. Le lemme (3) et le lemme (4) fournissent des formulations linéaires pour calculer la TVP.

Lemme 3. La fonction objectif TVP peut être linéarisée en utilisant deux variables auxiliaires S_t^+ et S_t^- qui se réfèrent respectivement à la capacité de production supplémentaire ou insuffisante fournie à la période t . Par conséquent, en considérant différentes valeurs de pénalité pour des capacités de production supplémentaires ou insuffisantes, la fonction objectif (21) est remplacée par l'équation linéaire (26). De plus, les contraintes (27) et (28) soutiennent le concept logique des définitions fournies pour les variables auxiliaires S_t^+ et S_t^- .

$$\min \text{TVP} = \sum_{t \in T} \omega_1^t S_t^+ + \omega_2^t S_t^- \quad (26)$$

Concernant :

$$\min_{i \in \bar{I}} \left\{ \sum_{t'=1}^t \sum_{j \in J_i} AC_{ij} y_{ijt'} \right\} + S_t^- = TC_t + S_t^+ \quad \forall t \in T \quad (27)$$

$$S_t^-, S_t^+ \geq 0 \quad \forall t \in T \quad (28)$$

Où S_t^- et S_t^+ sont respectivement des variables auxiliaires de la marge (représente la capacité fournie insuffisante) et excédentaire (représente la capacité supplémentaire fournie) à la période t .

Cependant, l'équation (27) est une fonction non linéaire qui doit être linéarisée à l'aide du lemme (4).

Lemme 4. Linéarisation de l'équation (27) :

L'équation (27) est équivalente avec deux contraintes (29) et (30).

$$\min_{i \in \bar{I}} \left\{ \sum_{t'=1}^t \sum_{j \in J_i} AC_{ij} y_{ijt'} \right\} \geq TC_t + S_t^+ - S_t^- \quad \forall t \in T \quad (29)$$

$$\min_{i \in \bar{I}} \left\{ \sum_{t'=1}^t \sum_{j \in J_i} AC_{ij} y_{ijt'} \right\} \leq TC_t + S_t^+ - S_t^- \quad \forall t \in T \quad (30)$$

La contrainte (31) décrit la version linéaire de la contrainte (29). Cela signifie que lorsque nous avons plusieurs termes, le minimum d'entre eux doit être supérieur à une valeur donnée (ici le RHS (*Right hand Side*)), et tous ces termes doivent être supérieurs à cette valeur donnée:

$$\sum_{t'=1}^t \sum_{j \in J_i} AC_{ij} y_{ijt'} \geq TC_t + S_t^+ - S_t^- \quad \forall i \in \bar{I}, t \in T \quad (31)$$

La contrainte (30) signifie qu'il existe au moins un niveau de capacité à LHS (*Left hand Side*) (C.-à-d., $\sum_{t'=1}^t \sum_{j \in J_i} AC_{ij} y_{ijt'}$) qui est égal ou inférieur au seuil de le RHS, (c.-à-d., $TC_t + S_t^+ - S_t^-$). Par conséquent, la contrainte (30) peut être remplacée par deux contraintes linéaires (32) et (33) comme suit :

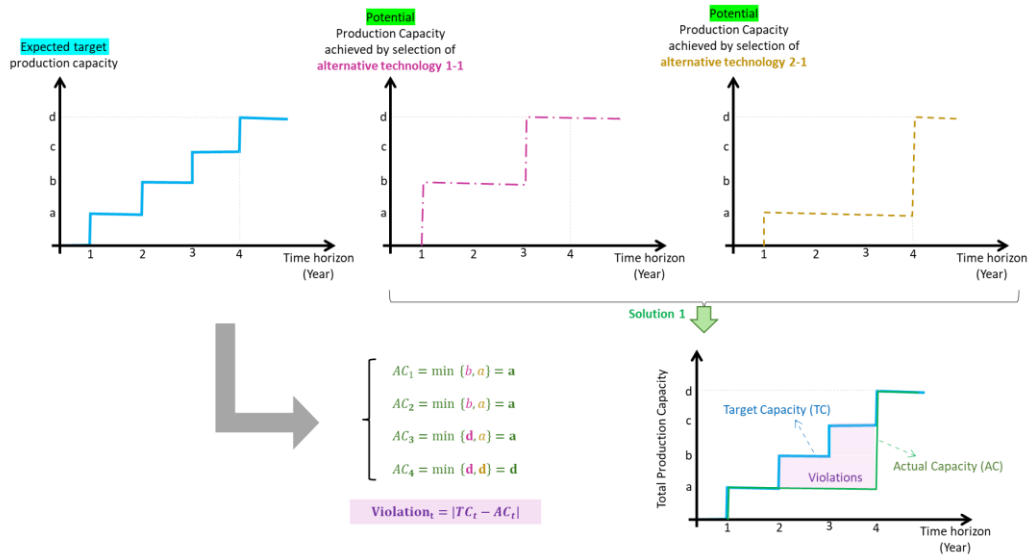
$$\sum_{t'=1}^t \sum_{j \in J_i} AC_{ij} y_{ijt'} - M \times \theta_i \leq TC_t + S_t^+ - S_t^- \quad \forall i \in \bar{I}, t \in T \quad (32)$$

$$\sum_{i \in \bar{I}} \theta_i \leq |\bar{I}| - 1 \quad (33)$$

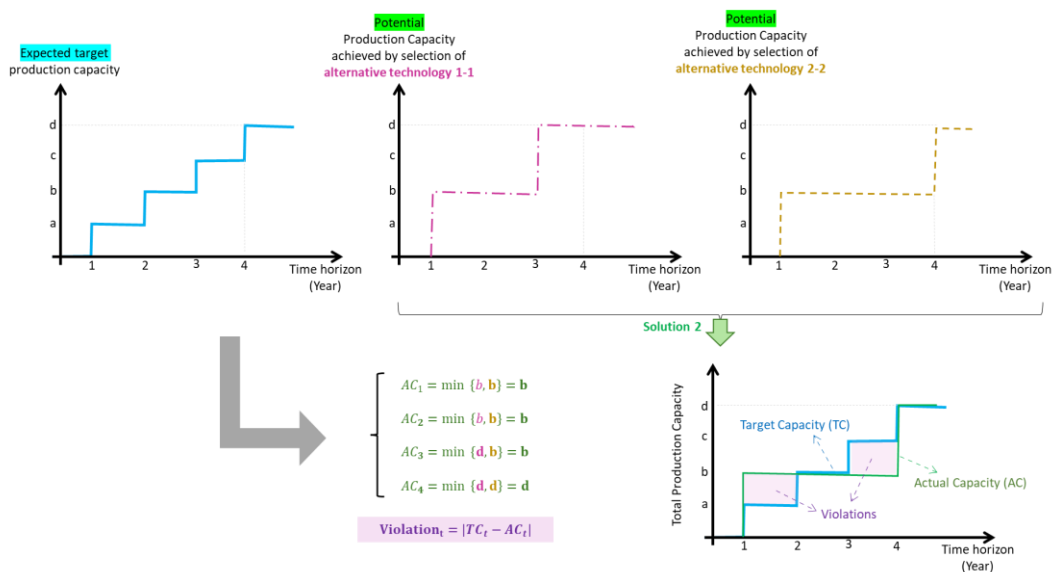
Où $|\bar{I}|$ représente le nombre total de types de flexibilité, et θ_i est une variable auxiliaire binaire. Si $\theta_i = 1$, cela signifie que l'équation (32) est inactive parce que le LHS tend vers $-\infty$ en utilisant un grand nombre comme M. Si $\theta_i = 0$, cela signifie que le niveau de capacité associé est égal ou inférieur au seuil RHS. Par conséquent, la contrainte (32) impose d'avoir au moins un niveau de capacité égal ou inférieur au seuil RHS. L'équation (33) garantit d'avoir au moins une valeur 0 pour θ_i , ce qui signifie que nous avons au moins une contrainte active de l'équation 32.

5.2.3 Explication de l'objectif des modèles

La Figure 32 fournit un exemple simple pour illustrer le concept d'infractions du plan de montée en puissance. Dans cet exemple, il existe deux types de flexibilité, 1 et 2, qui peuvent également avoir un impact sur la capacité de production ($\bar{I} = \{1, 2\}$). Pour le deuxième type de flexibilité, nous avons envisagé deux technologies alternatives (2-1 et 2-2). L'horizon temporel s'étend sur quatre ans, au cours desquels la capacité de production totale devrait augmenter, compte tenu des niveaux a, b, c et d.



a) Violations de la solution 1 (sélection de alternatives technologiques 1-1 et 2-1)



b) Violations de la solution 2 (choix des alternatives technologiques 1-1 et 2-2)

Figure 32. Illustration de l'incidence du choix d'une alternative technologique sur les violations du plan de montée en puissance.

5.3 Etude de cas, résultats

L'introduction d'un nouveau moteur, en l'occurrence le moteur XC13, dans les lignes de production existantes de l'usine FPT de Bourbon-Lancy (FPT-BLY) illustre de manière significative les défis et les besoins de changement technologique auxquels l'usine doit faire face. Cette intégration représente une nécessité cruciale pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, la diversité et la complexité des moteurs produits dans l'usine, incluant les différentes versions de la gamme Cursor, imposent une flexibilité accrue des systèmes de production. L'ajout du moteur XC13, avec ses spécificités et ses exigences techniques distinctes, nécessite une adaptation rapide et précise des lignes de production. La capacité à reconfigurer les équipements et les processus existants pour accueillir ce nouveau produit sans perturber la production des autres variantes est essentielle pour maintenir la continuité et l'efficacité opérationnelle.

Ensuite, l'intégration du moteur XC13 sur les lignes de production existantes répond à une demande croissante de personnalisation et de rapidité sur le marché. Les clients exigent des produits de haute qualité avec des délais de livraison de plus en plus courts. Pour satisfaire ces exigences, FPT-BLY doit adopter des technologies avancées qui permettent une transition fluide et efficace entre la production des différents modèles de moteurs. L'utilisation de systèmes cyber-physiques, de l'Internet des objets (IoT) et de l'intelligence artificielle (IA) est indispensable pour automatiser et optimiser les processus de production, réduisant ainsi les temps de changement et augmentant la productivité.

Par ailleurs, l'obsolescence des équipements actuels de l'usine présente un obstacle majeur à cette intégration. Les machines et les technologies vieillissantes peuvent limiter la capacité de l'usine à effectuer les ajustements nécessaires pour produire le moteur XC13 et les autres future variante du Cursor X selon les standards de qualité requis. La modernisation des infrastructures de production, en intégrant des technologies plus flexibles et reconfigurables, est donc impérative pour garantir une adaptation réussie et maintenir la compétitivité de l'usine.

Enfin, cette intégration s'inscrit dans la stratégie globale de l'usine visant à se positionner comme un leader en matière d'innovation et de performance dans l'industrie des moteurs industriels. En démontrant sa capacité à intégrer efficacement de nouveaux produits sur des lignes de production existantes, FPT-BLY renforce sa réputation et sa capacité à répondre aux évolutions futures du marché. Cela est rendu possible grâce à un travail approfondi sur les différentes dimensions de la flexibilité, l'identification du niveau approprié pour chaque type de flexibilité, ainsi que la mise en place d'un plan d'investissement adapté.

Ce chapitre explore en détail le processus d'intégration du moteur XC13 dans les lignes de production de FPT-BLY. Il présente les données et les paramètres spécifiques, analyse les défis rencontrés, et discute les résultats obtenus. L'objectif est de montrer comment les approches méthodologiques développées dans cette thèse peuvent être appliquées pour optimiser la flexibilité et la reconfigurabilité des systèmes de production face à l'introduction de nouveaux produits.

5.3.1 Présentation des données et paramètres

Dans cette section, nous détaillons les données et les paramètres utilisés pour évaluer l'intégration du nouveau moteur XC13 dans les lignes de production existantes de l'usine FPT-BLY.

Il est important de préciser que, pour des raisons de confidentialité, nous ne pouvons pas divulguer les valeurs exactes. Par conséquent, les données suivantes ont été anonymisées de manière proportionnelle.

La flexibilité des systèmes de production est cruciale pour cette intégration, et plusieurs types de flexibilité et leurs alternatives technologiques ont été identifiés en se basant sur le contexte de l'entreprise et leurs défis. Dans un souci de complexité, il a été décidé de sélectionner les cinq types de flexibilité les plus impactants dans le périmètre défini, comme illustré dans le Tableau 13.

Tableau 13. Types de flexibilité et leur niveau d'alternatives technologiques dans l'étude de cas

Type de flexibilité	Alternatives technologiques (ATL)
1. Machine	<ol style="list-style-type: none"> 1. Machine traditionnel 2. Machine avec plusieurs axes (commande numérique) 3. Capacité de la machine à intégrer un module supplémentaire 4. Technologie additive et soustractive
2. Manutention	<ol style="list-style-type: none"> 1. Spécifique et manuel Préhenseur palan dédié 2. Filoguidé 3. AGV 4. Automatique et polyvalent AMR avec bras robotique
3. Stockage	<ol style="list-style-type: none"> 1. Dédié et manuel 2. 50% des produits en stockage dédié et le reste en automatique 3. Stockage automatique dédié 4. Stockage polyvalent et automatique (transstockeur, Shuttle, ...)
4. Humaine	<ol style="list-style-type: none"> 1. Intérimaire (1 opération) 2. Employé 3. Régleur 4. Chef d'équipe (toutes les opérations rapidement)
5. Informatique	<ol style="list-style-type: none"> 1. Excel pas de partage pas connecté 2. Co-working (usine) 3. Intranet group 4. Application d'aide à la décision accessible connecté (PLM, data lake)

Machine

Les machines jouent un rôle crucial dans la flexibilité de la production. Les alternatives technologiques varient de machines traditionnelles à des machines avec plusieurs axes, capables d'intégrer des modules supplémentaires et utilisant des technologies additives et soustractives. Ces options permettent une adaptation rapide et efficace aux besoins changeants de la production, en particulier lors de l'introduction de nouveaux produits comme le moteur XC13.

Manutention

La flexibilité dans la manutention est essentielle pour optimiser les flux de matériaux. Les alternatives vont de systèmes spécifiques et manuels à des solutions automatiques et polyvalentes, telles que les véhicules guidés automatisés (AGV) et les robots mobiles autonomes (AMR) équipés de bras robotiques. Ces technologies permettent de réduire les temps de manipulation et d'améliorer l'efficacité globale du processus de production.

Stockage

Le stockage flexible est vital pour gérer les stocks de manière efficace. Les alternatives incluent des systèmes manuels dédiés, des combinaisons de stockage manuel et automatique, ainsi que des solutions

entièrement automatiques et polyvalentes, comme les transstockeurs et les shuttles. Ces systèmes garantissent une gestion optimale des stocks, réduisant les temps de recherche et de récupération des pièces nécessaires pour la production.

Humaine

La flexibilité des ressources humaines est également un facteur clé. Les alternatives varient des intérimaires exécutant une seule opération aux chefs d'équipe capables de réaliser rapidement toutes les opérations. Cette flexibilité permet de s'adapter aux variations de la charge de travail et aux besoins spécifiques des différents produits, en assurant une production continue et efficace.

Informatique

Les systèmes informatiques flexibles sont indispensables pour soutenir la production. Les alternatives vont de simples feuilles Excel non connectées à des applications d'aide à la décision accessibles et connectées, telles que les systèmes de gestion du cycle de vie des produits (PLM) et les data lakes. Ces solutions permettent de partager les informations en temps réel, de faciliter la prise de décision et d'améliorer la coordination entre les différentes équipes de production.

Le Tableau 14 illustre les deux dimensions clés pour cette évaluation : la flexibilité et la performance opérationnelle. Chaque dimension est représentée par des critères spécifiques, et les poids de ces critères ont été déterminés grâce à l'expertise du personnel de FPT en utilisant la méthode Best/Worst, présenté à la section 4.3.2.

Tableau 14. Cadre de mesure du problème de sélection de la technologie

Dimension	Critère	Poids
Flexibilité, capacité et agilité (F)	Flexibilité de volume	0.0909
	Flexibilité de mix	0.6545
	Temps de réponse	0.2546
Performance opérationnelle (OP)	Dépenses opérationnelles (Opex)	0.2273
	Qualité	0.1515
	Fiabilité	0.1136
	Efficacité	0.3863
	Risque de dépendance externe	0.0758
	Adaptabilité technologique	0.0455

Flexibilité, capacité et agilité

Cette dimension évalue la capacité de l'usine à s'adapter aux variations de la production et à intégrer de nouveaux produits comme le moteur XC13. Elle comprend trois critères :

- Flexibilité de volume (0.0909) : La capacité à ajuster les volumes de production en fonction de la demande.
- Flexibilité de mix (0.6545) : La capacité à produire une variété de produits sur les mêmes lignes de production.
- Temps de réponse (0.2546) : La rapidité avec laquelle l'usine peut réagir aux changements de la demande ou aux nouvelles exigences de production.

Performance opérationnelle

Cette dimension se concentre sur l'efficacité globale des opérations de production et comprend six critères :

- Dépenses opérationnelles (Opex) (0.2273) : Les coûts liés à l'exploitation quotidienne de l'usine.
- Qualité (0.1515) : Le niveau de conformité des produits aux spécifications et aux normes de qualité.
- Fiabilité (0.1136) : La constance des performances des systèmes de production et la réduction des pannes.
- Efficacité (0.3863) : L'optimisation des ressources pour maximiser la production.
- Risque de dépendance externe (0.0758) : La vulnérabilité de l'usine face aux perturbations de la chaîne d'approvisionnement externe.
- Adaptabilité technologique (0.0455) : La capacité de l'usine à intégrer et à utiliser de nouvelles technologies.

Méthode de pondération :

Comme présenté, les poids attribués à chaque critère ont été définis en collaboration avec les experts de FPT, en utilisant la méthode Best/Worst. Cette méthode, bien maîtrisée par le personnel de FPT, permet d'identifier les critères les plus et les moins importants en demandant aux experts de comparer les critères les uns par rapport aux autres. Ainsi, les poids reflètent l'importance relative de chaque critère dans le contexte spécifique de l'intégration du moteur XC13.

Il est important de préciser que les méthodes de la somme pondérée et Best/Worst sont bien connues chez FPT. En effet, un outil d'aide à la décision basé sur ces méthodes est largement utilisé pour les prises de décisions stratégiques et tactiques (Einabadi, 2023). Par ailleurs, l'objectif n'était pas de développer et d'introduire de nouvelles méthodes d'analyse multicritère, d'autant plus qu'une étude menée par un autre chercheur sur l'impact de l'utilisation de méthodes plus complexes pour les décisions stratégiques et tactiques dans cette entreprise n'a pas révélé d'importance majeure quant au choix de la méthode.

Le Tableau 15 synthétise les résultats obtenus en matière de flexibilité et de performance opérationnelle pour chaque niveau de technologie alternative.

Tableau 15. Flexibilité et valeurs opérationnelles pondérées pour chaque niveau de technologie alternative

Type de flexibilité (i)	Poids (w_i)	ATL (j)	Flexibilité, capacité et agilité Valeur (f_{ij})	Valeur de la performance opérationnelle (f'_{ij})
1. Machine	0.3	1	0.186	0.402
		2	0.545	0.724
		3	0.773	0.616
		4	0.977	0.716
2. Manutention	0.25	1	0.255	0.369
		2	0.186	0.639
		3	0.250	0.661
		4	0.441	0.806
3. Stockage	0.25	1	0.000	0.369
		2	0.273	0.504
		3	0.545	0.731
		4	1.000	0.794
4. Humaine	0.1	1	0.000	0.227
		2	0.500	0.536
		3	0.750	0.633
		4	1.000	0.807
5. Informatique	0.1	1	0.000	0.426
		2	0.414	0.619
		3	0.459	0.676
		4	1.000	0.716

Notation et Évaluation :

Nous avons évalué chaque type de flexibilité et les technologies alternatives associées en utilisant une échelle de notation de 1 à 5. Une note de 1 représente une faible flexibilité ou performance, tandis qu'une note de 5 indique une flexibilité ou une performance élevée. Pour simplifier l'étape d'évaluation, nous avons proposé un système d'évaluation sur échelle sans unité de mesure. Ces notes reflètent la capacité de chaque technologie à répondre aux exigences de production flexibles et aux performances opérationnelles.

Normalisation des Données :

Pour assurer une comparaison équitable et uniforme des différentes alternatives technologiques, nous avons déterminé si les critères étaient bénéfiques (où des valeurs plus élevées sont meilleures) ou coûteux (où des valeurs plus faibles sont meilleures). Nous avons ensuite appliqué la méthode de normalisation flou (*fuzzy*), présenté en section 4.3.1 pour normaliser les données. Cette méthode transforme les valeurs brutes en une échelle normalisée de 0 à 1, facilitant ainsi la comparaison entre les différents critères et alternatives.

Méthode de la Somme Pondérée :

Après la normalisation des données, nous avons appliqué la méthode de la somme pondérée pour agréger les scores normalisés en un seul indicateur global pour chaque alternative technologique. Comme pour les critères précédents, les poids attribués à chaque critère ont été déterminés en collaboration avec les experts du site de FPT-BLY, en utilisant la méthode Best/Worst. Cette méthode, bien maîtrisée par le personnel de FPT-BLY, permet de comparer les critères de manière systématique et de définir leur importance relative.

Le Tableau 16 présente les dépenses en capital par unité (Capex) et le nombre d'unités requises pour chaque alternative technologique (ATL) dans les différents types de flexibilité.

Tableau 16. Dépenses en capital et nombre d'unités de chaque alternative

Type de flexibilité	Dépenses en capital par unité ($Capex_{ij}$)*				Nombre d'unités requises (N_{ij})			
	ATL 1	ATL 2	ATL 3	ATL 4	ATL 1	ATL 2	ATL 3	ATL 4
1. Machine	70	300	1500	1700	25	13	3	5
2. Manutention	2	10	30	60	13	5	3	2
3. Stockage	2	20	250	600	1	1	1	1
4. Humain	2	1	1	1	5	3	3	3
5. Informatique	1	30	300	3000	1	1	1	1

* Les valeurs sont présentées en k€

Dépenses en capital par unité (Capex)

Les dépenses en capital par unité ($Capex_{ij}$) représentent le coût d'investissement pour chaque unité de technologie alternative. Ces valeurs sont présentées en milliers d'euros (k€) et ont été définies à titre indicatif, basées sur des benchmarks et des retours d'expérience du secteur. Par exemple, pour les machines, les alternatives technologiques vont de 70 k€ pour une machine traditionnelle (ATL 1) à 1700 k€ pour une technologie additive et soustractive (ATL 4).

Nombre d'unités requises (N)

Le nombre d'unités nécessaires (N_{ij}) est déterminé en fonction de la capacité productive de chaque alternative technologique. Ce chiffre a été multiplié pour atteindre la capacité totale de production visée par FPT-BLY. Par exemple, pour les machines, il est requis 25 unités de la technologie ATL 1 pour atteindre la production cible, tandis que seulement 5 unités de la technologie ATL 4 sont nécessaires, grâce à leur capacité productive supérieure.

Le Tableau 17 présente les coefficients synergiques entre les différentes alternatives technologiques pour chaque type de flexibilité. Ces coefficients indiquent le degré de synergie entre les paires d'alternatives, représentant comment une technologie peut renforcer ou affaiblir l'efficacité d'une autre lorsqu'elles sont utilisées conjointement. Un coefficient de synergie supérieur à 1 indique une interaction bénéfique, où les alternatives se renforcent mutuellement, tandis qu'un coefficient inférieur à 1 indique une interaction moins bénéfique ou conflictuelle.

Tableau 17. Coefficient synergique entre les alternatives ($S_{i',j',ij}$)

i'	j	1				2				3				4				5			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	1					0,8	0,8	0,8	0,8	1	1	1	1	1	1	1	1	0,8	0,8	0,8	0,8
	2					1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	3					1	1	1,2	1,2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	4					1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	0,8	1	1	1					1	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	2	0,8	1	1	1					1	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	3	0,8	1	1,2	1					1	1	1,2	1,2	1	1	1,2	1,2	1	1	1	1
	4	0,8	1	1,2	1					1	1	1,2	1,2	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1					1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1	1	1					1	1	1	1	1	1	1	1,2
	3	1	1	1	1	1	1	1,2	1,2					1	1	1	1	1	1	1	1,2
	4	1	1	1	1	1	1	1,2	1,2					1	1	1	1	1	1	1	1,2
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1					1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1					1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1,2	1,2	1,2	1	1	1	1	1					1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1,2	1,2	1,2	1	1	1	1	1					1	1	1	1
5	1	0,8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
	2	0,8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
	3	0,8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
	4	0,8	1	1	1	1	1	1	1	1	1,2	1,2	1,2	1	1	1	1				

Dans notre cas, tous les types de flexibilité caractérisés par une sensibilité synergique, donc $\hat{I} = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. De plus, les types de flexibilité dépendants de chaque élément sont introduits comme suit : $D_1 = \{2, 5\}$, $D_2 = \{1, 3, 4\}$, $D_3 = \{2, 5\}$, $D_4 = \{2\}$, et $D_5 = \{1, 3\}$. Ainsi, $D_1 = \{2, 5\}$ signifie que le type de flexibilité 1 a une interdépendance avec le type de flexibilité 2 et 5. Dans ce cas de figure, la première alternative de type de flexibilité 1 a une synergie négative avec toutes les alternatives de la flexibilité 2 (0,8).

Le Tableau 18 liste des alternatives pré-requises P_{ij}^{OR} pour différentes combinaisons de types de flexibilité. Chaque entrée P_{ij}^{OR} contient des paires (i', j') représentant les alternatives nécessaires pour le type de flexibilité i et son alternative j .

Tableau 18. Liste des alternatives pré-requises $P_{ij}^{OR} = \{(i', j') | i' \in I, j' \in J_i\}$

#	P_{ij}^{OR}	#	P_{ij}^{OR}
1	$P_{2,4}^{OR} = \{(1,2), (1,3), (1,4)\}$	8	$P_{5,2}^{OR} = \{(1,2), (1,3), (1,4)\}$
2	$P_{3,2}^{OR} = \{(5,2), (5,3), (5,4)\}$	9	$P_{5,2}^{OR} = \{(3,2), (3,3), (3,4)\}$
3	$P_{3,2}^{OR} = \{(1,2), (1,3), (1,4)\}$	10	$P_{5,3}^{OR} = \{(1,2), (1,3), (1,4)\}$
4	$P_{3,3}^{OR} = \{(5,2), (5,3), (5,4)\}$	11	$P_{5,3}^{OR} = \{(3,2), (3,3), (3,4)\}$
5	$P_{3,3}^{OR} = \{(1,2), (1,3), (1,4)\}$	12	$P_{5,4}^{OR} = \{(1,2), (1,3), (1,4)\}$
6	$P_{3,4}^{OR} = \{(5,2), (5,3), (5,4)\}$	13	$P_{5,4}^{OR} = \{(3,2), (3,3), (3,4)\}$
7	$P_{3,4}^{OR} = \{(1,2), (1,3), (1,4)\}$		

La première ligne du Tableau 18 présente les alternatives pré-requises $P_{2,4}^{OR}$ pour le type de flexibilité 2 et son alternative 4. Cette entrée spécifique contient les paires $\{(1,2), (1,3), (1,4)\}$. Cela signifie que pour mettre en œuvre le type de flexibilité 2 avec l'alternative 4, il est nécessaire de satisfaire les prérequis suivants : les types de flexibilité 1 avec les alternatives 2, 3, ou 4. En d'autres termes, pour

que la flexibilité 2, alternative 4, soit viable, il faut d'abord que la flexibilité 1 soit effective avec d'une des trois alternatives correspondantes. Cette exigence montre l'interdépendance des différents types de flexibilité, où la mise en œuvre de l'une dépend de la réalisation préalable de certaines conditions associées à une autre. Cela permet de mieux comprendre les scénarios réels dans lesquels ces interdépendances doivent être gérées pour une planification efficace et stratégique des capacités de flexibilité.

Le Tableau 19 montrent les combinaisons spécifiques de types de flexibilité et leurs alternatives qui ne peuvent pas coexister. Chaque ligne indique une incompatibilité particulière entre deux alternatives de différents types de flexibilité.

Tableau 19. Liste des alternatives incompatibles ($C_g = \{(i,j) \mid i \in I, j \in J_i\}$) présenté en 27 groupes

g	C_g	φ_g	g	C_g	φ_g	g	C_g	φ_g
1	$\{(1,1), (4,1)\}$	1	10	$\{(3,1), (2,2)\}$	1	19	$\{(4,1), (2,4)\}$	1
2	$\{(1,1), (5,2)\}$	1	11	$\{(3,1), (2,3)\}$	1	20	$\{(4,1), (3,3)\}$	1
3	$\{(1,1), (5,3)\}$	1	12	$\{(3,1), (2,4)\}$	1	21	$\{(4,1), (3,4)\}$	1
4	$\{(1,1), (5,4)\}$	1	13	$\{(3,1), (5,1)\}$	1	22	$\{(4,1), (5,2)\}$	1
5	$\{(2,1), (3,3)\}$	1	14	$\{(3,1), (5,2)\}$	1	23	$\{(4,1), (5,3)\}$	1
6	$\{(2,1), (3,4)\}$	1	15	$\{(3,1), (5,4)\}$	1	24	$\{(4,1), (5,4)\}$	1
7	$\{(2,1), (5,2)\}$	1	16	$\{(4,1), (1,3)\}$	1	25	$\{(5,4), (3,2)\}$	1
8	$\{(2,1), (5,3)\}$	1	17	$\{(4,1), (1,4)\}$	1	26	$\{(5,4), (4,2)\}$	1
9	$\{(2,1), (5,4)\}$	1	18	$\{(4,1), (2,3)\}$	1	27	$\{(5,4), (4,3)\}$	1

La première ligne du Tableau 19 met en évidence les combinaisons spécifiques de types de flexibilité et leurs alternatives qui ne peuvent pas coexister. Chaque ligne du tableau représente une incompatibilité particulière entre deux alternatives de différents types de flexibilité. Voici l'explication pour la première ligne :

Incompatibilité 1 : C_1

Alternatives impliquées :

(1,1) : Machine traditionnel (type de flexibilité Machine)

(4,1) : Intérimaire (1 opération) (type de flexibilité Humaine)

Cette ligne indique que l'alternative 1 du type de flexibilité Machine, à savoir "Machine traditionnel", est incompatible avec l'alternative 1 du type de flexibilité Humaine, à savoir "Intérimaire". En d'autres termes, ces deux options ne peuvent pas être mises en œuvre simultanément dans le cadre de la même stratégie de flexibilité. Cette incompatibilité pourrait être due à des contraintes techniques, organisationnelles, ou économiques qui empêchent ces deux alternatives de coexister efficacement. Cela signifie que, lors de la planification et de la gestion des types de flexibilité, il est crucial de prendre en compte ces incompatibilités pour éviter des conflits et assurer une mise en œuvre harmonieuse des stratégies de flexibilité.

Le Tableau 20 présente les capacités de production atteintes par unité et les capacités totales atteintes pour différents types de flexibilité (ATL, Alternatives technologiques).

Tableau 20. Capacité de production atteinte en appliquant chaque alternative,

Type de de flexibilité ($i \in I$)	Capacité atteinte par unité (AC_{ij})				Capacité totale atteinte ($N_{ij} \times AC_{ij}$)			
	ATL 1	ATL 2	ATL 3	ATL 4	ATL 1	ATL 2	ATL 3	ATL 4
1. Machine	825	1650	8250	4950	20625	21450	24750	24750
2. Manutention	1650	4950	8250	11550	21450	24750	24750	23100
4. Humain	4950	8250	8250	8250	24750	24750	24750	24750

Voici une explication détaillée pour la première ligne du tableau, relative au type de flexibilité "Machine".

Capacité atteinte par unité (AC_{ij})

ATL 1 : 825, ATL 2 : 1650, ATL 3 : 8250, ATL 4 : 4950

Ces valeurs représentent la capacité de production atteinte par une seule unité de machine pour chaque alternative technologique (ATL). Par exemple, pour l'ATL 1, une unité de machine permet d'atteindre une capacité de production de 825, tandis que pour l'ATL 3, cette capacité est de 8250.

Capacité totale atteinte ($N_{ij} \times AC_{ij}$)

ATL 1 : 20625, ATL 2 : 21450, ATL 3 : 24750, ATL 4 : 24750

Ces valeurs représentent la capacité totale atteinte en multipliant la capacité par unité (AC_{ij}) par le nombre d'unités (N_{ij}) pour chaque alternative technologique. Par exemple, pour ATL 1, la capacité totale atteinte est de 20625, ce qui est le résultat de $N_{1,1} \times 825$.

Le Tableau 21 présente les paramètres nécessaires pour la planification de la montée en production sur une durée de 5 périodes (t1 à t5). Les paramètres incluent le budget alloué, la capacité de production cible, et les pénalités associées à la capacité supplémentaire et insuffisante.

Tableau 21. Paramètres du problème de planification de la montée en production

Paramètre		Période (t)				
Description	Nom	t1	t2	t3	t4	t5
Budget (k€)	B_t	5000	1250	1250	1250	1250
Capacité de production cible	TC_t	200	2000	7000	13000	20000
Pénalité de capacité supplémentaire	ω_1^t	0,05	0,3	0,3	0,3	0,05
Pénalité pour capacité insuffisante	ω_2^t	0,4	0,2	0,2	0,2	0

5.3.2 Présentation des résultats sur l'étude de cas

Dans cette sous-section, le modèle de programmation mathématique (modèle 1) pour le problème de sélection du niveau de flexibilité de fabrication est résolu à l'aide des paramètres fournis dans l'étude de cas. Le modèle de programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP) a été codé dans GAMS 24,1,2, et les instances ont été résolues par CPLEX Solver 12,5,1, méthode exacte à l'aide d'un PC avec processeur Intel(R) Core (TM) i7-13700H 2,40 GHz et 32 Go de RAM.

Le Tableau 22 présente la solution optimale du problème MFLS-SE au niveau du budget de 10000 k€. Le temps de résolution de ce problème est globalement inférieur à cinq secondes. Sur la base de la solution optimale, le meilleur niveau de technologie pour la flexibilité type « Machine » est « Capacité de la machine à intégrer un module supplémentaire », pour la flexibilité de type « Manutention » est « Automatique et polyvalent AMR avec bras robotique », pour la flexibilité type « Stockage » est « Stockage polyvalent et automatique », pour la flexibilité type « Humaine » est « Chef d'équipe », et

pour la flexibilité type « Informatique » est « Application d'aide à la décision accessible connecté ». Le budget requis pour cette solution est de 8223 k€, et elle fournit environ 98,5% de l'utilité de fabrication possible. De plus, la limite inférieure et la limite supérieure de l'indice d'utilité totale (TUI), de la valeur de flexibilité totale (TF, calculé par les critères du Tableau 14), de la valeur de la performance opérationnelle totale (TOP calculé par les critères du Tableau 14) et des coefficients synergiques appliqués sont indiqués dans le tableau. Les Tableau 23 et Tableau 24 présentent les solutions qui fournissent la limite supérieure et la limite inférieure de l'indice d'utilité totale, respectivement, en résolvant les modèles présentés dans les équations (18) et (19). Il est à noter que les budgets minimum et maximum requis pour mettre en œuvre ces solutions sont respectivement de 1782 k€ et 12223 k€.

Tableau 22. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget de 10000 k€ ($\alpha=0,5$)

Type de flexibilité (<i>i</i>)		Alternatives				Coefficient synergique (z_i)
		<i>j</i> = 1	<i>j</i> = 2	<i>j</i> = 3	<i>j</i> = 4	
1	Machine			●		1,2
2	Manutention				●	1,44
3	Stockage				●	1,44
4	Humain				●	1
5	Informatique				●	1,2
$TUI^{LB} = 0,269$		Budget utilisé : 1782 k€				
$TUI^{UB} = 0,886$		Budget utilisé : 12223 k€				
$\overline{TUI}^* = 98,489\%$						
Total budget : 10000 k€,		Budget utilisé 8223 k€				
TF valeur : 1,017		TOP valeur : 0,737				

Tableau 23. La limite inférieure de l'indice d'utilité totale ($\alpha=0,5$)

Type de flexibilité (<i>i</i>)		Alternatives				Coefficient synergique (z_i)
		<i>j</i> = 1	<i>j</i> = 2	<i>j</i> = 3	<i>j</i> = 4	
1	Machine	●				0,64
2	Manutention	●				0,8
3	Stockage	●				1
4	Humain		●			1
5	Informatique	●				0,8
$TUI^{LB} = 0,269$		Budget utilisé 1782 k€				
TF valeur : 0,137		TOP valeur : 0,401				

Tableau 24. La limite supérieure de l'indice d'utilité totale ($\alpha=0,5$)

Type de flexibilité (<i>i</i>)		Alternatives				Coefficient synergique (z_i)
		<i>j</i> = 1	<i>j</i> = 2	<i>j</i> = 3	<i>j</i> = 4	
1	Machine				●	1
2	Manutention				●	1,2
3	Stockage				●	1,44
4	Humain				●	1
5	Informatique				●	1,2
$TUI^{UB} = 0,886$		Budget utilisé : 12223 k€				
TF valeur : 1,005		TOP valeur : 0,767				

5.3.3 Analyse de sensibilité et robustesse

L'analyse de sensibilité consiste à varier systématiquement les valeurs et/ou les pondérations des critères pour observer comment ces changements influencent la décision finale. Ce processus permet d'identifier les critères ayant le plus d'impact sur la décision et de déterminer quelles solutions demeurent optimales dans différents scénarios de pondération. En effectuant une analyse de sensibilité, les décideurs obtiennent des informations sur la stabilité de leurs solutions et comprennent la plage de fluctuation des poids sans modification du choix préféré. Cela renforce la confiance dans le processus décisionnel et garantit que les solutions sélectionnées restent robustes et fiables, même face à l'incertitude et à la variabilité des jugements des experts.

Dans notre étude, l'évaluation du poids des critères est un aspect crucial de la prise de décision multicritère. Dans la plupart des méthodes existantes, les pondérations sont attribuées en fonction de l'expérience subjective et du jugement des experts. Bien que cette approche soit valable, elle conduit souvent à des poids qui ne sont pas toujours fiables en raison de leur subjectivité inhérente. Les opinions des experts peuvent varier considérablement, influencées par des préjugés personnels, des préférences et des niveaux d'expertise variables. Par conséquent, les pondérations issues de ces évaluations subjectives peuvent ne pas refléter fidèlement l'importance réelle de chaque critère dans le processus décisionnel.

Pour résoudre ce problème, nous utilisons des analyses de sensibilité et de robustesse sur divers paramètres : le budget, l'importance de l'indice de performance opérationnelle par rapport à l'indice de flexibilité (α), le poids d'importance du type de flexibilité (w_i) et le coefficient synergique ($S_{i'j',ij}$). Ces analyses permettent d'assurer que les décisions prises sont bien fondées et résistantes aux variations des pondérations et des jugements, offrant ainsi une base plus solide et fiable pour la prise de décision stratégique.

Analyse de sensibilité sur le budget total

Le budget est l'un des facteurs les plus importants dans la prise de décision pour le problème de sélection du niveau de flexibilité de fabrication. En général, le budget est un facteur critique dans la mise en œuvre des projets car il garantit que les ressources sont allouées efficacement pour atteindre les objectifs du projet. Un budget bien défini aide à planifier et à contrôler les coûts du projet, évitant ainsi les dépenses excessives et assurant la stabilité financière tout au long du cycle de vie du projet. Il facilite également la prise de décision en fournissant un cadre clair pour évaluer les scénarios coûts-avantages et hiérarchiser les tâches en fonction des fonds disponibles. De plus, un budget réaliste permet d'obtenir la confiance et le financement des parties prenantes, car il démontre une compréhension approfondie des exigences et des contraintes financières du projet. Il est donc nécessaire de mieux comprendre l'effet des différents niveaux budgétaires sur les technologies alternatives sélectionnées et d'étudier les indicateurs clés de performance associés, tels que la flexibilité de fabrication et les performances opérationnelles. Pour y parvenir, le niveau du budget total a été varié de 2000 k€ à 13000 k€ afin d'identifier toutes les solutions optimales dans cette gamme¹. Au total, sept solutions, nommées S_1 à S_7 , ont été identifiées qui sont présentés dans les Tableau 25 à Tableau 31.

¹ Cette plage est sélectionnée en fonction des valeurs maximale et minimale du budget total requis.

Tableau 25. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget maximum de 2000 k€ (Solution S_1)

Type de flexibilité (i)		Alternatives				Coefficient synergique (z_i)
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	
1	Machine	●				0,64
2	Manutention	●				0,96
3	Stockage	●				1
4	Humain				●	1,2
5	Informatique	●				0,8
TUI* = 8,69 % Total budget: 2000 k€, Budget utilisé: 1782 k€ TF valeur: 0,217 TOP valeur: 0,429						

Tableau 26. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget maximum de 4000 k€ (Solution S_2)

Type de flexibilité (i)		Alternatives				Coefficient synergique (z_i)
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	
1	Machine		●			1
2	Manutention	●				1,2
3	Stockage	●				1
4	Humain				●	1,2
5	Informatique	●				1
TUI* = 28,102 % Total budget: 4000 k€, Budget utilisé: 3932 k€ TF valeur: 0,360 TOP valeur: 0,525						

Tableau 27. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget maximum de 5000 k€ (Solution S_3)

Type de flexibilité (i)		Alternatives				Coefficient synergique (z_i)
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	
1	Machine		●			1
2	Manutention				●	1,2
3	Stockage				●	1,2
4	Humain				●	1
5	Informatique			●		1
TUI* = 78,505 % Total budget: 5000 k€, Budget utilisé: 4923 k€ TF valeur: 0,742 TOP valeur: 0,765						

Tableau 28. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget maximum de 6000 k€ (Solution S_4)

Type de flexibilité (i)		Alternatives				Coefficient synergique (z_i)
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	
1	Machine			●		1,2
2	Manutention				●	1,44
3	Stockage				●	1,2
4	Humain				●	1
5	Informatique			●		1
TUI* = 87,304 % Total budget: 6000 k€, Budget utilisé: 5523 k€ TF valeur: 0,883 TOP valeur: 0,733						

Tableau 29. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget maximum de 8000 k€ (Solution S_5)

Type de flexibilité (i)		Alternatives				Coefficient synergique (z_i)
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	
1	Machine		●			1
2	Manutention				●	1,2
3	Stockage				●	1,44
4	Humain				●	1
5	Informatique				●	1,2
TUI* = 89,69 % Total budget: 8000 k€, Budget utilisé: 7623 k€ TF valeur: 0,876 TOP valeur: 0,769						

Tableau 30. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget maximum de 9000 k€ (Solution S_6)

Type de flexibilité (i)		Alternatives				Coefficient synergique (z_i)
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	
1	Machine			●		1,2
2	Manutention				●	1,44
3	Stockage				●	1,44
4	Humain				●	1
5	Informatique				●	1,2
TUI* = 98,489 % Total budget: 9000 k€, Budget utilisé: 8223 k€ TF valeur: 1,017 TOP valeur: 0,737						

Tableau 31. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget maximum de 13000 k€ (Solution S_7)

Type de flexibilité (i)		Alternatives				Coefficient synergique (z_i)
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	
1	Machine				●	1
2	Manutention				●	1,2
3	Stockage				●	1,44
4	Humain				●	1
5	Informatique				●	1,2
TUI* = 100 % Total budget: 13000 k€, Budget utilisé: 12223 k€ TF valeur: 1,005 TOP valeur: 0,767						

Solutions S_1 à S_7 clarifier les meilleures technologies de rechange qui peuvent être choisies en tenant compte des limites budgétaires connexes. De plus, l'étude des détails de ces solutions donne aux gestionnaires l'occasion de considérer les aspects les plus importants du problème et de prendre des décisions éclairées. Par exemple, le Total Utility Index (\overline{TUI}) présente un comportement concave, augmentant rapidement à des niveaux de budget inférieurs. Environ 80 % de l'utilité \overline{TUI} sont réalisés avec un budget allant jusqu'à 5000 k€, tandis que 8000 k€ supplémentaires sont nécessaires pour atteindre les 20 % restants (Figure 33). Comme \overline{TUI} comprend à la fois des valeurs de flexibilité (TF) et de performance opérationnelle (TOP) (avec une pondération d'importance de $\alpha = 0,5$), nous pouvons également étudier leurs comportements séparément. La Figure 34 présente les comportements de trois indicateurs clés de performance, notamment \overline{TUI} , TF, et TOP, dans les solutions obtenues. Comparer les solutions avec un budget de plus de 5000 k€ (solutions S_4 à S_7) avec solution S_3 révèle que l'amélioration de l'indice de performance opérationnelle (valeur TOP) est au maximum de 0,5 %, tandis que l'indice de flexibilité (valeur TF) peut s'améliorer jusqu'à 37 %. Cela suggère que l'allocation de plus de 5000 k€ au déploiement du système de fabrication améliorera principalement la flexibilité du système et pourrait ne pas affecter de manière significative ses performances.

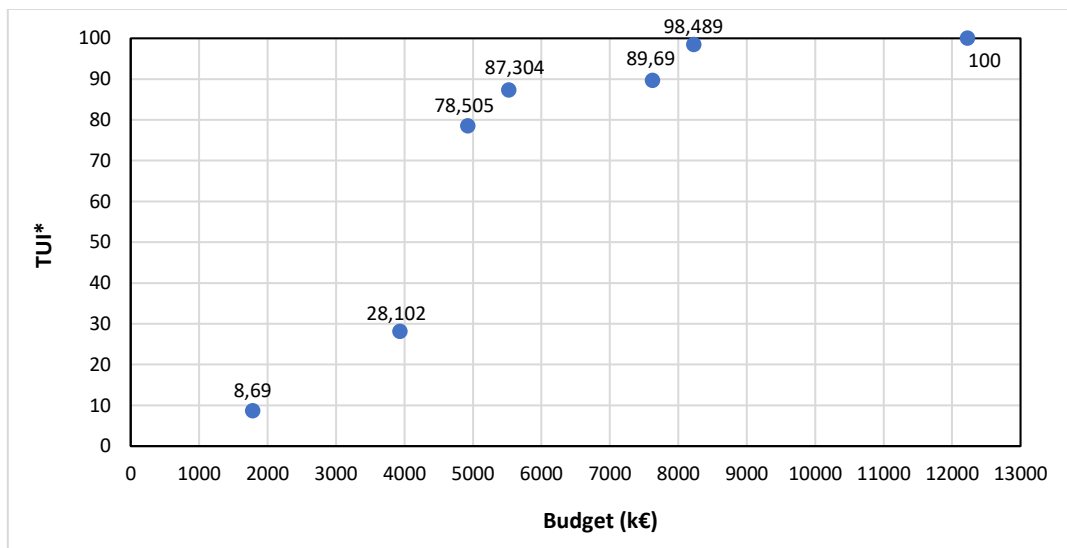


Figure 33. Changements dans le Total Utility Index (\overline{TUI}^*) avec une augmentation du niveau du budget total

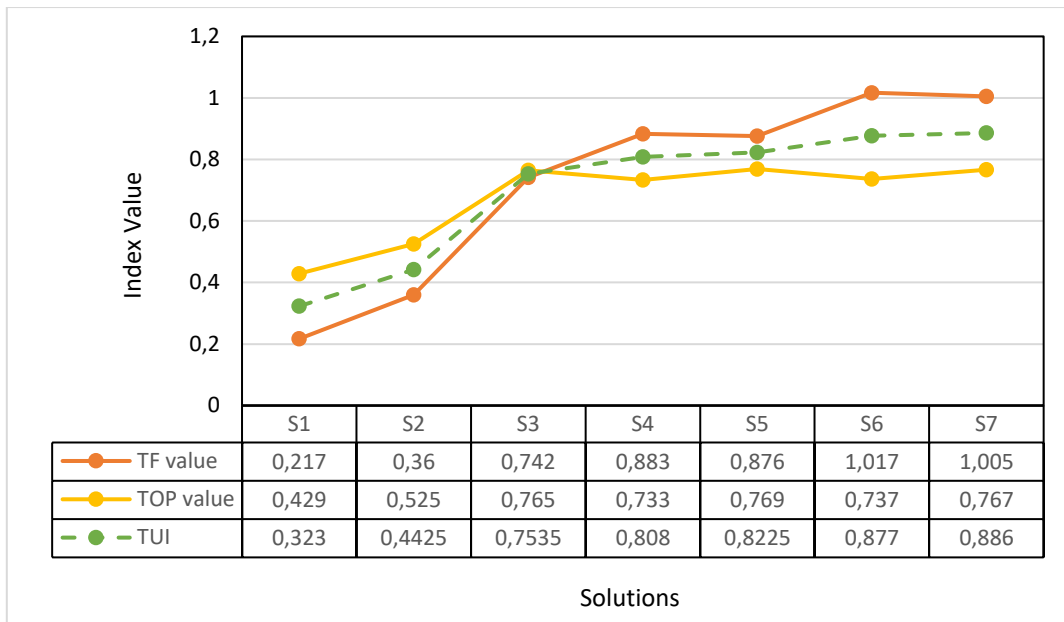


Figure 34. Changements dans la valeur du Total Flexibility (TF), la valeur du Total Operational Performance (TOP), et le Total Utility Index (TUI) considérant les solutions S_1 à S_7

La Figure 34, Évolution de la valeur de la flexibilité totale (TF), de la performance opérationnelle totale (TOP), et de l'indice d'utilité totale (TUI) pour les solutions S_1 à S_7 .

Le graphique montre les changements dans les indices TF, TOP et TUI pour différentes solutions (S_1 à S_7). Nous observons que l'indice de flexibilité totale (TF) atteint son maximum avec la solution S_6 (TF = 1,017) pour un budget de 8223k€. Au-delà de cette solution, les dépenses supplémentaires n'améliorent que marginalement la performance opérationnelle, avec une légère augmentation de l'indice de performance opérationnelle (TOP) jusqu'à 0,767 pour la solution S_7 . Cela indique que S_6 offre le meilleur compromis entre la flexibilité et les coûts, tandis que l'augmentation des dépenses après S_6 n'entraîne qu'une amélioration mineure de la performance opérationnelle.

Analyse de sensibilité sur le poids d'importance (α)

L'objectif du modèle 1 est de sélectionner les meilleures technologies alternatives pour maximiser l'indice d'utilité (TUI). Cet indice englobe deux aspects de chaque technologie : la flexibilité et la performance opérationnelle. Le poids d'importance α est utilisé comme paramètre de réglage pour prendre en compte ces aspects. Dans toutes les instances résolues dans les sous-sections précédentes, une valeur intermédiaire est utilisée pour ce paramètre, en considérant l'importance de ces deux aspects comme égales ($\alpha = 0,5$). Dans cette sous-section, l'effet de différentes valeurs de ce paramètre sur le problème MFLS-SE est étudié. À cette fin, puisque la plage autorisée pour ce paramètre est $0 \leq \alpha \leq 1$, cet intervalle est examiné pour déterminer où la solution optimale change. Il convient de noter que pour se concentrer uniquement sur le comportement du modèle en réponse aux changements de ce paramètre, la limitation budgétaire est ignorée dans ces examens.

La Figure 35 présente trois solutions trouvées ainsi que leurs sous-intervalles associés dans lesquels une solution optimale est proposée sans tenir compte de la limitation budgétaires pour cette analyse. La solution optimale dans le premier sous-intervalle $0 \leq \alpha < 0,2755$ est S_6 , qui a le meilleur indice de flexibilité (valeur TF = 1,017). D'autre part, dans le troisième sous-intervalle $0,9826 < \alpha \leq 1$. Le modèle propose la solution S_5 , qui a le meilleur indice de performance opérationnelle (valeur TOP = 0,769). Pour les valeurs intermédiaires de ce paramètre (sous-intervalle $0,2755 \leq \alpha \leq 0,9826$), S_7 est la meilleure proposition par le modèle d'optimisation. Connaître le domaine de chaque solution

optimale, ainsi que les indicateurs clés de performance associée et les budgets requis, permet aux décideurs de sélectionner la meilleure option.

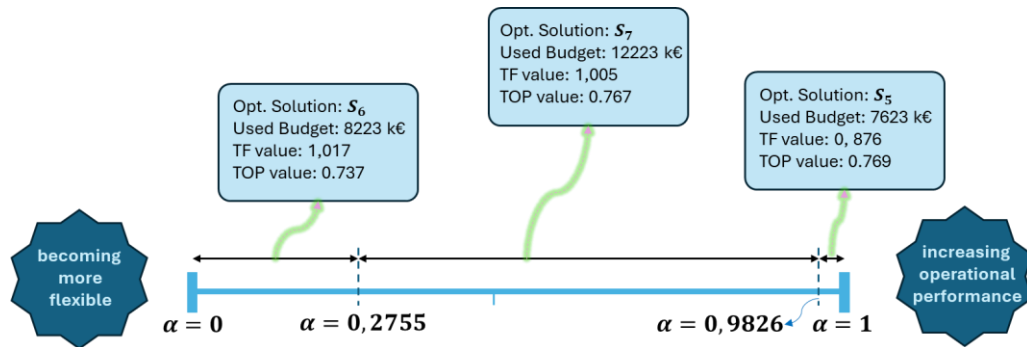


Figure 35. Évolution du taux d'importance de l'indice de performance opérationnelle par rapport à l'indice de flexibilité (sans tenir compte de la limitation budgétaire)

Analyse de robustesse sur les pondérations d'importance des types de flexibilité (w_i)

La stabilité des solutions optimales est examinée pour deux niveaux de budget différents : $B = 10000$ et $B = 6000$ k€. Les résultats sont présentés dans les Tableau 32 et Tableau 33. Pour chaque poids w_i , trois valeurs sont présentées : Limite supérieure, Limite inférieure et Niveau initial. Par exemple, dans Tableau 32, l'intervalle autorisé pour le poids de la flexibilité de type 'Machine' est $[0, 605]$. Cela indique que la solution optimale S_6 restera stable si w_1 change au cours de cet intervalle. Dans l'ensemble, les solutions optimales pour les deux niveaux budgétaires font preuve d'une robustesse significative en réponse aux changements de pondération des types de flexibilité. Cependant, la comparaison des résultats révèle que les solutions proposées par le modèle sont plus sensibles aux changements dans les poids d'importance des types de flexibilité « Machine » et « Humaine » (w_1 et w_4).

Tableau 32. La robustesse de la solution S_6 en modifiant en importance les poids des types de flexibilité (Budget : 10000 k€)

	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	Opt. Solution
Limite supérieure	0,605	0,99	0,99	0,325	0,99	S_6
Niveau initial	0,30	0,25	0,25	0,10	0,10	
Limite inférieure	0	0,0712	0,015	0	0	

Tableau 33. La robustesse de la solution S_4 en modifiant en importance les poids des types de flexibilité (Budget : 6000 k€)

	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	Opt. Solution
Limite supérieure	0,99	0,99	0,99	0,325	0,99	S_4
Niveau initial	0,30	0,25	0,25	0,10	0,10	
Limite inférieure	0	0,0712	0	0,01	0,01	

Analyse de sensibilité sur le coefficient synergique des alternatives ($S_{i'j',ij}$)

Le coefficient synergique de l'alternative $i'j'$ sur la valeur de flexibilité de l'alternative ij ($S_{i'j',ij}$) peut également être décrit comme $S_{i'j',ij} = 1 \mp \rho_{i'j',ij}$ où $\rho_{i'j',ij} \geq 0$. Par conséquent, lorsque $\rho_{i'j',ij} = 0$, Il n'y a pas d'effets synergiques entre les deux techniques alternatives. En outre $1 - \rho_{i'j',ij}$

et $1 + \rho_{i'j',ij}$ représentent respectivement des effets synergiques négatifs et positifs entre les deux alternatives. Pour les coefficients synergiques de l'étude de cas présentée dans le Tableau 17, on suppose que $\rho = 0,2$ pour toutes les alternatives qui ont des effets synergiques négatifs ou positifs. Ici, nous nous intéressons à étudier l'effet des interactions synergiques en faisant varier leur intensité. Dans ce but, nous avons résolu le problème avec $\rho = 0$ (sans tenir compte des effets synergiques) et $\rho = 0,4$ (en tenant compte des effets plus graves). Le Tableau 34 présente les résultats de la résolution du problème en tenant compte des différents niveaux budgétaires.

Tableau 34. Les solutions optimales (basées sur la fonction objectif $\overline{TUI}_{\alpha=0,5}$) et leurs valeurs de Total Flexibility (TF) en tenant compte des différents niveaux de budgets et des coefficients synergiques (ρ)

Budget (k€)	$\rho = 0$		$\rho = 0,2$		$\rho = 0,4$	
	Solution	TF	Solution	TF	Solution	TF
2000	S_1	0,22 ←	S_1	0,217 →	S_1	0,214
3000	S_1	0,22 ←	S_1	0,217 →	S_1	0,214
4000	S_2	0,327 ←	S_2	0,36 →	S_2	0,393
5000	S_3	0,67 ←	S_3	0,742 →	S_8	0,873
6000	S_4	0,738 ←	S_4	0,883 →	S_4	1,037
7000	S_4	0,738 ←	S_4	0,883 →	S_4	1,037
8000	S_5	0,724 ←	S_5	0,876 →	S_5	1,048
9000	S_6	0,792 ←	S_6	1,017 →	S_6	1,271
10000	S_6	0,792 ←	S_6	1,017 →	S_6	1,271
11000	S_6	0,792 ←	S_6	1,017 →	S_6	1,271
12000	S_6	0,792 ←	S_6	1,017 →	S_6	1,271
13000	S_7	0,853 ←	S_7	1,005 →	S_6	1,271

Les résultats obtenus montrent que les solutions optimales ne changent pas lors de la neutralisation des effets synergiques ($\rho = 0$) par rapport à quand $\rho = 0,2$. Cependant, la valeur de Total Flexibility (TF) des solutions optimales dans ces états (avec et sans tenir compte des effets synergiques) changent, ce qui entraîne un changement dans les préférences des solutions basées sur les valeurs TF. Sans l'effet synergique, les préférences sont $S_7 \rightarrow S_6 \rightarrow S_4 \rightarrow S_5 \rightarrow S_3 \rightarrow S_2 \rightarrow S_1$. Ces préférences deviennent $S_6 \rightarrow S_7 \rightarrow S_4 \rightarrow S_5 \rightarrow S_3 \rightarrow S_2 \rightarrow S_1$ si l'on considère l'effet synergique avec $\rho = 0,2$ et $S_6 \rightarrow S_5 \rightarrow S_4 \rightarrow S_8 \rightarrow S_2 \rightarrow S_1$ si l'on considère l'effet synergique avec $\rho = 0,4$. Cela indique que sans tenir compte de la performance opérationnelle totale (TOP), les effets synergiques peuvent influencer les décisions optimales,

Lorsque les effets synergiques sont augmentés, les résultats deviennent plus sensibles. Pour deux niveaux du paramètre de budget maximum, c'est-à-dire, $B = 5000$ et $B = 13000$. Les solutions optimales changent en S_8 et S_6 , respectivement. Le Tableau 35 présente la solution nouvellement obtenue S_8 en détail. Nous avons également recherché les seuils de ρ où la solution optimale a changé. Le seuil pour changer la solution optimale à un niveau de budget de 5000 est de $\hat{\rho}_1 = 0,39$, et pour le niveau budgétaire de 13000, il est $\hat{\rho}_2 = 0,25$. Cela signifie, par exemple, à un niveau de budget de 13000 k€, la solution S_6 reste optimale dans l'intervalle des coefficients synergiques $0 \leq \rho \leq 0,25$. La Figure 36 présente une comparaison des valeurs de Total Flexibility (TF) à différents niveaux d'effets synergiques.

Tableau 35. La solution optimale du problème MFLS-SE avec un budget maximum de 5000 k€ et un coefficient synergique $\rho=0,4$ (Solution S_8)

Type de flexibilité (i)		Alternatives				Coefficient synergique (z_i)
		$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	
1	Machine			●		1,4
2	Manutention				●	1,96
3	Stockage			●		1,4
4	Humain				●	1
5	Informatique		●			1
TUI* = 71,755 % Total budget: 5000 k€, Budget utilisé: 4903 k€ TF valeur: 0,873 TOP valeur: 0,712						

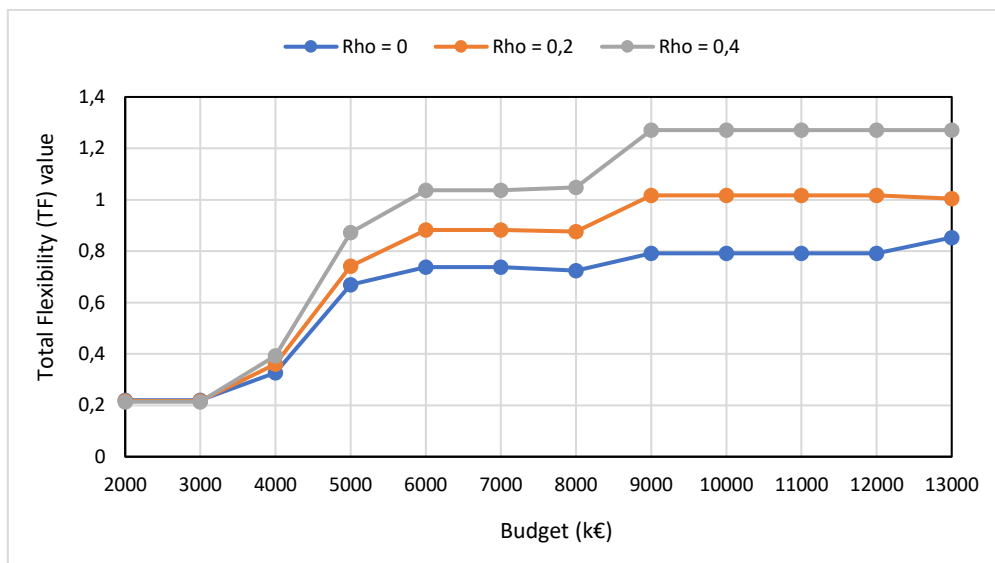


Figure 36. La comparaison des valeurs de la flexibilité totale avec différents niveaux d'effets synergiques

5.3.4 Présentation des résultats sur la planification de l'investissement

Les résultats présentés dans la section précédente aident les décideurs à prendre des décisions concernant le choix de technologies alternatives pour équiper une nouvelle chaîne de fabrication, en tenant compte à la fois du niveau de flexibilité et de la performance opérationnelle. Cependant, il existe d'autres considérations dans la mise en œuvre de tels projets dans le monde réel. La conception d'une feuille de route applicable peut aider à relever ces défis. Suivre une feuille de route bien conçue est primordial pour atteindre les objectifs d'un projet, en particulier dans le domaine du développement de lignes de fabrication de nouveaux produits. Une feuille de route solide sert de cadre directeur qui décrit les étapes et les jalons séquentiels nécessaires pour atteindre les objectifs finaux du projet de manière efficace et efficiente. Dans le contexte du développement de la chaîne de fabrication, la feuille de route doit trouver un équilibre délicat entre différents facteurs. Premièrement, il doit examiner méticuleusement les limites budgétaires dans l'horizon temporel désigné. Une planification financière adéquate garantit que les ressources sont allouées de manière optimale, ce qui permet d'éviter les dépenses excessives et d'assurer la stabilité financière tout au long du cycle de vie du projet.

De plus, la feuille de route doit tenir compte de la capacité cible de la chaîne de fabrication, qui peut être influencée par les demandes du marché et les contraintes d'approvisionnement. Comprendre la dynamique du marché et les exigences des clients est crucial pour fixer des objectifs de capacité réalistes

qui s'alignent sur les prévisions de la demande du marché. Simultanément, des considérations du côté de l'offre, telles que la disponibilité des matières premières, des équipements de production et de la main-d'œuvre qualifiée, doivent être prises en compte dans la feuille de route pour assurer une exécution fluide du projet. En intégrant ces aspects dans la feuille de route, les parties prenantes du projet peuvent relever efficacement les défis, atténuer les risques et mener le projet à bien dans les limites de la portée, du budget et du calendrier définis. Pour le problème de l'étude de cas à l'examen, les limites du processus de disponibilité du budget et la capacité cible attendue pour chaque période de l'horizon temporel sont indiquées dans le Tableau 21. Le modèle bi-objectif proposé (modèle 2) vise à fournir aux solutions non dominées un indice d'utilité totale optimal tout en respectant autant que possible les objectifs de capacité cibles attendus. Le Tableau 36 présente quatre solutions efficaces obtenues en résolvant le modèle mathématique bi-objectif (modèle 2) à l'aide de la méthode exacte de la contrainte epsilon augmentée (Augmented Epsilon Constraint, AEC). Les deux valeurs de fonction d'objectif, y compris *Total Utility Index* (\overline{TUI}) et *Total Violation Penalty* (TVP), ainsi que les solutions associées et le budget requis pour chaque solution de Pareto (PS), sont présentés. Les deux valeurs de la fonction d'objectif, à savoir l'Indice d'Utilité Totale (TUI) et la Pénalité Totale pour Violations (TVP), ainsi que les solutions associées et le budget requis pour chaque solution de Pareto (PS), sont présentés. Pour rappel, le TVP représente la pénalité totale pour les écarts entre le plan initial (objectif initial) et la solution optimale identifiée, (Section 5.2.3). Le front de Pareto extrait est également présenté dans la Figure 37. Le temps de résolution de ce problème est globalement inférieur à une minute.

Tableau 36. Des solutions efficaces pour la planification de la feuille de route du problème MFLS-SE

Pareto Solution	\overline{TUI} (max)	TVP (min)	Total Used Budget (k€)	Description
PS_1	98,49 %	2290	8223	S_6
PS_2	95,01 %	2042,5	8193	New solution point
PS_3	89,69 %	355	7623	S_5
PS_4	8,69 %	272,5	1782	S_1

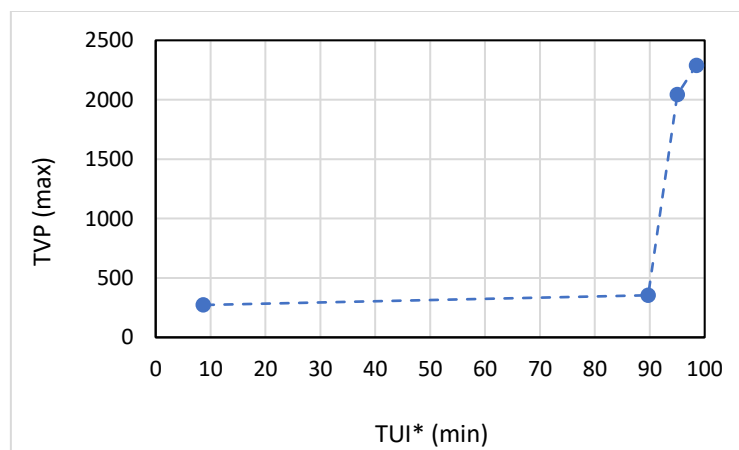


Figure 37. Le front de Pareto obtenu pour la planification de la feuille de route bi-objective du problème MFLS-SE

Pareto de la Solution (PS_1):

C'est le premier point extrême du front de Pareto où la fonction objectif \overline{TUI} atteint son meilleur rapport qualité-prix. Le plan de mise en œuvre proposé par PS_1 est présentée dans le Tableau 37. Dans cette solution de Pareto, qui correspond à la solution S_6 , la capacité réelle du plan de mise en œuvre proposé est la plus faible possible par rapport à la capacité cible par rapport aux autres solutions de Pareto. La Figure 38 illustre la conformité entre la capacité cible et la capacité réelle fournie par PS_1 . Par

exemple, sur la base du plan proposé, la capacité réelle au cours des périodes t_1 et t_2 sera égal à zéro. Par exemple, sur la base du plan proposé, la capacité réelle par périodes t_1 et t_2 sera nulle. Par conséquent, les valeurs des variables S_t^- indiquent qu'il y a 200 et 2000 unités de capacité insuffisante pour ces périodes, respectivement. De plus, dans la période t_3 . La capacité réelle sera de 11550 unités, soit 4550 unités de plus que la capacité cible ($TC_{t_3} = 7000$).

Tableau 37. Les valeurs optimales pour la planification de la feuille de route du problème MFLS-SE (Solution de Pareto PS_1)

Type de flexibilité (i)		ATL (j)	Horizon de planification				
			t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
1	Machine	3	1	1		1	
2	Manutention	4			1		1
3	Stockage	4					1
4	Humain	4	3				
5	Informatique	4					1
Extra Capacité		S_t^+			4550		3100
Capacité Insuffisante		S_t^-	200	2000		1450	
			TUI=98,49 %		TVP=2290		

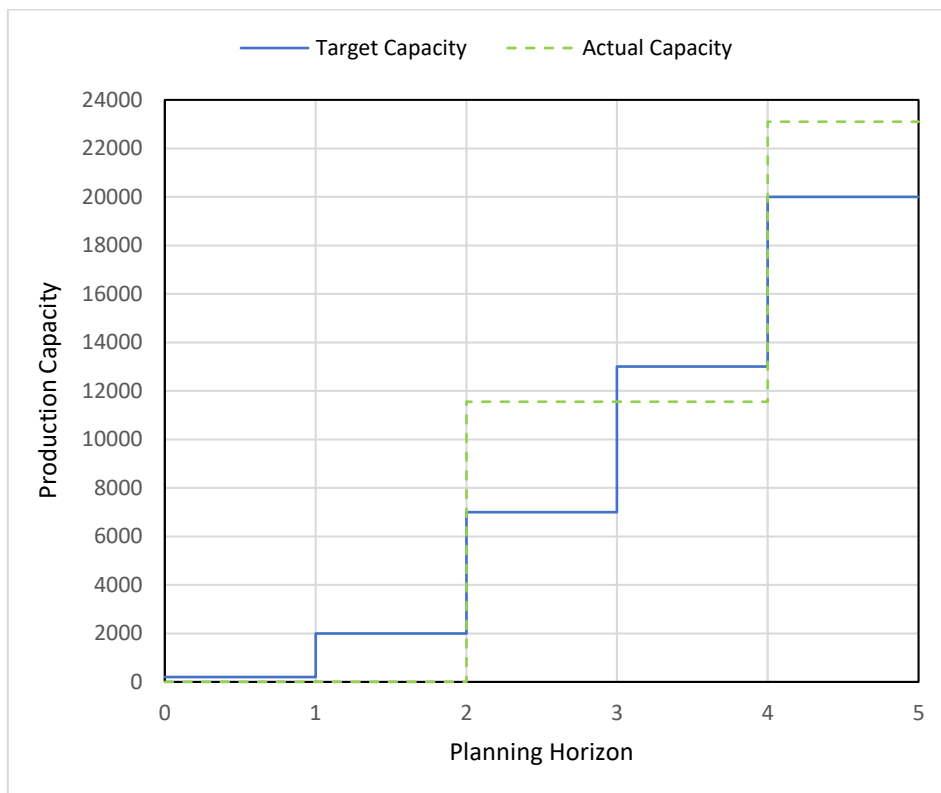


Figure 38. Comparaison entre la capacité cible et la capacité de production réelle obtenue grâce à la mise en œuvre de la solution de Pareto PS_1 .

Pareto de la Solution (PS_2):

Le plan de mise en œuvre proposé par PS_2 est présentée dans le Tableau 38. Dans cette solution de Pareto, qui ne correspond à aucune solution trouvée précédemment, les violations de la capacité réelle du plan de mise en œuvre proposé montrent une amélioration d'environ 11% par rapport à PS_1 , tandis que son *Total Utility Index* est réduit d'environ 3,5 %. La Figure 39 illustre la conformité entre la capacité cible et la capacité réelle fournie par PS_2 .

Tableau 38. Les valeurs optimales pour la planification de la feuille de route du problème MFLS-SE (Solution de Pareto PS_2)

Type de flexibilité (i)		ATL (j)	Horizon de planification				
			t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
1	Machine	3	1				2
2	Manutention	3			1		2
3	Stockage	4					1
4	Humain	4	3				
5	Informatique	4					1
Extra Capacité		S_t^+			1250		4750
Capacité Insuffisante		S_t^-	200	2000		4750	
			$TUI=95,01\%$		$TVP=2042,5$		

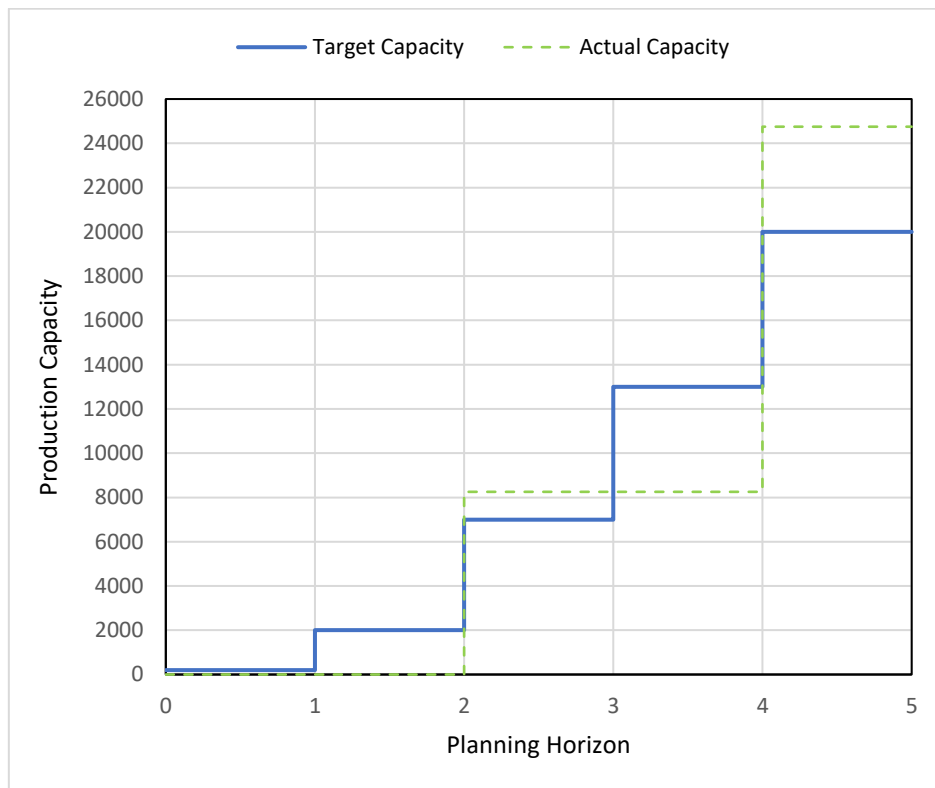


Figure 39. Comparaison entre la capacité cible et la capacité de production réelle obtenue grâce à la mise en œuvre de la solution de Pareto PS_2 .

Pareto de la Solution (PS_3):

Le plan de mise en œuvre proposé par PS_3 est présentée dans le Tableau 39. Dans cette solution de Pareto, qui correspond à la solution S_5 . Les violations de la capacité réelle du plan de mise en œuvre proposé montrent une amélioration significative d'environ 82,6 % par rapport à PS_2 , tandis que son *Total Utility Index* est réduit d'environ 5,6 %. Par conséquent, la capacité réelle fournie par PS_3 a une bonne conformité avec la capacité cible attendue (voir Figure 40).

Tableau 39. Les valeurs optimales pour la planification de la feuille de route du problème MFLS-SE (Solution de Pareto PS_3)

Type de flexibilité (i)		ATL (j)	Horizon de planification				
			t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
1	Machine	2	1		3	4	5
2	Manutention	4	2				
3	Stockage	4					1
4	Humain	4	3				
5	Informatique	4					1
Extra Capacité		S_t^+	1450			200	1450
Capacité Insuffisante		S_t^-		350	400		
			$TUI=89,69\%$		$TVP=355$		

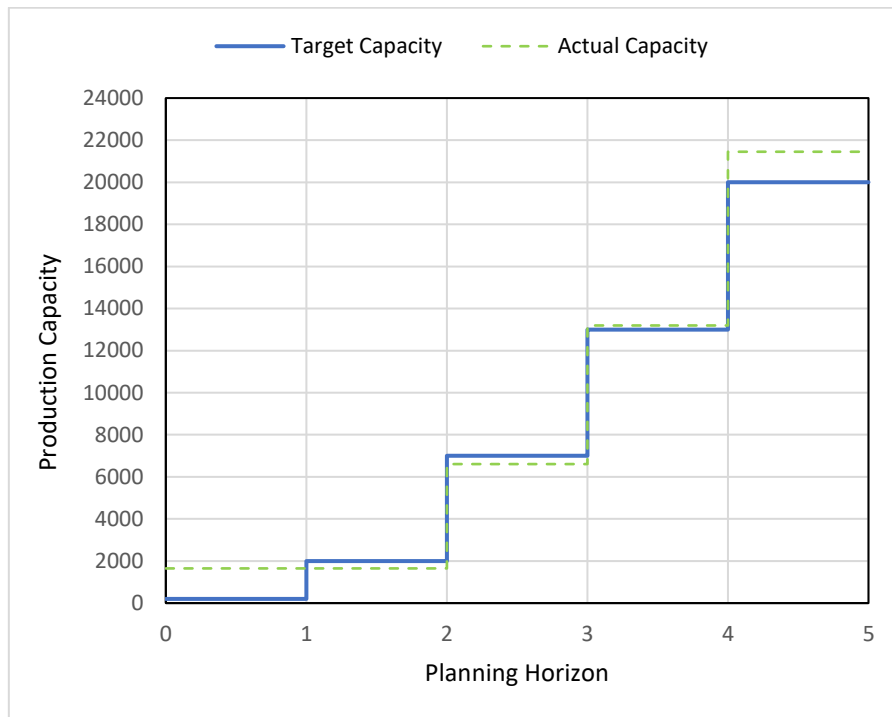


Figure 40. Comparaison entre la capacité cible et la capacité de production réelle obtenue grâce à la mise en œuvre de la solution de Pareto PS_3

Pareto de la Solution (PS_4):

C'est le deuxième point extrême du front de Pareto où la fonction objectif *Total Violation Penalty* (TVP) atteint son meilleur rapport qualité-prix. Le plan de mise en œuvre proposé par PS_4 est présentée dans le Tableau 40. Dans cette solution de Pareto, qui correspond à la solution S_1 , le *Total Utility Index* a la pire valeur possible par rapport aux autres solutions de Pareto. Par rapport à PS_3 , le *Total Utility Index* baisse de 90,3 %, tandis que la conformité de la capacité réelle avec la capacité cible s'améliore de 23,2 %. La Figure 41 illustre la conformité entre la capacité cible et la capacité réelle fournie par PS_4 ,

Tableau 40. Les valeurs optimales pour la planification de la feuille de route du problème MFLS-SE (Pareto de la solution PS_4)

Type de flexibilité (i)		ATL (j)	Horizon de planification				
			t_1	t_2	t_3	t_4	t_5
1	Machine	1	1	1	6	8	9
2	Manutention	1	1		3	5	4
3	Stockage	1					1
4	Humain	4	1	1		1	
5	Informatique	1					1
Extra Capacité		S_t^+	625				
Capacité Insuffisante		S_t^-		350	400	200	625
			$TUI=8,69\%$		$TVP=272,5$		

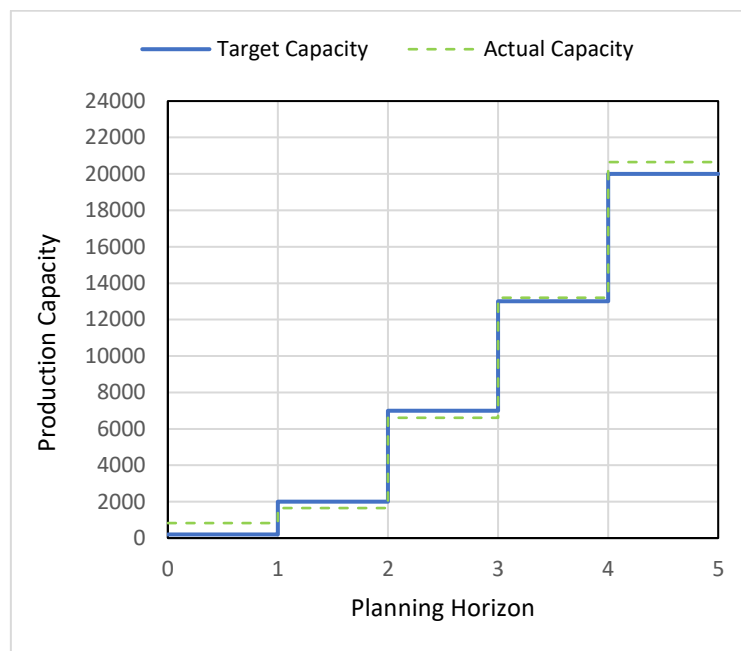


Figure 41. Comparaison entre la capacité cible et la capacité de production réelle obtenue grâce à la mise en œuvre de la solution de Pareto PS_4

En résumé, le Modèle 2 introduit une approche bi-objective pour la planification de l'investissement dans le contexte de la flexibilité de fabrication. En plus de maximiser l'Indice d'Utilité Totale (TUI) comme dans le Modèle 1, ce modèle vise également à minimiser les écarts par rapport au plan de montée en puissance nominal. Cette double perspective permet de mieux gérer les contraintes budgétaires et les objectifs de capacité de production sur plusieurs périodes, offrant ainsi une solution plus réaliste et applicable dans des scénarios industriels complexes.

Les résultats obtenus à partir de la méthode de contrainte epsilon augmentée montrent que le modèle est capable de générer des solutions efficaces qui équilibrent l'optimisation du TUI et la minimisation de la valeur total des pénalités de violation (TVP). Par exemple, les solutions de Pareto illustrées dans le Tableau 36 mettent en évidence divers compromis entre le TUI et le TVP, permettant aux décideurs de choisir la solution la plus adaptée à leurs priorités stratégiques et opérationnelles.

L'application du Modèle 2 à l'étude de cas FPT-BLY a démontré sa robustesse et sa capacité à s'adapter à des contraintes budgétaires progressives tout en atteignant des objectifs de capacité de production. Les analyses de sensibilité et les scénarios d'investissement proposés ont fourni des

perspectives précieuses sur les impacts des variations des paramètres du modèle, renforçant ainsi la validité et l'utilité pratique de cette approche.

En conclusion, le Modèle 2 représente une avancée significative dans la planification stratégique des investissements en flexibilité manufacturière. Il permet non seulement d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles mais aussi de prévoir et de gérer les risques associés aux écarts par rapport aux plans de production initiaux. Cette méthodologie offre donc un outil puissant pour les industries cherchant à améliorer leur compétitivité et leur capacité à répondre aux évolutions du marché de manière flexible et efficiente.

5.4 Conclusion du chapitre

Le chapitre 5 présente les modèles d'optimisation mathématique développés pour améliorer la flexibilité des systèmes de production chez FPT-BLY. Les solutions obtenues par l'application de ces modèles ont montré une efficacité remarquable lorsqu'elles ont été implantées dans un contexte réel au sein de l'usine. Les méthodologies proposées ont été bien reçues par l'entreprise, les décideurs ayant rapidement compris l'intérêt de ces solutions pour optimiser la flexibilité et la performance opérationnelle. À la suite des résultats positifs observés, ces solutions ont été remontées au siège de FPT à Turin, où une potentielle mise en œuvre à plus grande échelle, au niveau stratégique, pour l'ensemble des sites de production du groupe est en investigation.

Concernant la flexibilité humaine, nous observons que le modèle a sélectionné principalement le besoin en flexibilité du même niveau que le "chefs d'équipe" comme solution. Pour rappel le chef d'équipe représente le niveau de flexibilité maximum pour la flexibilité humaine. Cela présente des défis spécifiques pour FPT-BLY, située en zone rurale, où le recrutement de personnel qualifié peut s'avérer difficile. Par conséquent, il est crucial d'estimer les coûts, le temps, et la faisabilité de former le personnel existant pour assumer ces rôles. Cette exigence pourrait potentiellement remettre en cause le choix optimal du modèle, nécessitant des ajustements pour aligner les solutions proposées avec les réalités locales de recrutement et de formation.

L'application des modèles d'optimisation dans l'usine FPT-BLY a permis une amélioration notable de la planification et de l'allocation des ressources. Les analyses de sensibilité et les scénarios d'investissement ont fourni des perspectives précieuses sur les impacts des variations des paramètres du modèle, confirmant la validité et l'utilité pratique de ces approches. La méthodologie proposée a permis de guider l'usine dans l'ajustement de ses capacités de production, contribuant ainsi à une meilleure planification des investissements et à une optimisation continue des processus manufacturiers.

En outre, ce projet a significativement accru la compréhension de l'entreprise concernant ce type de problématiques complexes et les solutions optimisées possibles. L'implémentation des modèles a non seulement résolu des défis immédiats mais a aussi élevé la culture de recherche appliquée au sein de l'organisation. Les employés et les décideurs ont développé une meilleure appréciation des techniques de modélisation mathématique et de leurs applications pratiques, enrichissant ainsi leurs compétences en matière de prise de décision stratégique et opérationnelle.

Les alternatives actuelles sont très différentes les unes des autres, ce qui convient bien au niveau stratégique. Cependant, pour les niveaux tactique et opérationnel, il sera plutôt nécessaire de se concentrer sur différents modèles d'un même genre d'alternative. Cela implique de choisir parmi divers équipements et marques spécifiques, ainsi que de considérer d'autres aspects pratiques et techniques. Cette approche permettra de mieux aligner les choix opérationnels avec les exigences précises du terrain, tout en tirant parti des avantages stratégiques identifiés au niveau global.

En outre, la dimension du problème et le temps de calcul peuvent représenter des limites importantes lorsqu'on passe d'un objectif stratégique à un objectif opérationnel. La nécessité d'un calcul rapide devient alors cruciale, transformant le temps de résolution en un critère déterminant. Si la dimension du problème et le temps de calcul devient excessif, il pourrait être indispensable de développer des méthodes de résolution basé sur des algorithmes heuristiques ou métaheuristiques pour obtenir des solutions proche de la solution optimale de manière plus efficiente. Ces méthodes permettent de trouver des solutions approximatives en un temps raisonnable, surmontant ainsi les contraintes de temps tout en maintenant une qualité de solution acceptable. L'adoption de telles approches garantirait que les modèles d'optimisation demeurent pratiques et utilisables dans des contextes industriels réels où les décisions doivent souvent être prises rapidement.

Partie 3 : Conclusion et perspectives de la thèse

En tant que responsable de la transformation digital de FPT-BLY, je me suis intéressé à identifier et connaître les méthodes formelles pour m'assister, m'aider, m'appuyer dans mes missions de cette transformation. En réalisant un benchmark et un état de l'art, je trouvé peu de travaux existants sur ce point facilement transposable et utilisable dans mon environnement industriel. De ce fait, je me suis intéressé à faire une thèse pour étudier plus profondément et de développer les méthodes et outils nécessaire.

Au cours de cette thèse, l'objectif principal était d'éclairer le concept de flexibilité, permettant de faciliter la mise en place d'auto-configuration, auto-ajustement du système de production qui est une des principes majeurs de l'industrie 4,0 et de la transformation digitale. De de fait, nous nous intéressons dans cette thèse au pilier méthodologique de l'Industrie 4,0 afin de proposer des méthodologies pour le déploiement de systèmes de production flexibles et reconfigurables.

Les objectifs initiaux étaient :

- D'apporter une contribution originale à la connaissance des différents types de flexibilité dans les systèmes de production,
- De développer des méthodes pour mesurer et classifier efficacement la flexibilité,
- De déterminer le niveau approprié de flexibilité pour différents systèmes de production,
- De créer une feuille de route stratégique pour guider les entreprises vers une meilleure flexibilité et réactivité.

Dans cette section finale, une synthèse du cheminement de recherche depuis les premières problématiques rencontrées sera présentée. Les résultats obtenus seront ensuite discutés pour répondre aux questions de recherche posées dans le chapitre 3. Enfin, les travaux de recherche seront mis en perspective, soulignant les contributions originales apportées par cette thèse et présentant des pistes de recherche futures pour dépasser les limites identifiées.

Conclusion générale

L'objectif de cette thèse est d'éclairer le concept et le processus de déploiement de systèmes de production flexibles et reconfigurables dans le contexte de l'Industrie 4,0, en utilisant une méthodologie rigoureuse et innovante. Cette conclusion nous permet de revenir sur chaque chapitre et sur chaque contribution de cette thèse.

Dans le chapitre 1, l'industrie 4,0 a été présentée comme un paradigme de transformation industrielle synonyme de quatrième révolution industrielle, mettant l'accent sur l'intégration des technologies avancées telles que les systèmes cyber-physiques, l'optimisation mathématiques. La flexibilité a été identifiée comme un facteur clé pour la compétitivité des entreprises manufacturières face aux exigences changeantes du marché, car elle permet la mise en place des méthodologies d'auto-ajustement et d'auto-configuration rendu possible grâce aux technologies de l'industrie 4,0. Les objectifs de recherche ont été définis, incluant la taxonomie des types de flexibilité, leur classification, la mesure de

la flexibilité, la détermination du niveau approprié de flexibilité, et l'élaboration d'une feuille de route pour atteindre ce niveau. Les questions de recherche ont été orientées pour répondre à chaque objectif de recherche cité précédemment.

Dans le chapitre 2, le contexte industriel de cette étude a été détaillé, en présentant FPT Industrial et son usine de Bourbon-Lancy. Les défis auxquels l'usine fait face, tels que la modernisation des équipements de production, la gestion de la diversité des moteurs produits, et l'intégration du nouveau moteur XC13, ont été décrits. L'analyse a mis en lumière l'importance de la flexibilité opérationnelle et de la capacité d'adaptation aux variations de la demande client. L'intérêt de cette thèse pour l'usine a été souligné, en proposant des solutions pour améliorer la réactivité et l'efficacité de la production.

Dans le chapitre 3, une revue exhaustive de la littérature sur la flexibilité des systèmes de production, les systèmes manufacturiers reconfigurables et l'Industrie 4,0 a été effectuée. En utilisant des analyses bibliométriques et des visualisations VOSviewer, les tendances et les lacunes dans la recherche ont été identifiées. Les concepts de flexibilité, robustesse, résilience et agilité ont été définis et comparés, et une classification détaillée des types de flexibilité a été proposée. Les méthodologies de mesure de la flexibilité ont également été discutées, en soulignant l'impact de l'Industrie 4,0 sur la transformation des pratiques de production. Cette revue a mis en évidence la nécessité de développer des cadres théoriques et pratiques pour guider les entreprises dans cette transition.

L'état de l'art a permis de définir les questions de recherche suivantes :

1. Quels sont les différents types de flexibilité qui caractérisent les systèmes de production modernes et comment peuvent-ils être définis de manière plus complète ? (Q1)
2. Comment peut-on classer efficacement les types de flexibilité pour mieux encadrer les décisions stratégiques et physiques dans un système de production ? (Q2)
3. Quelles méthodologies peuvent être employées pour mesurer le niveau de flexibilité de manière précise et fiable les différents types de flexibilité au sein des systèmes de production ? (Q3)
4. Comment déterminer le niveau approprié de flexibilité pour un système de production donné en fonction de ses spécificités et des incertitudes auxquelles il est confronté ? (Q4)
5. Quelle feuille de route et le plan d'investissement optimal les entreprises peuvent-elles suivre pour atteindre le niveau de flexibilité identifié comme nécessaire tout en assurant une mise en œuvre efficace et mesurable de leurs stratégies de flexibilité ? (Q5)

Dans le chapitre 4, un cadre méthodologique conceptuel pour caractériser et mesurer la flexibilité dans les systèmes de production a été élaboré, répondant ainsi aux questions de recherche sur la définition et la classification des types de flexibilité. Les types de flexibilité ont été identifiés (Q1), une classification en trois dimensions (physique, décisionnelle et d'impact) a été proposée (Q2), et les axes de mesure (portée, réponse et alternative) ont été définis. Une cartographie de la flexibilité a été développée pour visualiser les différentes facettes de la flexibilité et identifier les leviers potentiels pour son amélioration (Q3). Une méthode de mesure utilisant des indicateurs de performance clés (KPIs) a été introduite pour évaluer précisément la flexibilité des systèmes de production- (Q3). Ce cadre méthodologique sert de fondation pour les analyses et les modèles présentés dans les chapitres suivants.

Dans le chapitre 5, deux modèles d'optimisation mathématique pour évaluer et planifier la flexibilité dans les systèmes de production ont été présentés, répondant à la question de recherche sur la détermination du niveau approprié de flexibilité (Q4) et sur la planification stratégique (Q5). Le premier modèle se concentre sur la performance en flexibilité (Q3, Q4), tandis que le second vise la planification

stratégique des investissements (Q5). L'application de ces modèles a été illustrée avec des exemples concrets, démontrant comment les entreprises peuvent utiliser ces outils pour optimiser leur flexibilité de production et prendre des décisions éclairées sur les investissements technologiques.

Par la suite, les concepts et modèles développés dans les chapitres précédents ont été appliqués à une étude de cas spécifique, celle de l'usine FPT-BLY, répondant ainsi à la question sur l'évaluation pratique et la mise en œuvre des stratégies de flexibilité (Q3, Q5). Les données et paramètres de l'étude de cas ont été présentés, suivis des résultats obtenus en termes de flexibilité et de planification d'investissement (Q3, Q4, Q5). Une analyse de sensibilité a été réalisée pour évaluer l'impact des variations des paramètres sur les résultats. Ce chapitre illustre concrètement comment la méthodologie proposée peut améliorer la flexibilité et la performance opérationnelle de l'usine.

Discussion managériale :

Cette sous-section se concentre sur l'aspect managériaux de chaque méthodologie. Cet aspect se focalise sur l'opportunité qu'offre ces contributions aux managers et aux preneurs de décision.

Méthodologie 1 : Cartographie de la flexibilité

L'utilisation de la méthodologie de cartographie de la flexibilité permet aux managers industriels de visualiser et d'évaluer les différents types de flexibilité au sein du système de production de manière structurée et simple. En catégorisant les types de flexibilité et en déterminant des indicateurs pertinents pour chaque dimension (physique, décisionnelle, impact), cette méthode engage efficacement le processus d'identification des flexibilités présentes et de compréhension de leurs interactions. Par exemple, les initiatives pour améliorer la flexibilité globale peuvent être ciblées plus efficacement grâce à une meilleure compréhension de la structure de flexibilité actuelle.

Cependant, la cartographie de la flexibilité repose principalement sur des évaluations qualitatives, ce qui limite sa précision. Bien que fournissant une vue d'ensemble précieuse, cette méthode nécessite d'être complétée par des mesures quantitatives pour offrir une évaluation plus complète et fiable. Ainsi, bien qu'elle soit une excellente première étape, elle doit être suivie d'analyses plus détaillées pour maximiser son impact.

Sensibiliser les manager sur les différents types de flexibilité et leurs impacts sur l'efficacité de système de production

Méthodologie 2 : Mesure quantitative de la flexibilité (KPI)

L'intégration de la mesure quantitative de la flexibilité via les KPIs permet aux managers de quantifier objectivement la flexibilité du système de production. En s'appuyant sur des KPIs existants, cette méthodologie facilite l'évaluation opérationnelle de la flexibilité sans nécessiter la création d'indicateurs supplémentaires, ce qui est un avantage majeur pour les managers et décideurs. La précision et la simplicité de cette approche, utilisant des données historiques fiables, fournissent des mesures exactes de la flexibilité, facilitant ainsi la prise de décision.

Cependant, une des limites significatives de cette méthodologie est qu'elle n'intègre pas les aspects financiers, rendant difficile la prise de décisions d'investissement éclairées. De plus, l'absence de plan d'action concret pour améliorer la flexibilité signifie que, bien que la flexibilité actuelle puisse être mesurée avec précision, il manque des directives claires pour son amélioration. Par conséquent, cette méthode doit être complétée par des stratégies de mise en œuvre pour être pleinement efficace.

Méthodologie 3 : Optimisation mathématique de l'index de flexibilité

L'optimisation mathématique de l'index de flexibilité est une méthodologie sophistiquée qui utilise des modèles mathématiques pour maximiser la flexibilité du système de production. Cette approche

permet aux managers d'identifier et de pondérer différentes alternatives technologiques et d'évaluer leurs impacts. En déterminant les hypothèses avec un maximum de flexibilité, cette méthodologie conduit à des optimisations stratégiques majeures, ayant un impact significatif sur le business. Par exemple, elle permet d'identifier les alternatives les plus performantes et de maximiser les bénéfices tout en minimisant les investissements nécessaires.

Cependant, cette méthodologie est un peu complexe à mettre en œuvre dans le milieu industriel et nécessite des compétences spécialisées ainsi que des données détaillées, représentant un coût élevé pour l'entreprise. De plus, elle ne fournit pas directement une feuille de route ou un plan d'investissement, nécessitant des étapes supplémentaires pour planifier les actions nécessaires. Ces défis peuvent constituer des obstacles pour les entreprises ne disposant pas des ressources nécessaires pour appliquer cette méthode, malgré ses avantages potentiels.

Méthodologie 4 : Feuille de route

La méthodologie de la feuille de route est cruciale pour définir une stratégie détaillée visant à atteindre les niveaux de flexibilité nécessaires dans le système de production. Cette approche inclut la définition des objectifs de capacité de production et d'investissement par période, ainsi que l'identification des violations par rapport aux objectifs. Elle offre aux managers une feuille de route optimisée pour les investissements, guidant la planification et la mise en œuvre des actions nécessaires pour améliorer la flexibilité.

Cependant, cette méthodologie présente des défis spécifiques. Elle est fortement dépendante de l'optimisation mathématique préalable, ce qui complique son adoption si les étapes précédentes ne sont pas correctement réalisées. De plus, elle nécessite une planification détaillée et une gestion rigoureuse, rendant sa mise en œuvre complexe. Un autre aspect critique est l'identification fréquente du besoin de flexibilité au niveau des chefs d'équipe, représentant le niveau maximum de flexibilité humaine. Cela pose des défis en termes de recrutement et de formation du personnel qualifié, surtout dans des zones rurales comme FPT-BLY, où le recrutement peut être difficile. Il est crucial d'estimer les coûts et la faisabilité de former le personnel existant pour assumer ces rôles, ce qui peut nécessiter des ajustements pour aligner les solutions proposées avec les réalités locales.

Synthèse des contributions de cette thèse :

- Identification de l'intérêt de cette thèse pour FPT-BLY en identifiant les défis de l'entreprise
- Analyse bibliométrique sur la flexibilité
- Classification des articles pertinents
- Identification des lacunes dans la recherche scientifique sur la flexibilité
- Définition rapide des paradigmes de production
- Recherche bibliographique sur les types de flexibilité, leur classification et leur méthode de mesure
- Identification des liens entre la flexibilité et l'industrie 4.0
- Explication des interactions et différences entre robustesse, résilience, agilité et flexibilité
- Proposition d'un cadre méthodologique comprenant quatre méthodologies applicables à l'industrie
- Proposition de nouveaux types de flexibilité pour prendre en compte les nouveaux aspects de l'industrie

- Caractérisation de la flexibilité par la classification PDI et les axes de mesure PRA
- Proposition d'une cartographie de la flexibilité pour évaluer simplement la flexibilité dans l'industrie
- Proposition d'une méthodologie de mesure de la flexibilité par des KPIs existants
- Modélisation mathématique du problème de maximisation de la flexibilité
- Méthode de définition du niveau approprié de la flexibilité
- Modélisation mathématique du problème de planification de l'investissement pour atteindre le niveau de flexibilité approprié
- Application de l'ensemble des méthodologies proposées dans le cas réel de FPT-BLY afin d'étudier l'applicabilité et les perspectives de développement
- Instanciation des modèles mathématiques pour résolution dans le contexte de FPT-BLY
- Collecte des données de FPT-BLY pour la résolution
- Analyse de sensibilité et de robustesse des solutions obtenues
- Discussion sur l'aspect managérial des différentes propositions
- Identification des perspectives de recherche

Perspectives de recherche

Plusieurs perspectives de recherche ont été identifiées à partir des résultats obtenus dans cette thèse. Ces perspectives visent à approfondir et à étendre les contributions actuelles en abordant des aspects spécifiques et des problématiques émergentes.

- Exploration de nouveaux types de flexibilité :
 - L'identification de nouveaux types de flexibilité en réponse aux problématiques spécifiques des entreprises est une voie de recherche prometteuse. Cette exploration pourrait révéler des formes de flexibilité encore non considérées mais cruciales pour certains secteurs industriels.
- Autres classifications basées sur l'interdépendance :
 - L'utilisation de méthodes de classification avancées, telles que le clustering et l'analyse en composantes principales (PCA), pourrait permettre de découvrir des interdépendances entre différents types de flexibilité. Cela fournirait une vision plus intégrée et stratégique des systèmes de production.
- Mesure de la flexibilité individuelle et globale :
 - La mesure de la flexibilité pourrait être affinée en distinguant entre la flexibilité individuelle des composants du système et la flexibilité globale du système de production. Cela aiderait à identifier les points faibles spécifiques et à cibler les améliorations de manière plus efficace.
- Paramètres et valeurs pour rendre les objectifs mesurables :

- Il serait pertinent de développer davantage les paramètres et les valeurs pour rendre les objectifs de flexibilité plus quantifiables. Cela permettrait une meilleure évaluation de la performance des systèmes de production flexibles.
- Détermination du niveau de flexibilité selon des critères diversifiés :
 - Au-delà de l'aspect financier, il serait utile d'explorer d'autres critères pour déterminer le niveau de flexibilité, tels que les impacts environnementaux, sociaux et sociétaux. Cette perspective s'aligne avec les principes du développement durable et pourrait offrir une vision plus holistique de la flexibilité.
- Modèles basés sur l'impact des événements :
 - Il serait intéressant de développer des modèles prenant en compte l'impact des événements prédictible ou incertain sur la flexibilité. Ces modèles permettraient de prévoir et de gérer les perturbations potentielles, augmentant ainsi la résilience des systèmes de production.
- Comparaison entre modèles mathématiques et simulations :
 - Une comparaison approfondie entre les modèles d'optimisation mathématique et les simulations pratiques des systèmes de production pourrait offrir des perspectives précieuses sur leur efficacité respective. Cette comparaison permettrait de valider les modèles théoriques et d'identifier les écarts éventuels avec les résultats pratiques.
- Réajustement des modèles sur la base de l'expérience :
 - Un aspect crucial serait d'intégrer des mécanismes de réajustement automatique des modèles en fonction des expériences vécues et les décisions prises (rétroaction décisionnel). Cela impliquerait la création de systèmes d'aide à la décision capables d'auto-correction (auto-correction des paramètres, changement d'algorithme et/ou de méthode de résolution, etc.), offrant ainsi une gestion dynamique et adaptative de la flexibilité.
- Application dans le monde réel et simplification des outils :
 - L'application pratique des concepts développés dans cette thèse pourrait être simplifiée par le développement d'un outil d'aide à la décision. Ces outils faciliteraient l'utilisation des modèles de flexibilité dans des environnements industriels complexes, rendant la méthodologie accessible et utilisable par les praticiens. Le développement de cette « application » nécessiterait peut être de choisir un autre langage que GAMS pour la résolution des modèles mathématiques tel que Gurobi et Pyomo en Python. Ainsi que d'autres dans différents langages tel que le C#, C++, etc.
- Généralisation de la cartographie de la flexibilité :
 - La cartographie de la flexibilité développée pourrait être généralisée et appliquée à d'autres types de projets industriels, tels que la réduction des coûts ou l'introduction de nouveaux systèmes. Cette généralisation permettrait d'adapter la méthodologie à une variété de contextes et de besoins.
- Benchmarking et études empiriques :

- Il serait bénéfique de compléter cette recherche par des études empiriques et des benchmarks. Comparer les résultats théoriques avec des données réelles d'entreprises permettrait de valider les modèles et d'affiner les recommandations pratiques.

De plus, pour FPT-BLY, nous envisageons de mettre en place ses perspectives dans la phase d'extension de ces méthodologies dans les autres usines du groupe IVECO.

Ces perspectives ouvrent des voies de recherche qui pourraient non seulement renforcer les contributions actuelles de cette thèse, mais aussi offrir des solutions innovantes et pratiques pour améliorer la flexibilité et la résilience des systèmes de production dans un contexte industriel en constante évolution.

Publications

Articles de conférences avec actes et comité de lecture IEEE:

- Chehami, A., Baboli, A., Einabadi, B., Ebrahimi, M., & Rother, E. (2022), Determination and prioritization of flexibility types in the context of industry 4,0: a use case in automotive industry, *2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, 1529–1535.
- Anthony, C., Zakariae, M., & Armand, B. (2023), Measuring and Identifying Appropriate Levels of Flexibility: A Novel Approach and Use Case in the Automotive Industry, *2023 3rd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET)*, 1–6.
- Chehami, A., Baboli, A., Rother, E., Einabadi, B., & Ebrahimi, M. (2023), A Comprehensive Method for Measuring Flexibility at the Individual and Global Levels: A Case Study in the Automotive Industry, *2023 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, 1978–1983.

Références

- Alexopoulos, K., Papakostas, N., Mourtzis, D., Gogos, P., & Chryssolouris, G. (2007). Quantifying the flexibility of a manufacturing system by applying the transfer function. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 20(6), 538–547.
- Ali, S. A., & Seifoddini, H. (2006). Simulation intelligence and modeling for manufacturing uncertainties. *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, 1920–1928.
- Atkinson, J. (1984). Manpower strategies for flexible organisations. *Personnel Management*, 16(8), 28–31.
- Baena, F., Guarín, A., Mora, J., Sauza, J., & Retat, S. (2017). Learning factory: The path to industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 9, 73–80.
- Bartodziej, C. J. (2017). The concept Industry 4.0. In *The Concept Industry 4.0*. https://doi.org/10.1007/978-3-658-16502-4_3
- Beamon, B. M. (1999). Measuring supply chain performance. *International Journal of Operations & Production Management*, 19(3), 275–292.
- Brettel, M., Klein, M., & Friederichsen, N. (2016). The Relevance of Manufacturing Flexibility in the Context of Industrie 4.0. *Procedia CIRP*, 41, 105–110. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.047>
- Brill, PH., & Mandelbaum, M. (1987). *On Measures of Flexibility in Manufacturing Systems?*
- Browne, J., Dubois, D., Rathmill, K., Sethi, S. P., Stecke, K. E., & others. (1984). Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS Magazine*, 2(2), 114–117.
- Brozovic, D. (2018). Strategic Flexibility: A Review of the Literature. *International Journal of Management Reviews*, 20(1), 3–31. <https://doi.org/10.1111/ijmr.12111>
- Buzacott, J. A. (1982). The fundamental principles of flexibility in manufacturing systems. *Proceedings 1st International Conference on FMS Brighton, 1982*, 23–30.
- Buzacott, J. A., & Mandelbaum, M. (1985). Flexibility and productivity in manufacturing systems. *Proceedings of the Annual IIE Conference*, 404–413.
- Carter, M. F. (1986). Designing flexibility into automated manufacturing systems. *Proc. 2nd ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing Systems: OR Models and Applications, Ann Arbor, MI, 1986*, 107–118.
- Chan, A. T. L., Ngai, E. W. T., & Moon, K. K. L. (2017). The effects of strategic and manufacturing flexibilities and supply chain agility on firm performance in the fashion industry. *European Journal of Operational Research*, 259(2), 486–499. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.11.006>

- Chatterjee, A., Cohen, M. A., & Maxwell, W. L. (1987). A planning framework for flexible manufacturing systems. *WP# 87-07-04, University of Pennsylvania, Philadelphia, PA, July 1987.*
- Chatterjee, A., Cohen, M. A., Maxwell, W. L., & Miller, L. W. (1984). Manufacturing flexibility: Models and measurements. *Proceedings of the First ORSA/TIMS Special Interest Conference on FMS*, 49–64.
- Chryssolouris, G. (2013). *Manufacturing systems: theory and practice*. Springer Science & Business Media.
- Chung, C. H., & Chen, I. J. (1989). A systematic assessment of the value of flexibility for an FMS. *Proceedings of the Third ORSA/TIMS Conference on FMS, Cambridge, Massachusetts*, 27–34.
- Dashchenko, A. I. (Anatoliï I. (2006). *Reconfigurable manufacturing systems and transformable factories*. Springer.
- De Meyer, A., Nakane, J., Miller, J. G., & Ferdows, K. (1989). Flexibility: the next competitive battle the manufacturing futures survey. *Strategic Management Journal*, 10(2), 135–144.
- Diebold, J. (1952). The advent of the automatic factory. *New York*.
- Dixon, J. R. (1992). Measuring manufacturing flexibility: an empirical investigation. *European Journal of Operational Research*, 60(2), 131–143.
- Ebrahimi, M., Baboli, A., & Rother, E. (2019). The evolution of world class manufacturing toward Industry 4.0: A case study in the automotive industry. *Ifac-Papersonline*, 52(10), 188–194.
- Einabadi, B. (2023). *New decision support methods for dynamic predictive maintenance based on data science and multi-objective optimization*. INSA de Lyon.
- Fayezi, S., Zutshi, A., & O’Loughlin, A. (2014). Developing an analytical framework to assess the uncertainty and flexibility mismatches across the supply chain. *Business Process Management Journal*.
- Fine, C. H., & Freund, R. M. (1990). Optimal investment in product-flexible manufacturing capacity. *Management Science*, 36(4), 449–466.
- Gerwin, D. (1989). Manufacturing flexibility in the CAM era. *Business Horizons*, 32(1), 78–85.
- Gerwin, D. (1993). Manufacturing flexibility. A strategic perspective. *Management Science*, 39(4), 395–410. <https://doi.org/10.1287/mnsc.39.4.395>
- Gerwin, D., & Tarondeau, J.-C. (1989). International comparisons of manufacturing flexibility. *Managing International Manufacturing*, 169–185.
- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0: the industrial internet of things*. Springer.
- Goldhar, J. D., & Jelinek, M. (1985). Computer integrated flexible manufacturing: organizational, economic, and strategic implications. *Interfaces*, 15(3), 94–105.

- Gupta, Y. P., & Goyal, S. (1989). Flexibility of manufacturing systems: Concepts and measurements. In *European Journal of Operational Research* (Vol. 43).
- H. Hayes; C. Wheelwright. (1985). *Restoring Our Competitive Edge: Competing through Manufacturing*. 30(2), 305–307.
- Haller, M. (1999). *Bewertung der Flexibilität automatisierter Materialflusssysteme der variantenreichen Großserienproduktion*. Herbert Utz Verlag.
- Herrman, H., Stewart, D. E., Diaz-Granados, N., Berger, E. L., Jackson, B., & Yuen, T. (2011). What is resilience? *The Canadian Journal of Psychiatry*, 56(5), 258–265.
- Jaikumar, R. (1984). *Flexible manufacturing systems: a managerial perspective*. Division of Research, Graduate School of Business Administration, Harvard~....
- Jain, A., Jain, P. K., Chan, F. T. S., & Singh, S. (2013). A review on manufacturing flexibility. *International Journal of Production Research*, 51(19), 5946–5970.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2013.824627>
- Kagermann, H., Wahlster, W., Helbig, J., & others. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. *Final Report of the Industrie*, 4(0), 82.
- Kegg, R. L. (1984). Flexible manufacturing trends and data base requirements. *Proceedings of the 5th International Conference on Production Engineering*.
- Koren, Y., Gu, X., & Guo, W. (2018). Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends. In *Frontiers of Mechanical Engineering* (Vol. 13, Issue 2, pp. 121–136). Higher Education Press. <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0483-0>
- Koste, L. L., & Malhotra, M. K. (1999). Conceptual note A theoretical framework for analyzing the dimensions of manufacturing flexibility. In *Journal of Operations Management* (Vol. 18). www.elsevier.com/locate/jom
- Koste, L. L., Malhotra, M. K., & Sharma, S. (2004). Measuring dimensions of manufacturing flexibility. *Journal of Operations Management*, 22(2), 171–196.
<https://doi.org/10.1016/j.jom.2004.01.001>
- Kusiak, A. (1985). The part families problem in flexible manufacturing systems. *Annals of Operations Research*, 3, 277–300.
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. de F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0-a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3609–3629.
- Lim, C. H., & Lee, P. J. (1994). More flexible exponentiation with precomputation. *Advances in Cryptology—CRYPTO'94: 14th Annual International Cryptology Conference Santa Barbara, California, USA August 21–25, 1994 Proceedings 14*, 95–107.
- Mehrabi, M. G., Ulsoy, A. G., & Koren, Y. (2000). Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11, 403–419.

- Melcher, A. J., Khouja, M., & Booth, D. E. (2002). Toward a production classification system. *Business Process Management Journal*, 8(1), 53–79.
- Mondal, S. C., Ray, P. K., & Maiti, J. (2014). Modelling robustness for manufacturing processes: a critical review. *International Journal of Production Research*, 52(2), 521–538.
- Monostori, L. (2014). Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. *Procedia Cirp*, 17, 9–13.
- Mostert, C. (2011). *Analysis of the understanding of flexible manufacturing in the automotive component industry and selection of best implementation strategy*.
- Narasimhan, R., & Jayaram, J. (1998). Causal linkages in supply chain management: an exploratory study of North American manufacturing firms. *Decision Sciences*, 29(3), 579–605.
- Peruzzini, M., Grandi, F., & Pellicciari, M. (2017). Benchmarking of tools for user experience analysis in industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 806–813.
- Posada, J., Toro, C., Barandiaran, I., Oyarzun, D., Stricker, D., De Amicis, R., Pinto, E. B., Eisert, P., Döllner, J., & Vallarino, I. (2015). Visual computing as a key enabling technology for industrie 4.0 and industrial internet. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 35(2), 26–40.
- Ranta, J. (1989). *The Impact of Electronics and Information Technology on the Future Trends and Applications of CIM Technologies*. 260, 231–260.
- Ranta, J., & Alabyan, A. K. (1988). *Interactive analysis of FMS productivity and flexibility*.
- Rattner, L., Orne, D., & Wallace, W. A. (1988). What can we learn from the past?: A comparison of historical manufacturing systems with computer integrated manufacturing. *Technical Report*.
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega (United Kingdom)*, 53, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>
- Rogalski, S. (2011). *Flexibility Measurement in Production Systems: Handling Uncertainties in Industrial Production*.
- Ropohl, G. (1971). Flexible Fertigungssysteme: zur Automatisierung der Serienfertigung. (*No Title*).
- Sabuncuoglu, I., & Goren, S. (2009). Hedging production schedules against uncertainty in manufacturing environment with a review of robustness and stability research. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 22(2), 138–157.
- Sánchez, A. M., & Pérez, M. P. (2005). Supply chain flexibility and firm performance: a conceptual model and empirical study in the automotive industry. *International Journal of Operations & Production Management*.

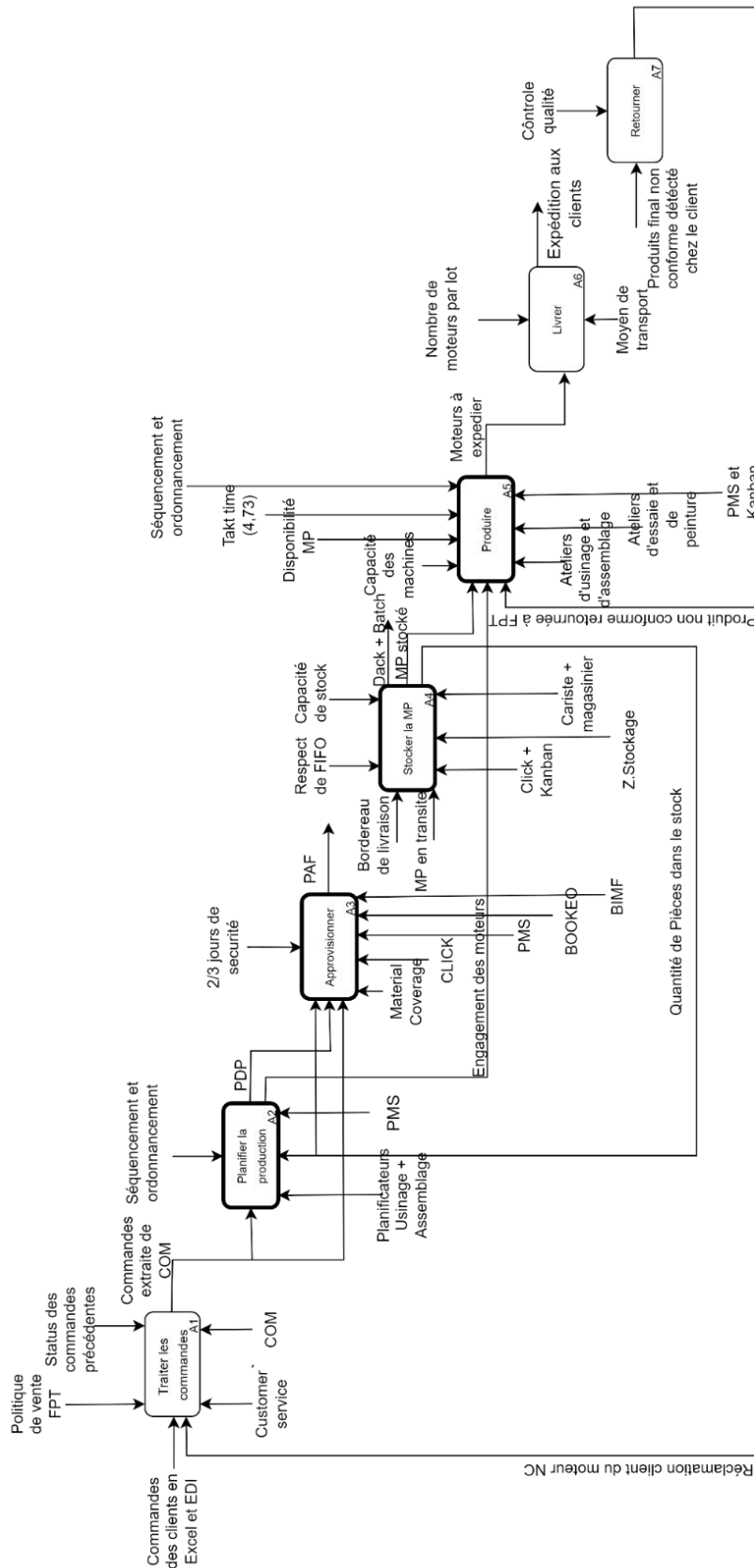
- Sanders, A., Elangeswaran, C., & Wulfsberg, J. P. (2016). Industry 4.0 implies lean manufacturing: Research activities in industry 4.0 function as enablers for lean manufacturing. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 9(3), 811–833.
- Sethi, A. K., & Sethi, S. P. (1990). Flexibility in manufacturing: a survey. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2, 289–328.
- Shi, D., & Daniels, R. L. (2003). A survey of manufacturing flexibility: Implications for e-business flexibility. *IBM Systems Journal*, 42(3), 414–427.
- Skinner, W. (1969). *Manufacturing-missing link in corporate strategy*.
- Slack, N. (1988). Manufacturing systems flexibility-an assessment procedure. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 1(1), 25–31.
- Slack, N. (2005). The flexibility of manufacturing systems. *International Journal of Operations & Production Management*, 25(12), 1190–1200.
- Son, Y. K., & Park, C. S. (1987). Economic measure of productivity, quality and flexibility in advanced manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems*, 6(3), 193–207.
- Sri, R. S., & Suresh, M. (2019). Manufacturing flexibility assessment using multi-grade fuzzy: a case of garment industry. *International Conference on Advances in Materials Research*, 763–772.
- Stecke, K. E., & Suri, R. (1986). *Proceedings of the Second ORSA/TIMS Conference on Flexible Manufacturing Systems--Operations Research Models and Applications, Held at the University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA, August 12-15, 1986 (Vol. 2)*. Elsevier Science Limited.
- Suzaki, K. (1987). *New manufacturing challenge: Techniques for continuous improvement*. Simon and Schuster.
- Swafford, P. M., Ghosh, S., & Murthy, N. (2006). The antecedents of supply chain agility of a firm: scale development and model testing. *Journal of Operations Management*, 24(2), 170–188.
- Taylor, S., & Spicer, A. (2007). Time for space: A narrative review of research on organizational spaces. *International Journal of Management Reviews*, 9(4), 325–346.
- Thun, J.-H., & Hoenig, D. (2011). An empirical analysis of supply chain risk management in the German automotive industry. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 242–249.
- Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. A. (2010). *Facilities planning*. John Wiley & Sons.
- Tupa, J., Simota, J., & Steiner, F. (2017). Aspects of risk management implementation for Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 1223–1230.
- Upton, D. M. (1994). The management of manufacturing flexibility. *California Management Review*, 36(2), 72–89.

- Vafaei, N., & Ribeiro, R. A. (2016). *Normalization Techniques for Multi-Criteria Decision Making : Analytical Hierarchy Process Case Study Normalization Techniques for Multi-Criteria Decision Making : Analytical Hierarchy Process Case Study*. April. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31165-4>
- Van Eck, N., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538.
- Vilko, J., Ritala, P., & Edelmann, J. (2014). On uncertainty in supply chain risk management. *The International Journal of Logistics Management*.
- Wan, J., Cai, H., & Zhou, K. (2015). Industrie 4.0: enabling technologies. *Proceedings of 2015 International Conference on Intelligent Computing and Internet of Things*, 135–140.
- Warnecke, H. J., & Steinhilper, R. (1982). Flexible manufacturing systems, EDP-support planning: application examples. *Proceedings of the First International Conference on Flexible Manufacturing Systems*, 345–356.
- Weckenborg, C., Schumacher, P., Thies, C., & Spengler, T. S. (2024). Flexibility in manufacturing system design: A review of recent approaches from Operations Research. In *European Journal of Operational Research* (Vol. 315, Issue 2, pp. 413–441). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.08.050>
- Wheelwright, S. C., & Clarke, D. G. (1976). Corporate Forecasting: Promise and Reality. *Harvard Business Review*, 54(6), 40–64.
- Yamashina, H., Okamura, K., & Matsumoto, K. (1986). Flexible manufacturing systems in Japan—an overview. *Proceedings of the 5th International Conference on Flexible Manufacturing Systems: 3–5 November 1986 Stratford-upon-Avon, UK*, 405–416.
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications* (Vol. 6). Sage Thousand Oaks, CA.
- ZELENOVIĆ, D. M. (1982). Flexibility—a condition for effective production systems. *The International Journal of Production Research*, 20(3), 319–337.
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. *Engineering*, 3(5), 616–630.
- Zuehlke, D. (2010). SmartFactory—Towards a factory-of-things. *Annual Reviews in Control*, 34(1), 129–138.

Annexes

A. IDEF0 global de FPT-BLY détaillée

Cette IDEF0 représente le détail du processus principal de FPT-BLY.



B. Cartographie de la flexibilité FPT-BLY

Cette annexe détail les dimensions physiques de la cartographie qui n'ont pas été détaillée dans le corps du manuscrit. A savoir, la dimension physique Atelier, Usine, Chaîne

Dimension physique : Atelier							
Dimension décisionnel	Type de flexibilité	Axe de mesure	Indicateur	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Opérationnel	Manutention	Portée	Capacité de manutention de l'atelier (tonnes déplacées par jour)	<= 50	51 à 100	101 à 150	> 150
Opérationnel	Manutention	Réactivité	Temps moyen de manutention par opération (minutes)	> 20 min	15 à 20 min	10 à 15 min	< 10 min
Opérationnel	Manutention	Alternative	Nombre de types de charges manipulées	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15
Opérationnel	Programme	Portée	Nombre de programmes gérés simultanément	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Opérationnel	Programme	Réactivité	Temps de changement de programme (minutes)	> 60 min	45 à 60 min	30 à 45 min	< 30 min
Opérationnel	Programme	Alternative	Nombre de programmes alternatifs disponibles	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Opérationnel	Informatique	Portée	Nombre de systèmes interconnectés dans l'atelier	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Opérationnel	Informatique	Réactivité	Temps d'intégration de nouvelles fonctionnalités (jours)	> 10 jours	7 à 10 jours	4 à 7 jours	< 4 jours
Opérationnel	Informatique	Alternative	Nombre de formats de données supportés	<= 4	5 à 7	8 à 10	> 10
Opérationnel	Machine	Portée	Nombre de machines opérationnelles simultanément	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15
Opérationnel	Machine	Réactivité	Temps moyen de mise en marche des machines (minutes)	> 30 min	20 à 30 min	10 à 20 min	< 10 min
Opérationnel	Machine	Alternative	Nombre de types d'opérations supportées par les machines	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Opérationnel	Humaine	Portée	Nombre de tâches différentes exécutées par les opérateurs	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15
Opérationnel	Humaine	Réactivité	Temps de formation pour une nouvelle tâche (heures)	> 20h	10 à 20h	5 à 10h	< 5h
Opérationnel	Humaine	Alternative	Nombre de tâches maîtrisées par les opérateurs	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15
Opérationnel	Stockage	Portée	Capacité de stockage de l'atelier (emplacements de palettes)	<= 100	101 à 200	201 à 300	> 300
Opérationnel	Stockage	Réactivité	Temps moyen de mise en stock (minutes)	> 60 min	45 à 60 min	30 à 45 min	< 30 min
Opérationnel	Stockage	Alternative	Nombre de configurations de stockage possibles	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Opérationnel	Acheminement	Portée	Efficacité des itinéraires de transport interne (%)	< 80%	80 à 90%	91 à 95%	> 95%
Opérationnel	Acheminement	Réactivité	Temps de réacheminement des pièces (minutes)	> 60 min	45 à 60 min	30 à 45 min	< 30 min
Opérationnel	Acheminement	Alternative	Nombre de routes alternatives de transport interne	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Tactique	Opération	Portée	Nombre d'opérations différentes gérées	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15

Tactique	Opération	Réactivité	Temps de basculement entre opérations (heures)	> 8h	4 à 8h	2 à 4h	< 2h
Tactique	Opération	Alternative	Nombre d'opérations alternatives	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Tactique	Processus	Portée	Nombre de familles de produits traitées	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Tactique	Processus	Réactivité	Temps de changement de famille de produits (minutes)	> 60 min	30 à 60 min	15 à 30 min	< 15 min
Tactique	Processus	Alternative	Nombre de processus alternatifs disponibles	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Tactique	Programme	Portée	Nombre de programmes gérés simultanément	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Tactique	Programme	Réactivité	Temps de changement de programme (minutes)	> 60 min	45 à 60 min	30 à 45 min	< 30 min
Tactique	Programme	Alternative	Nombre de programmes alternatifs disponibles	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Tactique	Volume	Portée	Taux de production par heure (unités)	<= 100	101 à 200	201 à 300	> 300
Tactique	Volume	Réactivité	Temps d'ajustement du volume de production (minutes)	> 60 min	30 à 60 min	15 à 30 min	< 15 min
Tactique	Volume	Alternative	Nombre de niveaux de production réalisables	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Tactique	Production	Portée	Nombre de références produits fabriquées	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15
Tactique	Production	Réactivité	Temps de mise en production d'une nouvelle référence (jours)	> 7 jours	4 à 7 jours	2 à 3 jours	< 2 jours
Tactique	Production	Alternative	Nombre de configurations de production possibles	<= 3	4 à 5	6 à 7	> 7
Tactique	Stockage	Portée	Capacité de stockage de l'atelier (emplacements de palettes)	<= 100	101 à 200	201 à 300	> 300
Tactique	Stockage	Réactivité	Temps moyen de mise en stock (minutes)	> 60 min	45 à 60 min	30 à 45 min	< 30 min
Tactique	Stockage	Alternative	Nombre de configurations de stockage possibles	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Tactique	Informatique	Portée	Taux de partage des données entre systèmes (%)	< 70%	70 à 80%	81 à 90%	> 90%
Tactique	Informatique	Réactivité	Temps moyen de développement d'outils d'aide à la décision (jours)	> 14 jours	10 à 14 jours	6 à 10 jours	< 6 jours
Tactique	Informatique	Alternative	Nombre de systèmes informatiques intégrés	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Tactique	Sanitaire	Portée	Nombre de protocoles sanitaires respectés	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Tactique	Sanitaire	Réactivité	Temps de mise en conformité (minutes)	> 60 min	45 à 60 min	30 à 45 min	< 30 min
Tactique	Sanitaire	Alternative	Nombre de protocoles sanitaires disponibles	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Stratégique	Produit	Portée	Nombre de nouveaux produits introduits avec succès par an	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Stratégique	Produit	Réactivité	Temps de mise en production d'un nouveau produit (mois)	> 6 mois	4 à 6 mois	2 à 4 mois	< 2 mois
Stratégique	Produit	Alternative	Nombre de variantes de produits disponibles	<= 3	4 à 5	6 à 7	> 7
Stratégique	Stockage	Portée	Capacité totale de stockage (emplacements de palettes)	<= 200	201 à 400	401 à 600	> 600
Stratégique	Stockage	Réactivité	Temps moyen de mise en stock (minutes)	> 60 min	45 à 60 min	30 à 45 min	< 30 min
Stratégique	Stockage	Alternative	Nombre de configurations de stockage possibles	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9

Stratégique	Manutention	Portée	Capacité de manutention (tonnes déplacées par jour)	<= 50	51 à 100	101 à 150	> 150
Stratégique	Manutention	Réactivité	Temps moyen de manutention par opération (minutes)	> 20 min	15 à 20 min	10 à 15 min	< 10 min
Stratégique	Manutention	Alternative	Nombre de types de charges manipulées	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15

Dimension physique : Usine							
Dimension décisionnel	Type de flexibilité	Axe de mesure	Indicateur	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Opérationnel	Manutention	Portée	Capacité de manutention de l'usine (tonnes déplacées par jour)	<= 100	101 à 200	201 à 300	> 300
Opérationnel	Manutention	Réactivité	Temps moyen de manutention par opération (minutes)	> 30 min	20 à 30 min	10 à 20 min	< 10 min
Opérationnel	Manutention	Alternative	Nombre de types de charges manipulées	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15
Opérationnel	Programme	Portée	Nombre de programmes gérés simultanément	<= 4	5 à 8	9 à 12	> 12
Opérationnel	Programme	Réactivité	Temps de changement de programme (minutes)	> 60 min	45 à 60 min	30 à 45 min	< 30 min
Opérationnel	Programme	Alternative	Nombre de programmes alternatifs disponibles	<= 4	5 à 8	9 à 12	> 12
Opérationnel	Machine	Portée	Nombre de machines opérationnelles simultanément	<= 10	11 à 20	21 à 30	> 30
Opérationnel	Machine	Réactivité	Temps moyen de mise en marche des machines (minutes)	> 30 min	20 à 30 min	10 à 20 min	< 10 min
Opérationnel	Machine	Alternative	Nombre de types d'opérations supportées par les machines	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15
Opérationnel	Informatique	Portée	Nombre de systèmes interconnectés dans l'usine	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15
Opérationnel	Informatique	Réactivité	Temps d'intégration de nouvelles fonctionnalités (jours)	> 10 jours	7 à 10 jours	4 à 7 jours	< 4 jours
Opérationnel	Informatique	Alternative	Nombre de formats de données supportés	<= 4	5 à 7	8 à 10	> 10
Opérationnel	Fournisseur	Portée	Nombre de fournisseurs actifs	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15
Opérationnel	Fournisseur	Réactivité	Temps moyen de réponse des fournisseurs (jours)	> 10 jours	5 à 10 jours	3 à 5 jours	< 3 jours
Opérationnel	Fournisseur	Alternative	Nombre de fournisseurs alternatifs disponibles	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Opérationnel	Volume	Portée	Taux de production par heure (unités)	<= 200	201 à 400	401 à 600	> 600
Opérationnel	Volume	Réactivité	Temps d'ajustement du volume de production (minutes)	> 60 min	30 à 60 min	15 à 30 min	< 15 min
Opérationnel	Volume	Alternative	Nombre de niveaux de production réalisables	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Opérationnel	Acheminement	Portée	Efficacité des itinéraires de transport interne (%)	< 80%	80 à 90%	91 à 95%	> 95%
Opérationnel	Acheminement	Réactivité	Temps de réacheminement des pièces (minutes)	> 60 min	45 à 60 min	30 à 45 min	< 30 min
Opérationnel	Acheminement	Alternative	Nombre de routes alternatives de transport interne	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Tactique	Processus	Portée	Nombre de familles de produits traitées	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Tactique	Processus	Réactivité	Temps de changement de famille de produits (minutes)	> 60 min	30 à 60 min	15 à 30 min	< 15 min
Tactique	Processus	Alternative	Nombre de processus alternatifs disponibles	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6

Tactique	Volume	Portée	Taux de production par heure (unités)	<= 200	201 à 400	401 à 600	> 600
Tactique	Volume	Réactivité	Temps d'ajustement du volume de production (minutes)	> 60 min	30 à 60 min	15 à 30 min	< 15 min
Tactique	Volume	Alternative	Nombre de niveaux de production réalisables	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Tactique	Production	Portée	Nombre de références produits fabriquées	<= 10	11 à 20	21 à 30	> 30
Tactique	Production	Réactivité	Temps de mise en production d'une nouvelle référence (jours)	> 7 jours	4 à 7 jours	2 à 3 jours	< 2 jours
Tactique	Production	Alternative	Nombre de configurations de production possibles	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Tactique	Stockage	Portée	Capacité de stockage de l'usine (emplacements de palettes)	<= 500	501 à 1000	1001 à 1500	> 1500
Tactique	Stockage	Réactivité	Temps moyen de mise en stock (minutes)	> 60 min	45 à 60 min	30 à 45 min	< 30 min
Tactique	Stockage	Alternative	Nombre de configurations de stockage possibles	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Tactique	Fournisseur	Portée	Nombre de fournisseurs actifs	<= 10	11 à 20	21 à 30	> 30
Tactique	Fournisseur	Réactivité	Temps moyen de réponse des fournisseurs (jours)	> 10 jours	5 à 10 jours	3 à 5 jours	< 3 jours
Tactique	Fournisseur	Alternative	Nombre de fournisseurs alternatifs disponibles	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Stratégique	Produit	Portée	Nombre de nouveaux produits introduits avec succès par an	<= 4	5 à 8	9 à 12	> 12
Stratégique	Produit	Réactivité	Temps de mise en production d'un nouveau produit (mois)	> 6 mois	4 à 6 mois	2 à 4 mois	< 2 mois
Stratégique	Produit	Alternative	Nombre de variantes de produits disponibles	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15
Stratégique	Fournisseur	Portée	Nombre de fournisseurs stratégiques	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15
Stratégique	Fournisseur	Réactivité	Temps moyen de réponse des fournisseurs stratégiques (jours)	> 15 jours	10 à 15 jours	5 à 10 jours	< 5 jours
Stratégique	Fournisseur	Alternative	Nombre de fournisseurs stratégiques alternatifs	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Stratégique	Client	Portée	Nombre de clients stratégiques	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15
Stratégique	Client	Réactivité	Temps de réponse aux demandes des clients stratégiques (jours)	> 10 jours	5 à 10 jours	2 à 5 jours	< 2 jours
Stratégique	Client	Alternative	Nombre d'options de personnalisation disponibles pour les clients	<= 3	4 à 6	7 à 10	> 10
Stratégique	Energie	Portée	Efficacité énergétique (% d'énergie renouvelable utilisée)	< 20%	20 à 40%	41 à 60%	> 60%
Stratégique	Energie	Réactivité	Temps de transition énergétique (mois)	> 12 mois	6 à 12 mois	3 à 6 mois	< 3 mois
Stratégique	Energie	Alternative	Nombre de sources d'énergie utilisées	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Stratégique	Législation	Portée	Conformité légale (%)	< 70%	70 à 80%	81 à 90%	> 90%
Stratégique	Législation	Réactivité	Temps d'adaptation aux nouvelles réglementations (mois)	> 6 mois	4 à 6 mois	2 à 4 mois	< 2 mois
Stratégique	Législation	Alternative	Nombre de réglementations couvertes	<= 2	3 à 5	6 à 8	> 8
Stratégique	Administratif	Portée	Efficacité des processus administratifs (% de tâches administratives complétées à temps)	< 70%	70 à 80%	81 à 90%	> 90%

Stratégique	Administratif	Réactivité	Temps de traitement des tâches administratives (jours)	> 7 jours	4 à 7 jours	2 à 3 jours	< 2 jours
Stratégique	Administratif	Alternative	Nombre de processus administratifs alternatifs	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Stratégique	Sanitaire	Portée	Nombre de protocoles sanitaires respectés	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Stratégique	Sanitaire	Réactivité	Temps de mise en conformité avec un nouveau protocole sanitaire (jours)	> 7 jours	4 à 7 jours	2 à 3 jours	< 2 jours
Stratégique	Sanitaire	Alternative	Nombre de protocoles sanitaires disponibles	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Stratégique	Informatique	Portée	Fiabilité des systèmes IT (%)	< 90%	90 à 95%	95 à 99%	> 99%
Stratégique	Informatique	Réactivité	Temps d'intégration IT (jours)	> 14 jours	10 à 14 jours	6 à 10 jours	< 6 jours
Stratégique	Informatique	Alternative	Nombre de systèmes IT intégrés	<= 3	4 à 6	7 à 10	> 10

Dimension physique : Chaîne d'approvisionnement

Dimension décisionnel	Type de flexibilité	Axe de mesure	Indicateur	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4
Stratégique	Marché	Portée	Nombre de marchés desservis	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Stratégique	Marché	Réactivité	Temps d'adaptation aux nouveaux marchés (mois)	> 12 mois	6 à 12 mois	3 à 6 mois	< 3 mois
Stratégique	Marché	Alternative	Nombre de segments de marché alternatifs	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Stratégique	Législation	Portée	Taux de conformité légale (%)	< 70%	70 à 80%	81 à 90%	> 90%
Stratégique	Législation	Réactivité	Temps d'adaptation aux nouvelles réglementations (mois)	> 12 mois	6 à 12 mois	3 à 6 mois	< 3 mois
Stratégique	Législation	Alternative	Nombre de réglementations couvertes	<= 2	3 à 5	6 à 8	> 8
Stratégique	Produit	Portée	Nombre de nouveaux produits introduits avec succès par an	<= 4	5 à 8	9 à 12	> 12
Stratégique	Produit	Réactivité	Temps de mise en production d'un nouveau produit (mois)	> 12 mois	6 à 12 mois	3 à 6 mois	< 3 mois
Stratégique	Produit	Alternative	Nombre de variantes de produits disponibles	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15
Stratégique	Fournisseur	Portée	Nombre de fournisseurs stratégiques	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15
Stratégique	Fournisseur	Réactivité	Temps moyen de réponse des fournisseurs stratégiques (jours)	> 15 jours	10 à 15 jours	5 à 10 jours	< 5 jours
Stratégique	Fournisseur	Alternative	Nombre de fournisseurs stratégiques alternatifs	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Stratégique	Client	Portée	Nombre de clients stratégiques	<= 5	6 à 10	11 à 15	> 15
Stratégique	Client	Réactivité	Temps de réponse aux demandes des clients stratégiques (jours)	> 10 jours	5 à 10 jours	2 à 5 jours	< 2 jours
Stratégique	Client	Alternative	Nombre d'options de personnalisation disponibles pour les clients	<= 3	4 à 6	7 à 10	> 10
Stratégique	Stockage	Portée	Capacité totale de stockage (emplacements de palettes)	<= 500	501 à 1000	1001 à 1500	> 1500
Stratégique	Stockage	Réactivité	Temps moyen de mise en stock (minutes)	> 60 min	45 à 60 min	30 à 45 min	< 30 min

Stratégique	Stockage	Alternative	Nombre de configurations de stockage possibles	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Stratégique	Informatique	Portée	Fiabilité des systèmes IT (%)	< 90%	90 à 95%	95 à 99%	> 99%
Stratégique	Informatique	Réactivité	Temps d'intégration IT (jours)	> 7 jours	4 à 7 jours	2 à 3 jours	< 2 jours
Stratégique	Informatique	Alternative	Nombre de systèmes IT intégrés	<= 3	4 à 6	7 à 10	> 10
Stratégique	Energie	Portée	Efficacité énergétique (% d'énergie renouvelable utilisée)	< 20%	20 à 40%	41 à 60%	> 60%
Stratégique	Energie	Réactivité	Temps de transition énergétique (mois)	> 12 mois	6 à 12 mois	3 à 6 mois	< 3 mois
Stratégique	Energie	Alternative	Nombre de sources d'énergie utilisées	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Stratégique	Administratif	Portée	Efficacité des processus administratifs (% de tâches administratives complétées à temps)	< 70%	70 à 80%	81 à 90%	> 90%
Stratégique	Administratif	Réactivité	Temps de traitement des tâches administratives (jours)	> 7 jours	4 à 7 jours	2 à 3 jours	< 2 jours
Stratégique	Administratif	Alternative	Nombre de processus administratifs alternatifs	<= 2	3 à 4	5 à 6	> 6
Stratégique	Sanitaire	Portée	Nombre de protocoles sanitaires respectés	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9
Stratégique	Sanitaire	Réactivité	Temps de mise en conformité avec un nouveau protocole sanitaire (jours)	> 7 jours	4 à 7 jours	2 à 3 jours	< 2 jours
Stratégique	Sanitaire	Alternative	Nombre de protocoles sanitaires disponibles	<= 3	4 à 6	7 à 9	> 9

C. Formulations linéaires correspondantes pour les états $|D_i| = 2$ and $|D_i| = 3$

Lemme 1, Où $|D_i| = 2$, par exemple $D_i = \{i', i''\}$, donc Eq, (4) est réécrit comme suit:

$$z_i = \left(\sum_{j \in J_i} \sum_{j' \in J_{i'}} S_{i'j',ij} x_{i'j'} x_{ij} \right) \times \left(\sum_{j \in J_i} \sum_{j'' \in J_{i''}} S_{i''j'',ij} x_{i''j''} x_{ij} \right)$$

Nous pouvons introduire la variable auxiliaire

$$x''_{i'j',i''j'',ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } x_{ij} = 1 \text{ et } x_{i'j'} = 1 \text{ et } x_{i''j''} = 1 \\ 0 & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ensuite, l'équation (4) peut être reformulé comme suit :

$$z_i = \sum_{j \in J_i} \sum_{j' \in J_{i'}} \sum_{j'' \in J_{i''}} S_{i'j',ij} S_{i''j'',ij} x''_{i'j',i''j'',ij} \quad (14)$$

De plus, ces deux contraintes suivantes doivent être ajoutées pour considérer les relations entre $x''_{i'j',i''j'',ij}$, x_{ij} , $x_{i'j'}$ et $x_{i''j''}$,

$$x''_{i'j',i''j'',ij} \geq x_{ij} + x_{i'j'} + x_{i''j''} - 2 \quad \forall j \in J_i, j' \in J_{i'}, j'' \in J_{i''} \quad (15)$$

$$3 \times x''_{i'j',i''j'',ij} \leq x_{ij} + x_{i'j'} + x_{i''j''} \quad \forall j \in J_i, j' \in J_{i'}, j'' \in J_{i''} \quad (16)$$

Lemme 3, Où $|D_i| = 3$, par exemple $D_i = \{i^1, i^2, i^3\}$, donc Eq, (4) est réécrit comme suit:

$$z_i = \left(\sum_{j \in J_i} \sum_{j^1 \in J_{i^1}} S_{i^1j^1,ij} x_{i^1j^1} x_{ij} \right) \times \left(\sum_{j \in J_i} \sum_{j^2 \in J_{i^2}} S_{i^2j^2,ij} x_{i^2j^2} x_{ij} \right) \times \left(\sum_{j \in J_i} \sum_{j^3 \in J_{i^3}} S_{i^3j^3,ij} x_{i^3j^3} x_{ij} \right)$$

Nous pouvons introduire la variable $x'_{i^1j^1, i^2j^2, i^3j^3, ij}$ où:

$$x'_{i^1j^1, i^2j^2, i^3j^3, ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } x_{ij} = 1 \text{ et } x_{i^1j^1} = 1 \text{ et } x_{i^2j^2} = 1 \text{ et } x_{i^3j^3} = 1 \\ 0 & \text{Autrement} \end{cases}$$

Ensuite, l'équation (4) peut être reformulé comme suit:

$$z_i = \sum_{j \in J_i} \sum_{j^1 \in J_{i^1}} \sum_{j^2 \in J_{i^2}} \sum_{j^3 \in J_{i^3}} S_{i^1j^1,ij} S_{i^2j^2,ij} S_{i^3j^3,ij} x'_{i^1j^1, i^2j^2, i^3j^3, ij} \quad (**)$$

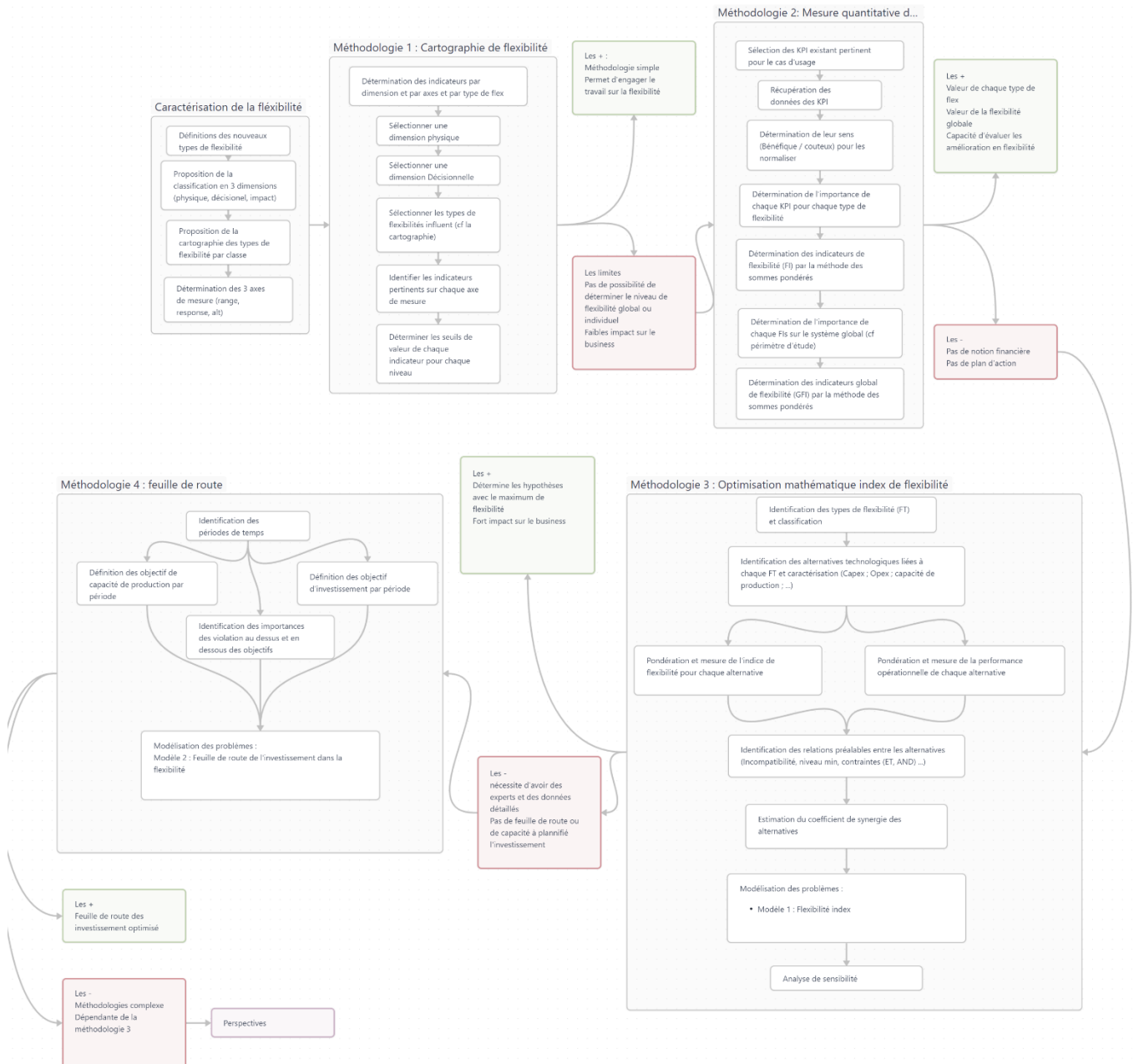
De plus, ces deux contraintes suivantes doivent être ajoutées pour considérer les relations entre $x'_{i^1j^1, i^2j^2, i^3j^3, ij}$, x_{ij} , $x_{i^1j^1}$, $x_{i^2j^2}$ et $x_{i^3j^3}$,

$$x'_{i^1j^1, i^2j^2, i^3j^3, ij} \geq x_{ij} + x_{i^1j^1} + x_{i^2j^2} + x_{i^3j^3} - 3 \quad \forall j \in J_i, j^1 \in J_{i^1}, j^2 \in J_{i^2}, j^3 \in J_{i^3} \quad (**)$$

$$4 \times x'_{i^1j^1, i^2j^2, i^3j^3, ij} \leq x_{ij} + x_{i^1j^1} + x_{i^2j^2} + x_{i^3j^3} \quad \forall j \in J_i, j^1 \in J_{i^1}, j^2 \in J_{i^2}, j^3 \in J_{i^3} \quad (**)$$

D. Détails des méthodologies et leurs liens

Ce schéma présente chacune des contributions. Les blocs verts présentent les points positifs de chacune des méthodologies. Les blocs rouges présentent les points à améliorer qui deviennent un des objectifs de la méthodologies suivantes jusqu'au perspectives.



FOLIO ADMINISTRATIF

THESE DE L'INSA LYON, MEMBRE DE L'UNIVERSITE DE LYON

NOM : CHEHAMI

DATE de SOUTENANCE : 08/10/2024

Prénoms : Anthony Achour

TITRE : Méthode d'aide au déploiement du système cyber-physique flexible dans le contexte de l'industrie 4.0

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2024ISAL0081

Ecole doctorale : INFOMATHS

Spécialité : Informatique et applications

RESUME :

Cette thèse s'inscrit dans un contexte industriel en perpétuelle évolution, caractérisé par l'émergence de l'Industrie 4.0. Elle prend pour cadre l'usine FPT de Bourbon-Lancy (FPT-BLY), spécialisée dans la production de moteurs lourds pour véhicules. Face au défi d'intégrer le nouveau moteur XC13 dans des lignes de production existantes tout en maintenant la fabrication de produits actuels. Ce cas d'étude illustre l'importance de la flexibilité et de la reconfigurabilité industrielles pour maintenir la compétitivité.

L'objectif principal de cette recherche est de développer une méthode optimale pour implémenter des systèmes de production flexibles et reconfigurables, en réponse aux défis de l'Industrie 4.0. En effet, cette révolution industrielle apporte de nouvelles méthodologies rendues possibles par les technologies avancées. La thèse se concentre sur les piliers 4,0 concernant la capacité d'auto-ajustement et d'auto-configuration du système, qui requièrent une flexibilité importante pour être efficaces et opérationnelles.

Les contributions de cette thèse s'articulent autour de l'identification, la mesure et l'optimisation de la flexibilité dans les systèmes de production. Nous avons identifié et proposé des méthodes originales de mesure individuelles pour évaluer les différents types de flexibilité et a également développé une méthode pour mesurer l'interdépendance entre ces types de flexibilité. L'objectif est d'obtenir une valeur agrégée des différentes flexibilités, afin de faciliter la prescription d'une décision optimale en cas de reconfiguration du système. Enfin, nous avons développé un modèle d'optimisation mathématique permettant d'identifier la meilleure solution d'investissement afin d'atteindre le niveau de flexibilité approprié, et de ce fait, déterminer la feuille de route de déploiement de la flexibilité. Nous avons dû explorer une grande quantité de données et d'informations de l'entreprise pour la partie expérimentation et validation de ces modèles proposés, Enfin, l'ensemble de ces propositions ont été appliqué à l'usine FPT-BLY, dans le cadre de l'intégration du nouveau moteur XC13.

MOTS-CLÉS :

Flexibilité, Système manufacturier flexible, Optimisation de la flexibilité, Système cyber-physique, Industrie 4.0

Laboratoire (s) de recherche :

Laboratoire d'InfoRmatique en Image et Systèmes d'information (LIRIS)

Directeur de thèse :

Armand BABOLI

Président de jury :

Zineb SIMEU-ABAZI

Composition du jury :

Yves SALLEZ	Professeur des Universités, INSA des Hauts de France,	Rapporteur
Julien LE DUIGOU	Professeur des Universités, UTC, Compiègne	Rapporteur
Zineb SIMEU-ABAZI	Professeur des Universités – INP Grenoble, G-SCOP	Présidente du jury
Ali SIADAT	Professeur des Universités - Arts et Métiers Metz- LCFC	Examineur
Marian SCUTURICI	Professeur des Universités - INSA de Lyon - LIRIS	Examineur
Eva ROTHER	Directrice industriel-Comeca Group-Chatenoy le Royal	Examinatrice