



HAL
open science

Identification et évaluation des temps non productifs par la simulation de systèmes de production pour améliorer la productivité et les conditions de travail

Ismail Taleb

► To cite this version:

Ismail Taleb. Identification et évaluation des temps non productifs par la simulation de systèmes de production pour améliorer la productivité et les conditions de travail. Génie des procédés. HESAM Université, 2022. Français. NNT : 2022HESAE012 . tel-03675217

HAL Id: tel-03675217

<https://pastel.hal.science/tel-03675217v1>

Submitted on 23 May 2022

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.

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
[Laboratoire de Conception, Fabrication et Commande – Campus de Metz]

THÈSE

présentée par : **Ismail TALEB**

soutenue le : **09 mars 2022**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Génie industriel**

Identification et évaluation des temps non productifs par la simulation de systèmes de production pour améliorer la productivité et les conditions de travail

THÈSE dirigée par :
Pr. SIADAT Ali

et co-encadrée par :
MCf. ETIENNE Alain

Jury

M. Michel TOLLENAERE, Professeur, G-SCOP, Grenoble INP
M. Laurent GENESTE, Professeur, LGP, INP ENI Tarbes
M. Samir LAMOURI, Professeur, LAMIH, Arts et Métiers
Mme Corinne GAUDART, Directrice de recherche, LISE-CNRS, CNAM
M. William DERIGENT, Professeur, CRAN, Université de Lorraine
M. Alain ETIENNE, Maître de conférences, LCFC, Arts et Métiers
M. Ali SIADAT, Professeur, Unité de LCFC, Arts et Métiers

Rapporteur
Rapporteur
Examinateur
Examinatrice
Examinateur
Examinateur
Examinateur

**T
H
È
S
E**

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire de thèse a été réalisé au sein de l'axe de conception du Laboratoire de Conception, Fabrication et Commande (LCFC), dirigée par le Professeur Ali SIADAT et le Maître de Conférence Alain ETIENNE. C'est grâce eux, à leurs multiples remarques, conseils et leur soutien du début à la fin qui m'ont permis de réaliser ce travail dans les meilleures des conditions. Je vous remercie également pour la confiance, les discussions ainsi que les réunions que vous m'avez accordées. Cette thèse est passée par une époque spéciale, et il a fallu s'adapter. C'était une étape difficile pour toutes les parties prenantes et vous avez su me guider pendant cette période difficile. Pour cela, je vous en remercie grandement.

Je tiens aussi à remercier tous les membres du jury pour le temps qu'ils ont consacré pour évaluer mes travaux de recherche, pour leurs commentaires et leurs questions qui ont permis de faire évoluer ce travail : Pr. Michel TOLLENAERE, Pr. Laurent GENESTE, Pr. Samir LAMOURI, Dr. Corinne GAUDART, Pr. William DERIGENT.

Tout cela ne serait arrivé sans l'aide et le soutien de mes parents et ma famille. Je ne les remercierai jamais assez pour l'opportunité qu'ils m'ont offert ni le soutien qu'ils m'ont donné et qu'ils continuent à me donner.

Je voudrais remercier nos partenaires industriels qui nous ont fait confiance avec leurs données, leurs plans et leur temps. Ils m'ont beaucoup aidé à modéliser, développer et finaliser plusieurs aspects de la thèse.

Finalement, un grand merci à l'ensemble de mes camarades en commençant par l'axe conception, ils sauront se reconnaître. Grâce à eux, j'ai pu passer d'agréables 3 années avec une très bonne ambiance de travail à la fois conviviale et sérieuse, sans oublier l'ambiance hors du travail. Je tiens aussi à remercier tous les membres du LCFC, qu'ils soient doctorants, enseignants ou professeurs. Je me suis vraiment senti accueilli comme dans une nouvelle famille. Je leur souhaite tous un très bon courage pour la suite de leurs travaux et dans leur carrière, en espérant travailler avec vous dans le futur pour de nouveaux projets !

Table des matières

Liste des figures	7
Liste des tableaux.....	9
Nomenclature et Glossaire	10
Acronymes	10
Avant-propos	13
I. Introduction du LCFC.....	13
II. Travaux précédents (au sein du LCFC)	14
III. La chaire Arts et Métiers de recherche industrielle : Systèmes de production reconfigurables – sûrs – performants	15
IV. Le contexte de recherche scientifique et industriel	16
1. Le contexte scientifique	16
2. Le contexte industriel	16
Introduction	17
I. Vue rétrospective et introspective des systèmes de production	18
1. 1 ^{ère} époque : L'époque artisanale	21
2. 2 ^{ème} époque : L'époque industrielle	21
3. 3 ^{ème} époque : L'époque post-industrielle	22
II. Contexte global	24
III. Problématique	25
IV. Verrous scientifiques et technologiques	26
V. Questions scientifiques de recherche	27
VI. Méthodologie de recherche employée	28
VII. Contributions souhaitées.....	29
1. Contributions scientifiques.....	29
2. Contributions technologiques.....	30
VIII. Plan de la thèse	30

Chapitre 1 : Recherche bibliographique	32
I. Les trois piliers	33
II. Premier pilier : La productivité et la quantification des temps de production .	35
1. Productivité à l'époque du Fordisme et Taylorisme.....	36
2. Productivité à l'époque du Lean	37
3. Productivité à l'époque post-Lean.....	39
III. Deuxième pilier : Les facteurs humains	43
1. Pourquoi les facteurs humains ?	43
2. Les catégories de facteurs humains dans la littérature	44
3. Les facteurs humains dans la littérature	47
4. Modèles des facteurs humains étudiés	50
IV. Troisième pilier : Les marges de manœuvre	55
1. Les marges de manœuvre : niveaux et dimensions, individuelles ou collectives	55
2. Les avantages et inconvénients des marges de manœuvre	56
3. Implémentation des marges de manœuvre	57
V. Modèles développés et approches existantes	58
1. Approches de modélisation et résolution de la problématique.....	58
2. Travaux antérieurs	61
3. Approches existantes : stratégies d'allocation	62
VI. Conclusion de la recherche bibliographique	65
Chapitre 2 : Modèle & Approche	67
I. Nouvelle définition de la productivité	68
II. Modèle et méthodologie	73
1. Présentation de la méthodologie et du modèle	73
2. Vue globale du modèle : entités et paramètres.....	77
3. Vue détaillée du modèle : relations entre les entités du modèle	79
4. Vue détaillée du modèle : modèle de l'environnement.....	80
5. Vue détaillée du modèle : modèle de l'opérateur	80
6. Vue détaillée du modèle : modèle de la machine	83
7. Interactions entre les modèles	88
8. Fonctionnement du modèle global & conclusion.....	88
III. Choix de l'outil et implémentation et évaluation du modèle	91

1.	Choix de l'outil	91
2.	Implémentation du modèle	92
IV.	Conclusion	95
Chapitre 3 : Cas d'étude		98
I.	Introduction	99
II.	1 ^{er} cas d'étude :	99
1.	Introduction	99
2.	Données.....	100
3.	Scénario initial et points d'amélioration	100
4.	Définition et simulation des scénarii	101
5.	Résultats	102
6.	Conclusion du 1 ^{er} cas d'étude	104
III.	2 ^{ème} cas d'étude :	105
1.	Introduction	105
2.	Données.....	106
3.	Application de l'approche sur la situation actuelle	107
4.	Définition et simulation des scénarii	109
5.	Résultats	111
6.	Conclusion du 2 ^{ème} cas d'étude	115
IV.	Conclusion du chapitre 3 : cas d'étude.....	116
Conclusions, limitations et perspectives		119
I.	Conclusions	119
1.	L'identification et la définition des temps non productifs (TnP).....	120
2.	Le développement du modèle et de l'outil	120
3.	La confrontation du modèle et de l'outil à la réalité via des cas d'étude	121
4.	Conclusion générale.....	121
II.	Limitations	122
III.	Perspectives.....	123
Références.....		125
Annexes		132
I.	Annexe 1	132
II.	Annexe 2.....	133
III.	Annexe 3.....	141

IV. Annexe 4	142
V. Annexe 5.....	143

Liste des figures

Figure 1. Les 4 défis de la chaire industrielle : Systèmes reconfigurables, sûrs et performants	15
Figure 2. Evolution des systèmes de production selon le volume et variété des produits (adapté de (Koren, 2010))	18
Figure 3. L'évolution des systèmes de production (adapté de (Bi, 2011))	19
Figure 4. Le pendule de l'humain et l'automatisation (adapté de (El Maraghy, 2006))	23
Figure 5. Variabilités et incertitudes dans les systèmes de production et comment elles sont résolues	25
Figure 6. Boucle itérative de recherche	28
Figure 7. Plan visuel de la thèse	30
Figure 8. Importance de l'humain et d'un outil numérique dans un système de production reconfigurable (adapté de (Canetta et al., 2014))	34
Figure 9. Structure de la thèse	35
Figure 10. Les bases et piliers du système de production de Toyota (adapté de (Liker, 2008))	37
Figure 11. Méthodologie du Lean : amélioration continue.....	38
Figure 12. Partie du modèle de (Gopinath & Freiheit, 2012). En rouge, les gaspillages de type attente et inventaire et la relation directe entre eux	39
Figure 13. Modèle simplifié de (Gopinath & Freiheit, 2012).....	40
Figure 14. Evolution de la définition de valeurs selon les types d'activités. (a) le paradigme de base prend en compte uniquement les valeurs ajoutées et les non-valeurs ajoutées. (b) Paradigme proposé par (Low et al., 2014) en ajoutant la non-valeur ajoutée mais nécessaire. (c) Paradigme proposé par les travaux de cette thèse : réduire la NVAN et éliminer la NVA.	42
Figure 15. Facteurs humains selon leur difficulté de mesure et importance dans la littérature (adapté de (Dekker & Hollnagel, 2004))	48
Figure 16. Modèle des relations d'influence des facteurs de risque sur les TMS – Qu'est-ce qui influence les TMS ? (adapté de (Lanfranchi & Duveau, 2008))	49
Figure 17. Diagramme des différents facteurs (dont facteurs humains) qui influencent la variabilité et l'erreur humaine (adapté de (Elmaraghy et al., 2008)).....	49
Figure 18. Exemple de graphe de fatigue-repos.....	51
Figure 19. Exemple de graphe d'apprentissage-oubli	53
Figure 20. Niveaux et dimensions d'implémentation des marges de manœuvre	56
Figure 21. Le Lean Thinking (adapté de (Womack & Jones, 2003))	68
Figure 22. Définition des temps productifs et non-productifs	69
Figure 23. TRS opérateur	70
Figure 24. Taxonomie des trois catégories des temps non productifs, peu productifs et mal productifs.....	71
Figure 25. Méthodologie de développement du modèle.....	73

Figure 26. Modélisation de la ligne de production	74
Figure 27. Configuration du modèle de la ligne de production	75
Figure 29. Modèle Opérateur-Machine-Produit-Tâche (Le modèle ne traite pas le stress et la motivation, mais ils font partie des facteurs humains de l'opérateur)	76
Figure 30. Diagramme de classes du modèle	77
Figure 31. Synthèse du modèle de l'opérateur	81
Figure 32. Diagramme d'état du modèle de l'opérateur	82
Figure 33. Modèle de défaillances : loi exponentielle et loi Weibull (AnyLogic Help, 2021).....	85
Figure 34. Synthèse du modèle des machines	86
Figure 35. Diagramme d'état des machines.....	87
Figure 36. Fonctionnement du modèle global	90
Figure 37. Diagramme d'état de l'opérateur (à gauche) et de la machine (à droite) adaptés pour l'outil	94
Figure 38. Agencement des machines – 1 ^{er} cas d'étude	99
Figure 39. Répartitions des temps pour un opérateur (à gauche) et une machine (à droite) – Scénario initial	101
Figure 40. La relation cachée entre les TnP d'attente et de mouvement	103
Figure 41. Evolution du temps de production dans le cas où l'opérateur gère (a) 1 machine (b) 2 machines, et (c) 3 machines	104
Figure 42. Fatigue des opérateurs selon la stratégie choisie. (a) initiale (b) allocation des pauses différentes	104
Figure 43. Représentation graphique du système de production	105
Figure 44. Représentation graphique de la machine, son stock et ses zones de chargement	106
Figure 45. Histogrammes de production par machine (données agrégées de 2000 répliques).....	108
Figure 46. Répartition des temps pour des opérateurs (en bas) et des machines (en haut) pour le scénario initial	109
Figure 47. Distance parcourue par chaque opérateur – Scénario initial.....	110
Figure 48. Histogrammes de distribution du temps productif de la machine 3.....	110
Figure 49. Résultats d'un agencement en îlots – Scénario 4 (60 00m1+2 01m3+4 04m5+7)	112
Figure 50. Effet de la robotisation sur le système de production	113
Figure 51. Etude de variabilité des scénarios. (a) scénario initial (b) scénario 3 allocation 1 (c) scénario 3 allocation 2 et (d) scénario 4 allocation 1.	115
Figure 52. Exemple de VSM amélioré / enrichi	124

Liste des tableaux

Tableau 1. Les caractéristiques des systèmes de production selon l'étape des révolutions industrielles (adapté de (Doll & Vonderembse, 1991)	20
Tableau 2. Synthèse des systèmes de production et des critères considérés importants	24
Tableau 3. Gaspillages et leurs métriques (Adapté de (Cortes et al., 2016))	40
Tableau 4. Recommandations, avantages et coûts de différentes approches de production (adapté de (Spath et al., 2012))	45
Tableau 5. Avantages et inconvénients des trois approches étudiées (les besoins de la thèse sont marqués par un dièse (#) et les inconvénients majeurs à la thèse par (-)).	60
Tableau 6. Synthèse des travaux antérieurs	64
Tableau 7. Définition, mesure et plan d'action pour l'attente	72
Tableau 8. Liste des entités, leurs paramètres et fonctions	78
Tableau 9. Comparaison de Simio et AnyLogic	91
Tableau 10. Données d'entrée adaptées à AnyLogic	92
Tableau 11. Types de transitions du modèle	93
Tableau 12. Temps de cycle des machines (en secondes)	100
Tableau 13. Résultats des scénarii	102
Tableau 14. Confrontation des résultats de la simulation aux données réelles	107
Tableau 15. Scénarii identifiés	112
Tableau 16. Résultats des scénarii simulés	114
Tableau 17. Pannes	133
Tableau 18. Reconfigurations / Préparations / Réglages / Changements de série	134
Tableau 19. Mouvements & Transport Inutiles	134
Tableau 20. Erreurs humaines	135
Tableau 21. Absentéisme	135
Tableau 22. Attentes	136
Tableau 23. Maintenances Préventives	136
Tableau 24. Pauses planifiées	137
Tableau 25. Formations & Réunions	137
Tableau 26. Cadence : Micro-arrêts / Sous-charge / Surtraitement / Surproduction	138
Tableau 27. Organisation : Agencement atelier	138
Tableau 28. Organisation : Pratiques & éthique de travail (Partage d'outils, ...)	139
Tableau 29. Organisation : Potentiel non exploité	139
Tableau 30. Facteurs humains : Fatigue-Repos / Oubli-Apprentissage / Erreur humaine	140
Tableau 31. Qualité : Rebuts & Retouches	140

Nomenclature et Glossaire

Acronymes

Acronyme	Signification	Définition ou traduction
ABS	Agent-Based Simulation	Simulation multi-agents (SMA)
AGV	Automated Vehicle	Guided Véhicule à guidage automatique (VGA)
DES	Discrete-Event Simulation	Simulation à événements discrets (SED)
DML	Dedicated Manufacturing Lines	Lignes de Production Dédiées
ECG	Electrocardiographie	L'électrocardiographie est une technique d'enregistrement de l'activité électrique du cœur (<i>Définition de Electrocardiographie - Dictionnaire médical, n.d.</i>).
ETI	Entreprises à Taille Intermédiaire	Selon l'INSEE, les ETI comptent un nombre d'employés entre 250 et 4999 et un CA inférieur à 1.5 milliards d'euros (ou un bilan total de 2 milliards d'euro) (INSEE, 2021).
FH	Facteurs Humains	Les facteurs humains est la discipline scientifique concernée par la compréhension des interactions entre les humains et d'autres éléments d'un système, et la profession qui applique la théorie, les principes, les données et autres méthodes pour concevoir afin d'optimiser le bien-être humain et performances globales du système (Proctor & Zandt, 2018).
FMS	Flexible Manufacturing System	Système de Production Flexible
GE	Grandes Entreprises	Selon l'INSEE, les GE comptent un nombre d'employés supérieur à 5000 et un CA supérieur à 1.5 milliards d'euros (ou un bilan total de 2 milliards d'euro) (INSEE, 2021).
HEP	Human Probability	Error Probabilité d'Erreur Humaine
ILP	Integer Programming	Linear Programmation Linéaire en nombre entier

KM	Knowledge Management	La gestion des connaissances est une démarche managériale vouée à gérer et à exploiter de manière optimale la connaissance au sein d'une organisation. Cette connaissance peut prendre diverses formes. Tel un iceberg, on y distingue la partie émergée et la partie immergée, souvent plus conséquente.
MET	Maximum Endurance Time	Temps d'Endurance Maximal (TEM)
MM	Marges de Manœuvre	Les marges de manœuvre sont définies comme la possibilité ou la liberté dont dispose un travailleur pour développer différentes méthodes de travail afin d'atteindre les objectifs de production, sans nuire à sa santé. Les marges de manœuvre, qui peuvent être vues comme des degrés de liberté offerts à l'opérateur, prennent en compte l'interaction entre l'individu et les exigences du travail, y compris les méthodes et les outils fournis dans l'environnement de travail (Ve & Ngomo, 2009).
MTBF	Mean Time Between Failure	Temps Moyen entre les Défaillances
NVA	Non-Valeur Ajoutée	Selon la définition précédente, la non-valeur ajoutée est tout ce qui est opposé à ça
NVAN	Non-Valeur Ajoutée mais Nécessaire	Cette nouvelle définition sépare les NVA en 2 parties : nécessaires et non-nécessaires
PME	Petites et Moyennes Entreprises	Selon l'INSEE, les PME comptent un nombre d'employés entre 10 et 250 et un CA inférieur à 50 millions d'euros (ou un bilan total de 43 millions d'euro) (INSEE, 2021).
RMS	Reconfigurable Manufacturing System	Système de Production Reconfigurable
RO	Recherche Opérationnelle	La recherche opérationnelle est l'ensemble des méthodes et techniques rationnelles orientées vers la recherche du meilleur choix dans la façon d'opérer en vue d'aboutir au résultat visé ou au meilleur résultat possible (Larousse 3 volumes, Paris 1966).
TMS	Troubles Musculosquelettiques	Selon (DARES, 2016), les TMS désignent un ensemble de pathologies qui touchent les tissus mous présents au voisinage des articulations. Elles se traduisent par des

			douleurs et une réduction des capacités fonctionnelles. Ces symptômes touchent le poignet, l'épaule, le coude, le rachis, les genoux et/ou les pieds.
TPE	Très Petites Entreprises		Selon l'INSEE, les TPE (aussi appelées Microentreprises, depuis 2008) désigne en France les entreprises de moins de 10 employés et dont le chiffre d'affaires (CA) ou le bilan total sont inférieurs à 2 millions d'euros (INSEE, 2021).
TPS	Toyota System	Production	Système de Production Toyota
TQM	Total Management	Quality	La gestion de la qualité totale est une philosophie de gestion holistique qui vise l'amélioration continue dans toutes les fonctions d'une organisation. Il ne peut être atteint que si le concept de la qualité totale est utilisé à partir de l'acquisition des ressources au service du client après la vente (Lehyani, 2020).
TRS	Taux de Rendement Synthétique		Le Taux de Rendement Synthétique ou TRS correspond au rendement global d'une installation (Lasnier, 2007).
VA	Valeur Ajoutée		Le Lean définit la valeur ajoutée comme étant ce que le client est prêt à payer
VSM	Value Stream Mapping		Cartographie des chaînes (ou flux) de valeur
VSM	Value Stream Mapping		Cartographie des Chaînes de Valeur (CCV)

Avant-propos

Avant d'entamer les travaux de thèse, il est judicieux de les mettre dans leur contexte pour mieux les présenter. En effet, les travaux de la thèse actuelle ne sont pas seuls, mais se tiennent côte à côte avec trois autres travaux de thèse dans le contexte d'une chaire industrielle qui porte sur la reconfigurabilité, la sûreté et performance des systèmes de production. Au sein du laboratoire LCFC (Laboratoire de Conception, Fabrication, Commande) des Arts et Métiers Institute of Technology de Metz, plus précisément dans l'axe conception, la chaire industrielle « Systèmes de production reconfigurables, sûrs et performants » se compose de 4 défis, chacun traitant une problématique et donne lieu à un travail de thèse :

Défi 1 : Conception sûre des systèmes de production

Défi 2 : Adaptabilité et reconfigurabilité des systèmes de production

Défi 3 : Optimisation des temps non productifs

Défi 4 : Amélioration des performances – Fouilles de données

Les travaux de cette thèse essaient de répondre à la problématique du défi 3 en liant recherche et pratique. En effet, la chaire industrielle, étant une collaboration entre le laboratoire de recherche et des entreprises partenaires, le but est à la fois de générer des résultats théoriques mais aussi des résultats opérationnels.

Le but de cette section est de mettre ces travaux de recherche dans leurs contextes scientifique et industriel. Pour cela, plusieurs parties sont introduites : d'abord, une introduction du laboratoire LCFC et du type de recherches qu'il réalise. Ensuite, les travaux précédents liés à cette thèse réalisés au sein du LCFC. Puis, la chaire industrielle est présentée ainsi que les 4 défis qui la constituent. Finalement, le contexte de ce travail de recherche (scientifique et industriel).

I. Introduction du LCFC

Le laboratoire LCFC fait partie des laboratoires ENSAM de Metz et l'université de Lorraine.

Les travaux de recherches du LCFC, comme son nom l'indique sont axés sur la conception, la fabrication et la commande. Ces travaux sont à la fois orientés recherche et industrie. En effet, on peut trouver plusieurs travaux de recherche académique tels que (Khezri et al., 2020; A. A. Kumar et al., 2019), ainsi que des travaux de recherche

appliquée tels que (Martin et al., 2012; Taleb et al., 2021), ou même des travaux qui regroupent les deux comme (A. A. Kumar et al., 2020; Stief et al., 2020). Les travaux de recherche appliquée sont généralement menés en collaboration avec des partenaires industriels, ce qui permet d'avoir un retour terrain sur les travaux théoriques réalisés pour pouvoir comparer et analyser entre la théorie et la réalité, dans le but de développer un modèle le plus proche de la réalité sur lequel s'appuyer pour nos outils et méthodes.

Les enjeux actuels font aussi que les travaux se concentrent sur l'industrie du futur et l'industrie 4.0. L'humain est un aspect particulièrement important dans les recherches passées, actuelles et futures au LCFC, notamment au niveau de l'axe de conception. Elles visent à garantir une production et productivité durables en associant la préservation de l'intégrité de l'Humain et du système de production. Plusieurs travaux ont été réalisés autour de l'Humain que ce soit au niveau de la santé, de la sécurité ou de la productivité. Dans cette vision, des modèles et outils d'aide à la décision sont développés, ainsi que des simulations et des optimisations, pour garantir une conception et commande de systèmes de production durables.

II. Travaux précédents (au sein du LCFC)

Deux travaux réalisés au sein du LCFC précèdent cette thèse : la thèse d'Ismail El MOUAYNI et le master de recherche de Jelena PETRONIJEVIC : (El Mouayni et al., 2018; Petronijevic et al., 2019).

Ces travaux ont respectivement traité l'amélioration des aspects de santé et sécurité des opérateurs dans un système de production lors de sa phase de conception, et l'étude des facteurs humains sous incertitudes dans le but d'améliorer la santé, sécurité et productivité.

Le premier travail s'est concentré sur le développement d'une solution outillée pour améliorer les aspects de santé et sécurité au travail pour les opérateurs en se concentrant sur l'étape de conception.

Tandis que le second travail s'est focalisé sur l'étude des facteurs humains dans un milieu incertain. Le but est de trouver une allocation de production (par type de produit et par opérateur) qui permet de réduire la fatigue mais aussi de garder la même productivité voire de l'améliorer.

Ces études étaient les précurseurs de l'étude des marges de manœuvre et des facteurs humains au sein du LCFC. Grâce à la création de la chaire industrielle, l'un des défis est de réduire et d'optimiser les temps non productifs. Cette thèse a été créée pour répondre à ce besoin.

III. La chaire Arts et Métiers de recherche industrielle : Systèmes de production reconfigurables – sûrs – performants

La « Chaire Arts et Métiers de Recherche Industrielle – Systèmes de Production Reconfigurables – Sûrs – Performants » a été formée entre le LCFC et plusieurs partenaires industriels dans le but de répondre à des problématiques liées à l'industrie du futur. Le LCFC apporte son expertise dans le domaine de la conception, la fabrication et la commande, qui sont des aspects clés à l'industrie du futur. La chaire est supportée financièrement par plusieurs acteurs dont : Arts et Métiers Institute of Technology, ThyssenKrupp, UIMM, fonds Fzi, la région Grand Est et l'Union Européenne.

Les objectifs de la chaire peuvent être regroupés selon 4 catégories principales dont le but global est d'étudier les systèmes de production :

- Offrir aux entreprises une meilleure flexibilité pour pouvoir s'adapter aux variabilités de la demande de production
- Rendre la gestion de la qualité et de la maintenance plus facile à manœuvrer (surtout pour les PME et TPE (Moeuf et al., 2018))
- Améliorer la productivité et la performance via une approche originale en prenant en compte les facteurs liés à ces paramètres (tels que les facteurs humains)
- Maîtriser les risques opérationnels et améliorer la sécurité des opérateurs

Chacun de ces objectifs est concrétisé par un défi qui est opérationnalisé par une thèse dans le but de répondre à chacune de ces problématiques (voir Figure 1). Les défis identifiés sont :

- Défi 1 : Conception sûre des systèmes de production
- Défi 2 : Adaptabilité et reconfigurabilité des systèmes de production
- **Défi 3 : Optimisation des temps non productifs**
- Défi 4 : Amélioration des performances – Fouilles de données

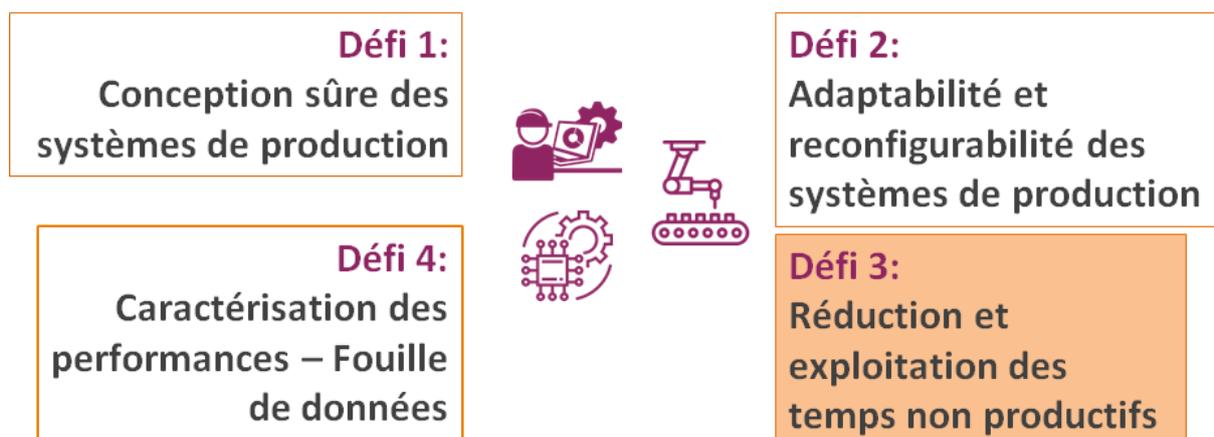


Figure 1. Les 4 défis de la chaire industrielle : Systèmes reconfigurables, sûrs et performants

La thèse actuelle traite la problématique du défi 3, en alliant recherche et cas concrets industriels. En effet, cette thèse est réalisée en collaboration avec des industriels qui offrent leur expérience dans le domaine et les données nécessaires pour alimenter les recherches, et surtout la problématique. En contrepartie, ils bénéficient des solutions développées et des résultats obtenus grâce aux outils développés.

IV. Le contexte de recherche scientifique et industriel

La thèse s'inscrit dans des contextes scientifique et industriel bien précis. En effet cette thèse a pour but de combler des lacunes identifiées dans la littérature scientifique, ainsi qu'utiliser les résultats trouvés pour des fins industrielles et économiques.

1. Le contexte scientifique

Au niveau scientifique, le contexte de la thèse se voit en tant que suite logique des travaux précédents réalisés au sein du LCFC, ainsi que les travaux similaires réalisés au LCFC. Cela devient alors évident de poursuivre l'étude dans ce sens-là, c'est-à-dire étudier des sujets tels que la productivité, les facteurs humains et les marges de manœuvre dans le but d'identifier, de définir et d'améliorer les temps non productifs (TnP). En particulier, le contexte scientifique actuel traite l'Humain comme étant le centre du système de production et acteur principal et stipule que son bien être influence directement la performance et la productivité du système de production.

2. Le contexte industriel

Quant au niveau industriel, la thèse s'inscrit dans un contexte de collaboration avec des partenaires industriels. Chaque défi sert de pont entre la recherche scientifique représentée par le laboratoire LCFC et l'application réelle représentée par le partenaire industriel.

Introduction

Résumé

Le but de ce chapitre est d'introduire la problématique et le contexte de cette thèse. Pour cela, une vue rétrospective et introspective sont nécessaires. Cela a pour but d'identifier les lacunes scientifiques à la fois au niveau de ce qui a été réalisé dans le passé et le niveau atteint jusqu'à présent pour guider au mieux les réalisations futures. Cette première phase de recherche scientifique est importante car elle guide la direction générale de la thèse, même si cette dernière peut évoluer par la suite, elle reste un grand contributeur aux résultats finaux de la thèse. Ce chapitre met aussi l'accent sur l'importance d'une approche mixte qui joint à la fois les systèmes de production, les facteurs humains, la productivité et les marges de manœuvre – contrairement aux études précédentes qui traitent chacun de ces facteurs de manière indépendante. En gardant en tête les contextes scientifiques et industriels de la chaire et de la thèse, l'étude est composée de deux parties complémentaires :

- *Une partie scientifique et théorique dont le but est :
 - *D'étudier les différents aspects influents sur les systèmes de production.*
 - *De développer de nouvelles définitions en se basant sur les principes actuellement disponibles dans la littérature.*
 - *De développer un modèle qui lie tous les acteurs entre eux.**
- *Une partie industrielle et pratique pour répondre aux besoins des collaborateurs industriels. En effet, ce besoin peut être exprimé sous forme d'outils et d'approches statistiques pour pouvoir faire fonctionner le modèle développé et offrir une aide à la décision.*

Ce chapitre souligne également les différents verrous scientifiques identifiés, la méthodologie de recherche adoptée et les principales contributions souhaitées. Le chapitre se termine par l'organisation choisie pour le reste de la thèse.

I. Vue rétrospective et introspective des systèmes de production

La vue rétrospective permet de suivre l'évolution des paradigmes de production à travers les âges et d'analyser cette évolution et les changements et similitudes entre chaque ère pour en tirer des conclusions sur les points forts et points faibles de chaque étape. Ce type d'approche permet d'évoluer vers un système plus efficace, efficient et robuste en améliorant les points forts et en éliminant ou en réduisant les points faibles des études précédentes. Cette approche reste quand même vague et chronophage, c'est pour cette raison qu'il faut d'abord identifier certains points d'intérêt. Pour notre cas, lors de la vue rétrospective, la thèse se concentre sur trois piliers principaux c'est-à-dire : les temps non productifs, les facteurs humains et les marges de manœuvre. Chaque étape de l'évolution industrielle a des caractéristiques uniques par rapport à chacun des piliers identifiés.

Les différentes révolutions industrielles sont les résultats de l'évolution de plusieurs aspects socio-économiques, financiers, technologiques et idéologiques. Le but de cette étude n'est pas de discuter ces contextes ou leurs raisons, mais simplement d'observer, analyser les révolutions industrielles et en tirer des conclusions constructives de manière objective dans le but de concevoir et développer une méthode en accord avec la révolution industrielle actuelle et future et leurs valeurs et caractéristiques.

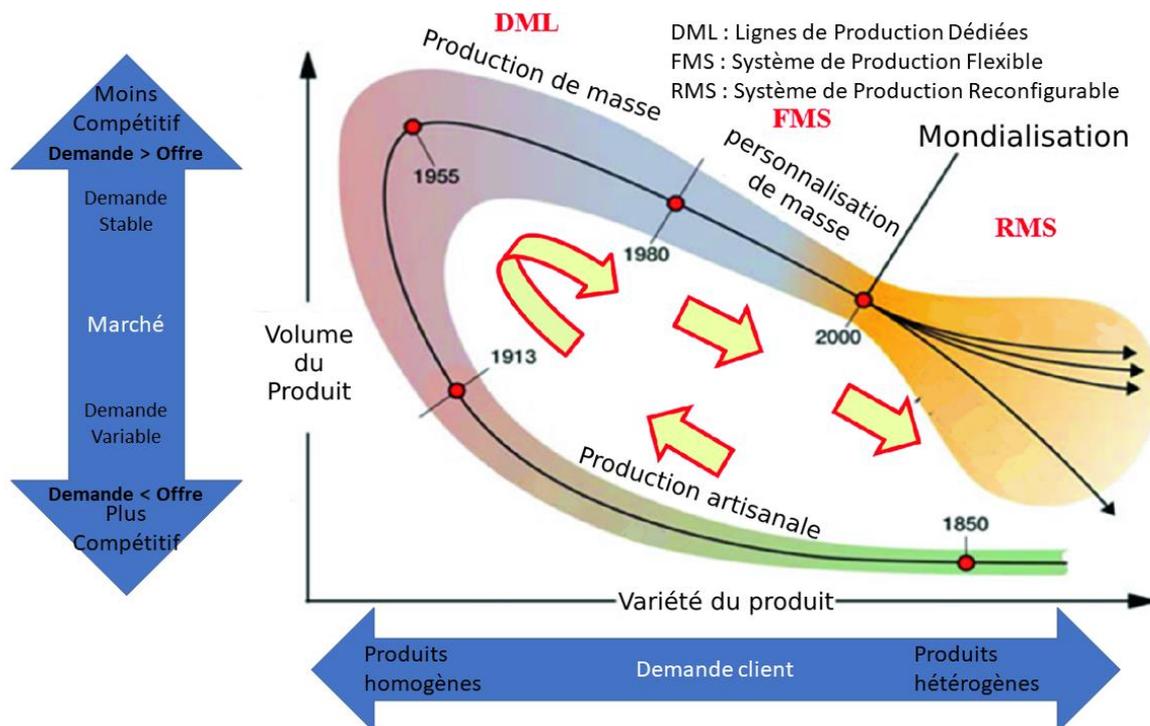


Figure 2. Evolution des systèmes de production selon le volume et variété des produits (adapté de (Koren, 2010))

Plusieurs chercheurs catégorisent les révolutions industrielles en 4 catégories : La 1ère, 2ème, 3ème et la 4ème révolution industrielle. Alors que certains les catégorisent selon 3 catégories : l'époque artisanale, l'époque industrielle et l'époque post-industrielle (Doll & Vonderembse, 1991). Les deux catégorisations partagent des similarités,

Tableau 1. Les caractéristiques des systèmes de production selon l'étape des révolutions industrielles (adapté de (Doll & Vonderembse, 1991))

Caractéristique / Epoque	Artisanale	Industrielle	Post-industrielle
Système social			
La valeur repose dans	Compétence personnelle	Produit	Client
Les normes	Maîtrise	Efficacité et productivité	Conception de produit et temps de cycle
Système de travail			
Ressources	Outils à main flexibles	Investissement cher et à but spécifique	Investissement cher et flexible
Nature du travail	Travail manuel qualifié	Travail manuel non-qualifié ou travail intellectuel spécialisé	Travail intellectuel à dominante d'information
Organisation du groupe de travail	Groupement orienté tâches	Groupement orienté fonctionnement	Groupement auto-suffisant
Système de contrôle			
Mesure des performances	Habitudes	Par tâche	Multiple et globale
Système d'information	Informel basé sur l'apprentissage	Formel pour contrôler l'exécution et le séquençement des tâches	Formel et informel pour contrôler et apprendre
Mécanisme de contrôle	L'artisan	La structure hiérarchique	Les mécanismes du marché

Chacune de ces révolutions et époques est analysée selon les critères classiques tels que le marché, la demande et le produit, mais aussi selon des critères spécifiques à ces travaux de thèse tels que les facteurs humains et les marges de manœuvre. Cette approche permet d'avoir une vue globale car elle prend en compte plusieurs aspects qui peuvent être contradictoires (améliorer les temps au détriment des facteurs humains, par exemple). Le choix de l'approche et ses points positifs et négatifs sont expliqués plus en détails dans le chapitre de recherche bibliographique.

1. 1ère époque : L'époque artisanale

Dans l'ordre chronologique, le système artisanal se basait sur les compétences personnelles des artisans qui recevaient l'information sur le marché, contrôlaient la production « à l'œil » ou avec des outils de mesure manuels et donc les variations entre les produits étaient assez conséquentes, et les clients mesuraient la performance de l'artisan via le bouche-à-oreille (standard habituel). Ce type de système de production est impossible à mettre en échelle si la demande augmente car l'artisan est la seule personne qui connaît le processus de production. Les pièces sont différentes en termes de dimension car il n'existe aucun standard de production.

2. 2ème époque : L'époque industrielle

L'époque industrielle se caractérise par la 1ère révolution industrielle qui avait des motifs internes et externes. Les causes internes se manifestent sous la forme de volonté d'amélioration de la productivité et la réduction des coûts (pour augmenter les profits) alors que les raisons externes peuvent être groupées sous les exigences externes du marché auxquelles le système de production doit répondre comme la forte croissance de la demande ou l'ouverture mondiale des marchés résultant en une compétitivité inégalée auparavant (Doll & Vonderembse, 1991). Des changements au niveau des méthodes de production, de gestion de l'information et du contrôle ont été nécessaires pour parvenir à satisfaire ces exigences. Ces changements ont commencé avec le Taylorisme qui a séparé la gestion de la production et l'exécution de la production. L'entreprise devait suivre la hiérarchie à la lettre, et donc les opérateurs se retrouvaient à exécuter les tâches et processus définis par les supérieurs hiérarchiques comme étant « la meilleure façon de faire ». Souvent, ces tâches étaient très spécifiques et spécialisées, et donc, les facteurs humains, la flexibilité et les marges de manœuvre n'étaient aucunement pris en compte. L'unique but de cette méthode est de standardiser le processus. Le Fordisme a ensuite continué sur les mêmes pas du Taylorisme en divisant les tâches complexes en des tâches élémentaires, ensuite en standardisant ces tâches élémentaires via le chronométrage. Le Fordisme aura, en revanche, quelques différences par rapport au Taylorisme, notamment au niveau du salaire et des récompenses. En effet, le Fordisme assure une meilleure assiduité et fidélité des opérateurs. Pour cela, il augmente les salaires des opérateurs et il offre des récompenses si certaines conditions sont remplies par les opérateurs. Ces changements avaient comme objectif de réduire l'absentéisme et le turnover (Coutarel, 2004). En réalité, parmi les 13667 ouvriers (chez Ford) persistait un absentéisme journalier de 10% et un turnover qui a atteint les 370%, ce qui a rendu la planification de la production difficile (Wood & Wood, 2003). Cependant, Ford avait réussi à démontrer qu'il est possible d'atteindre des niveaux de productivité jamais imaginés (au détriment des ouvriers).

L'acteur principal de la deuxième phase de la 2ème époque est le Japon, plus précisément Toyota. Face à des ressources limitées, Toyota se retrouve en obligation d'utiliser toutes les ressources avec le minimum de gaspillages possible. Plusieurs principes ont découlé de cette philosophie, certains d'entre eux : l'amélioration

continue (Kaizen 改善), le juste à temps, le Jidoka (自働化), etc. Les gaspillages (Muda 無駄) étaient au centre du Système de Production Toyota (TPS) (Rosin et al., 2020), en plus des surcharges (Muri 無理) et des incohérences (Mura 斑). L'objectif du TPS est d'éliminer les Muda, d'éviter les surcharges et les incohérences grâce aux différents principes développés, tout ça dans le but d'utiliser le minimum de ressources possible. La différence entre le TPS et les systèmes précédents (Fordisme et Taylorisme, par exemple) est l'aspect sociotechnique du système. En effet, le TPS n'est pas uniquement un système de production, mais aussi une philosophie qui partage les valeurs des ouvriers. Effectivement, contrairement aux systèmes de production précédents qui étaient purement horizontaux, le TPS permet aux ouvriers de partager leurs points de vue et d'améliorer les processus de production de manière participative, en élisant un représentant des ouvriers (Kumicho) qui partage la voix des ouvriers avec le représentant du corps scientifique ou ingénieur (Hancho). On remarque alors, un début de la prise en compte des opérateurs dans les systèmes de production. Finalement, le TPS reconnaît qu'un système de production ne peut jamais être parfait, et a donc développé l'amélioration continue. Ce système permet aussi d'actualiser les autres principes du TPS. C'est d'ailleurs l'une des raisons que ce système a pu rester compétitif pendant tout ce temps (Toyota est le constructeur automobile #1 au monde en 2020 en termes de bénéfices en pleine crise COVID et pénurie de semi-conducteurs. Toyota affiche un bénéfice net de 17 milliards d'euros – le double de Volkswagen et le triple de GM, 8 fois le bénéfice de l'ex-PSA et 30 fois celui de Tesla (Alain-Gabriel, 2021)).

3. 3ème époque : L'époque post-industrielle

L'époque post-industrielle se caractérise par une augmentation de la variété de produits demandée par le marché, ce qui a eu comme conséquence une augmentation de la demande des systèmes de production flexibles et reconfigurables. Pour répondre à ce besoin, plusieurs technologies ont fait surface comme les systèmes cyber-physiques via l'augmentation des aptitudes humaines, mais aussi des paradigmes orientés et centrés sur l'Humain (Stern & Becker, 2017). La logique postule qu'un opérateur content a une productivité accrue. En revanche, bien que cet argument ait une certaine attrayance, les études scientifiques à propos de ce sujet restent contradictoires. (Taris & Schreurs, 2009) montre que même si cette logique s'applique au niveau individuel, elle n'est pas forcément correcte au niveau organisationnel. Alors que (Oswald et al., 2012), confirme que la productivité corrèle de manière positive avec la joie du travailleur. Et inversement, des événements tragiques dans la vie du travailleur ont des effets négatifs sur sa productivité. Cependant, les écart-types assez conséquents pourraient indiquer une ressemblance à l'étude précédente (niveau individuel vs niveau organisationnel). Ce qui n'est pas sujet à un débat scientifique est la présence de l'humain dans les systèmes de production améliore la flexibilité du système (El Maraghy, 2006). Comme illustré sur la Figure 2, les enjeux internes et externes poussent les systèmes de production à revenir vers des productions à volumes moyens et à grandes variabilités. La Figure 4 représente cette évolution par rapport aux différents systèmes de production, qui commence par l'Humain, puis un passage purement technique, suivi

par des variantes de systèmes de production qui contiennent les deux à des degrés différents.

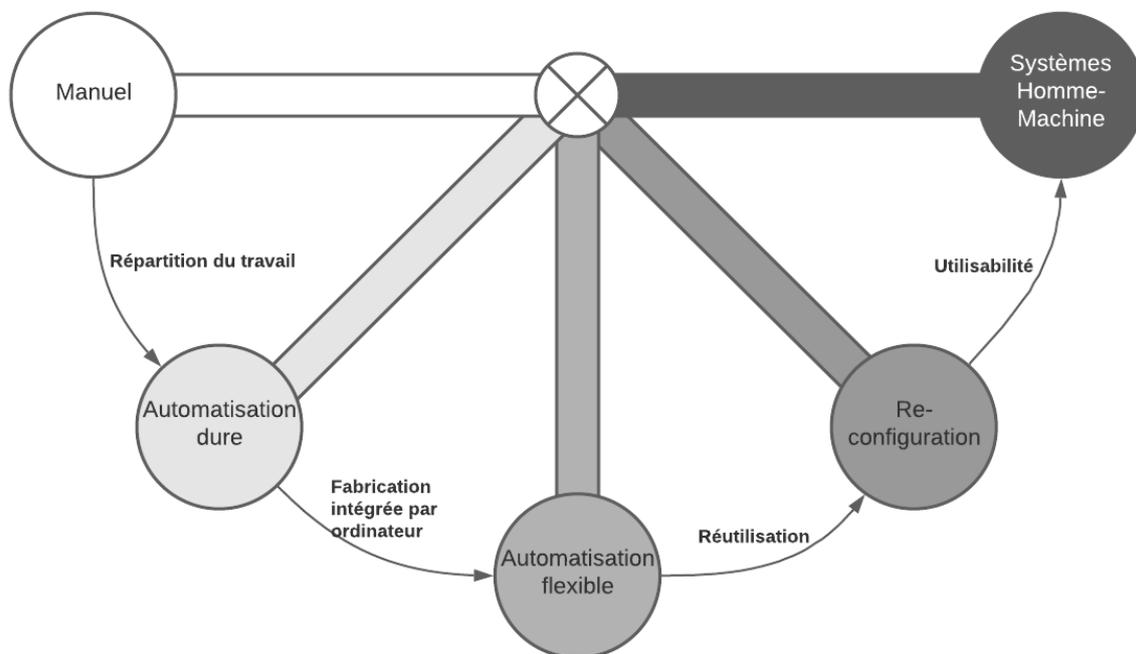


Figure 4. Le pendule de l'humain et l'automatisation (adapté de (El Maraghy, 2006))

Dans la 3^{ème} époque, on retrouve une multitude de systèmes de production allant de systèmes similaires au Fordisme et Taylorisme, jusqu'aux systèmes durables. Le contexte de cette thèse s'inscrit dans cette époque. Elle se concentre principalement sur les systèmes reconfigurables par rapport au contexte de la chaire industrielle. Toutefois, l'étude rétrospective des systèmes de production a servi de base pour (1) identifier les principaux acteurs d'un système de production, (2) les lacunes de chacun des systèmes de production et (3) suggérer des possibilités d'amélioration en se basant sur ces lacunes.

- (1) En effet, on remarque que dans toutes les évolutions du système de production certains acteurs sont toujours présents, alors que d'autres varient selon le type de système de production. Par exemple, les opérateurs/ouvriers/travailleurs, les supérieurs hiérarchiques et les produits sont présents dans tous les systèmes de production (même ceux automatisés à 100%, dû au besoin d'opérateurs de maintenance par exemple). Certains acteurs peuvent s'ajouter comme les machines (automatique ou non), les systèmes informatiques, etc.
- (2) Les lacunes identifiées, en plus des critères importants identifiés dans la Figure 3 (le coût, la qualité, la variabilité, la réactivité et la durabilité), la prise en compte des facteurs humains et l'amélioration continue sont choisis pour identifier les paramètres importants à notre cas d'étude. Ces paramètres sont récapitulés dans le Tableau 2. Ce tableau propose aussi le type de système souhaité.

(3) En se basant sur les lacunes identifiées, on peut remarquer que le système souhaité peut être comparé à un système flexible qui prend en compte les facteurs humains, ou à un système durable simplifié (sans réactivité ou durabilité) qui prend en compte les facteurs humains. On remarque alors que les facteurs humains ne sont généralement pas pris en compte dans les systèmes de production (à l'exception du TPS qui offre un minimum de facteurs humains sous la forme de Kumicho (représentant des ouvriers) *).

Tableau 2. Synthèse des systèmes de production et des critères considérés importants

Systeme	Coût	Qualité	Variabilité	Réactivité	Durabilité	Facteurs Humains	Amélioration continue
Artisanal			X	X			
Production de masse	X						
TPS (Lean)	X	X				*	X
Personnalisation de masse			X				
Systemes Flexibles	X	X	X				
Systemes Reconfigurables	X	X	X	X			
Systemes durables	X	X	X	X	X		
Systeme souhaité	X	X	X	X		X	

Cette étude rétrospective a permis d'identifier les types de systèmes de production utilisés au fil du temps, leurs lacunes et les possibilités d'amélioration. Le reste de la thèse se concentre sur un système de production flexible orienté Humain pour bénéficier à la fois des critères considérés importants : la réduction des coûts, la prise en compte de la qualité, la variabilité, la réactivité et les facteurs humains.

II. Contexte global

Le contexte global de cette thèse s'inscrit dans le contexte actuel de l'industrie 4.0 en prenant en compte toutes entreprises, des TPE (Très Petites Entreprises) aux GE (Grandes Entreprises). En effet, dans un marché de plus en plus compétitif et mondial, les TPE et PME se retrouvent généralement au bout de la file de recherche et développement, contrairement aux grandes entreprises. Cet aspect est généralement très coûteux, et les retours sur investissement sont sur le long terme, seules les ETI et

GE peuvent se permettre des risques pareils. L'un des objectifs de la chaire industrielle et de la thèse est de pouvoir réaliser une activité de recherche et développement qui pourra être utile aux TPE et PME de la région Grand Est.

III. Problématique

La problématique peut être illustrée comme sur la Figure 5. En effet, l'école de pensée qui existe majoritairement dans la littérature stipule que les variabilités sont superflues et doivent être éliminées via la standardisation ou autre forme d'optimisation et d'amélioration, dans le but d'améliorer la productivité. Cependant, cette logique crée des systèmes de production rigides qui s'effondrent devant la moindre variation et que l'opérateur doit absorber ce qui lui coûte physiquement et mentalement (Doll & Vonderembse, 1991; El Mouayni et al., 2018; Salvendy, 2012). Une autre école de pensée se base sur l'indépendance de l'opérateur comme outil pour gérer les variabilités. Selon cette nouvelle école de pensée, les variabilités offrent aux opérateurs une autonomie qui leur permet de mieux gérer leurs temps et cadence, et en contrepartie offre un système de production plus flexible capable de faire face aux incertitudes du système (Kara & Kayis, 2004), de l'humain et du marché (Coutarel, 2004).

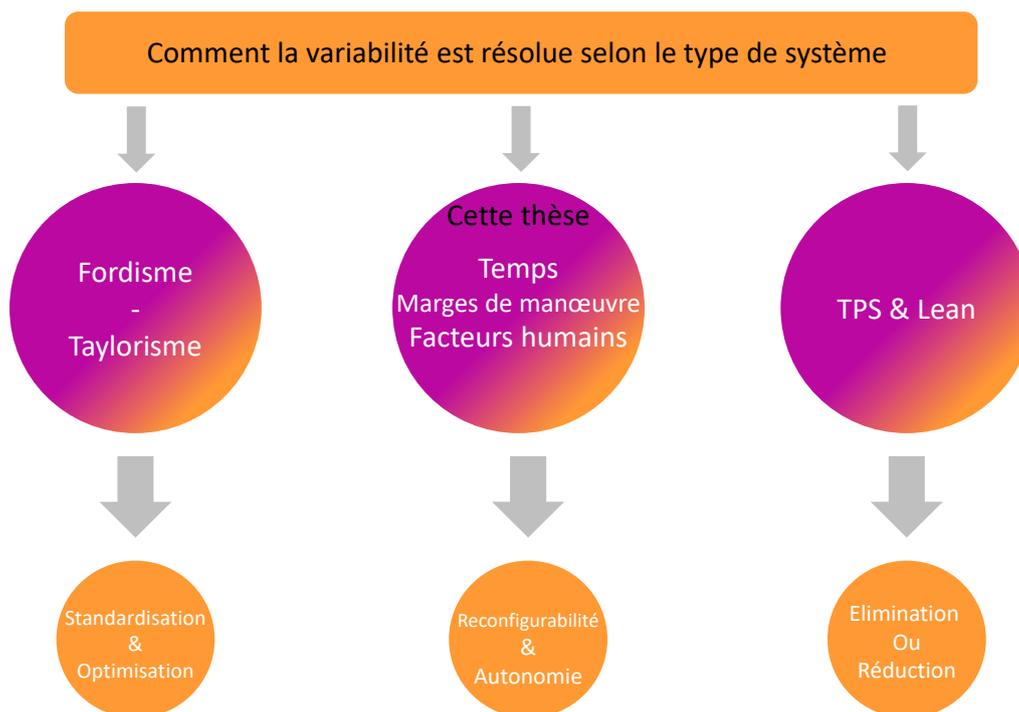


Figure 5. Variabilités et incertitudes dans les systèmes de production et comment elles sont résolues

Parmi les travaux de cette nouvelle école de pensée, on retrouve (El Mouayni et al., 2018) qui stipule que le meilleur moment pour prendre en compte les conditions de travail de l'opérateur et les marges de manœuvre est lors de la phase de conception du système de production. Selon ses travaux de thèse, la phase de conception est la plus importante et la plus simple pour prendre en compte ces aspects humains et les implémenter dans le système de production. Pour appuyer ces revendications, une solution outillée a été développée pour modéliser et simuler un système de production

qui prend en compte ces aspects lors de la phase de conception. Les résultats ont montré que la prise en compte des marges de manœuvre pendant la phase de conception permet d'améliorer les conditions de travail et la productivité (en termes de pièces produites) selon la situation étudiée.

Les limitations rencontrées pour cette étude peuvent être regroupées ci-dessous :

- L'étude est théorique et les résultats de la simulation n'ont pas pu être vérifiés dans un vrai système de production mais dans un atelier de production confectionné.
- Le simulateur peut gérer un seul type de produit, ce qui est loin d'être la réalité surtout dans un système de production flexible ou reconfigurable.

Une seconde étude a été réalisée dans le but de réduire la rigidité de systèmes de production (Petronijevic et al., 2019). A l'inverse des travaux précédents qui sont implémentés lors de la phase conception, ces travaux sont implémentés sur un système de production existant (phase opérationnelle). Selon les auteurs, la rigidité des systèmes est causée par l'élimination des gaspillages, le contrôle des temps de cycle et la présence d'un nombre de tâches importants. Malgré le fait que l'opérateur est au centre du système de production il reste généralement écarté et rarement pris en compte lors de la définition du système de production. Dans les rares occasions où il est pris en compte, il est simplifié pour faciliter les phases de conception et l'implémentation. Le but de cette étude est une méthode d'allocation des marges de manœuvre qui prend en compte les facteurs humains dans un système de production variable et incertain, dans le but de donner plus de flexibilité et d'autonomie aux opérateurs sans pour autant réduire la productivité (voire l'améliorer dans certains cas).

Les limitations rencontrées pour cette étude peuvent être regroupées ci-dessous :

- L'étude se base principalement sur l'optimisation et la simulation et les résultats n'ont pas pu être vérifiés dans un système de production réel.
- Le modèle prend en compte 2 types de produits et 2 opérateurs seulement.

IV. Verrous scientifiques et technologiques

Pour définir la question scientifique, il faut d'abord identifier les verrous scientifiques et technologiques qui bloquent l'avancement de la thèse. Un ensemble de méthodes et modèles est nécessaire pour arriver à répondre à la question scientifique. Cette partie est étudiée plus en détails dans le chapitre de recherche bibliographique. En effet, après avoir identifié les différents aspects de la thèse et réaliser une étude de la littérature existante pour chacun de ces aspects, les verrous scientifiques et technologiques sont identifiés plus en profondeur.

Les verrous scientifiques et technologiques peuvent être regroupés comme suit :

- Quantifier les incertitudes et variabilités

- Modéliser et quantifier les facteurs humains pour représenter un opérateur
- Prendre en compte les marges de manœuvre
- Etudier les relations liant des paramètres entre eux
- Définir les paramètres des opérateurs et du système de production les plus intéressants à l'étude des temps non productifs, les facteurs humains et les marges de manœuvre
- Développer un modèle qui gère ces multitudes de paramètres communs et uniques et prend en compte un grand nombre d'acteurs et de paramètres
- Simuler le modèle développé
- Simplifier le changement de paramètres du modèle pour permettre de mettre en place et simuler plusieurs scénarios

V. Questions scientifiques de recherche

L'un des objectifs de cette thèse est d'étudier les types de variabilité et leurs impacts sur le système de production (opérateurs, machines, temps de cycle, etc.). Pour cela, il faut d'abord identifier les types de variabilité présents dans le système de production. Ensuite, identifier les différents critères qui donne de la valeur ou de la non-valeur à un type de variabilité, et ainsi à l'activité qui lui est liée, pour enfin, pouvoir étudier l'impact de ces variabilités sur le système de production et ses différents acteurs.

Le reste des objectifs de la thèse peuvent être regroupés comme suit :

- Le développement d'une méthodologie systémique d'aide à la décision capable de gérer plusieurs données liées à un système de production dans le but d'aider les industriels à transformer un système rigide en un système flexible
- La prise en compte de l'incertitude de l'Humain et du système de production
- Le traitement de données lorsque le nombre de paramètres, variables et acteurs est important (plusieurs opérateurs, types de produit, machines, flux d'information, etc... Avec des caractères individuels et la possibilité de les modifier séparément)
- La personnalisation, adaptabilité et facilité de mise en place de la méthodologie et de l'outil pour permettre la modélisation de plusieurs scénarii ainsi que de permettre des changements en temps-réel (aspect de reconfigurabilité)

Ces objectifs ont permis d'identifier la question scientifique à laquelle la thèse souhaite répondre :

Comment implémenter les paramètres du système de production, les facteurs humains et les marges de manœuvre pour identifier, réduire et exploiter les temps non productifs dans le but d'anticiper les incertitudes et variations du système pour améliorer la productivité, la reconfigurabilité et les conditions de travail ?

VI. Méthodologie de recherche employée

La nature des recherches appliquées nous oblige à suivre une méthodologie de recherche itérative. En effet, dans la recherche appliquée, il est nécessaire de tester les concepts, méthodes et outils développés dans la phase de développement pour découvrir, identifier et résoudre les obstacles qui peuvent subvenir à ce niveau. Pour cela, la méthodologie de recherche adoptée se divise en 4 catégories : les 3 piliers de la thèse c'est-à-dire : la productivité, les facteurs humains et les marges de manœuvre + le modèle et la simulation. Chacune de ces catégories est ensuite divisée en 3 phases : La phase de développement, la phase d'expérimentation et la phase d'analyse (voir Figure 6). La phase de développement débute généralement avec une recherche bibliographique et un état de l'art de la catégorie étudiée pour définir les périmètres et identifier les lacunes ainsi que le besoin de méthodes et outils. La phase d'expérimentation permet de tester ces méthodes et outils développés depuis les premières phases ce qui permet de découvrir les défauts tôt dans la phase de conception et ainsi les améliorer. Cette phase permet aussi d'étudier l'efficacité et la maturité des méthodes développées. La phase d'analyse permet d'étudier les résultats des méthodes et outils développés et leurs implémentations et de les optimiser.

Grâce à cette méthodologie de recherche, les phases de développements et d'expérimentation peuvent être réalisées en se rapprochant des partenaires industriels, et ainsi profiter d'un second point de vue, ainsi que de leur expertise dans le domaine, dans le but de développer des méthodes et outils qui se rapprochent de la réalité et qui auront une utilité dans des cas réels. La phase d'analyse est généralement réalisée sans l'expertise de l'industriel. En effet, en plus de la phase de développement, cette phase est aussi la contribution de la thèse. Ce type de méthodologie de recherche permet d'aboutir à des résultats plus concrets et plus utilisables, car les partenaires industriels participent activement à la phase de développement depuis son début et sont, ainsi, beaucoup plus enclins à utiliser les outils développés. Ça leur permet aussi d'avoir une nouvelle vision extérieure à laquelle ils n'y avaient peut-être pas encore pensé.

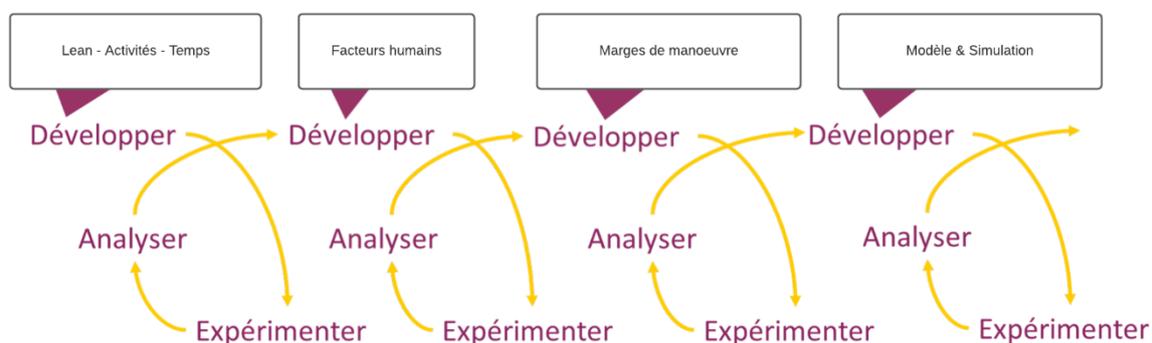


Figure 6. Boucle itérative de recherche

Cette approche itérative liant à la fois la science et l'industrie permet d'avoir des retours d'expérience immédiats. En effet, la collaboration entre un laboratoire de recherche et

un partenaire industriel permet de confronter les concepts scientifiques développés directement à la réalité industrielle pour les étudier et les analyser dans le but de développer une méthode, un outil ou un procédé fiable. Ce type d'approche de recherche appliquée en collaboration a des avantages par rapport à la recherche fondamentale : elle permet d'introduire les industriels à de nouveaux concepts grâce à la R&D et de les impliquer dans leur développement, ce qui permet de réaliser des méthodes qui ont été testées dans la réalité, ce qui lui donne plus de légitimité dans la littérature scientifique et avec les industriels

VII. Contributions souhaitées

Comme discuté précédemment, cette thèse est la suite logique de travaux précédents réalisés au sein du LCFC. Même si elle partage des motivations similaires à ces travaux passés, les objectifs, et par extension, les contributions sont différentes. Les facteurs humains ont été étudiés de manière séparée, notamment en 2018 et 2019 par (El Mouayni et al., 2018; Petronijevic et al., 2019). Cependant, à notre connaissance, aucune étude exhaustive, modulaire et large n'a été réalisée, en se basant sur un modèle qui traite à la fois les facteurs humains, les activités et leurs temps, les marges de manœuvre et les différents paramètres du système de production d'une façon « plug-and-play » à un certain degré, avec une certaine mise en place préalable (modularité et facilité de changements de paramètres) et avec une approche « what-if » (choix des situations et scénarii).

Pour atteindre cet objectif de réaliser un modèle suffisamment exhaustif, modulaire et flexible, et dû à la nature des recherches appliquées réalisées, deux types de contributions doivent être accomplies : des contributions de types scientifiques et des contributions de types technologiques. Une synthèse de ces contributions est présentée ci-dessous. Les contributions sont présentées plus en détails lors de chacun des chapitres qui les traitent.

1. Contributions scientifiques

Les contributions scientifiques peuvent être récapitulées comme suit :

- Réaliser l'état de l'art au niveau des systèmes de production, des facteurs humains, des activités et leurs temps et des marges de manœuvre
- Développer une méthodologie d'aide à la décision grâce à l'approche « what-if » et au niveau de détails des résultats
- Prendre en compte plusieurs acteurs : opérateurs, machines et systèmes de production avec leurs différents paramètres (facteurs humains pour les opérateurs, paramètres de fabrication pour les machines et les systèmes de production, par exemple) et les différentes interactions entre eux (interactions physiques ou transfert d'information)
- Quantifier les différents paramètres et leurs interactions (la nature des données qualitatives des facteurs humains, par exemple)

- Prendre en compte les incertitudes, les variabilités et les événements aléatoires au niveau du modèle
- Développer un modèle complexe se basant sur une multitude de composants et relations élémentaires simples et modulaires (facilité d'amélioration et d'ajout de nouveaux blocs par la suite)
- Prendre en compte de plusieurs aspects de la production sur un grand nombre d'acteurs
- Avoir à la fois une vue globale sur l'ensemble du système de production et une vue détaillée sur ses différents acteurs, paramètres et évolutions.

2. Contributions technologiques

Les contributions technologiques peuvent être récapitulées comme suit :

- Réaliser des scénarii et allocations différents pour traiter plusieurs possibilités aussi appelées « what-if »
- Prendre en compte l'incertitude, les variabilités et autres événements aléatoires au niveau du simulateur
- Etudier la variance de la solution via une approche de simulations répétées à cause de l'existence d'incertitude et variabilité
- Identifier exactement les éléments critiques du système de production
- Développer un simulateur modulaire et flexible, et prendre en compte plusieurs niveaux de modifications et un grand niveau de détails

VIII. Plan de la thèse

Le manuscrit de la thèse est organisé conformément à la méthodologie de recherche et des questions scientifiques identifiées. L'organisation de la thèse est synthétisée sur la Figure 7.

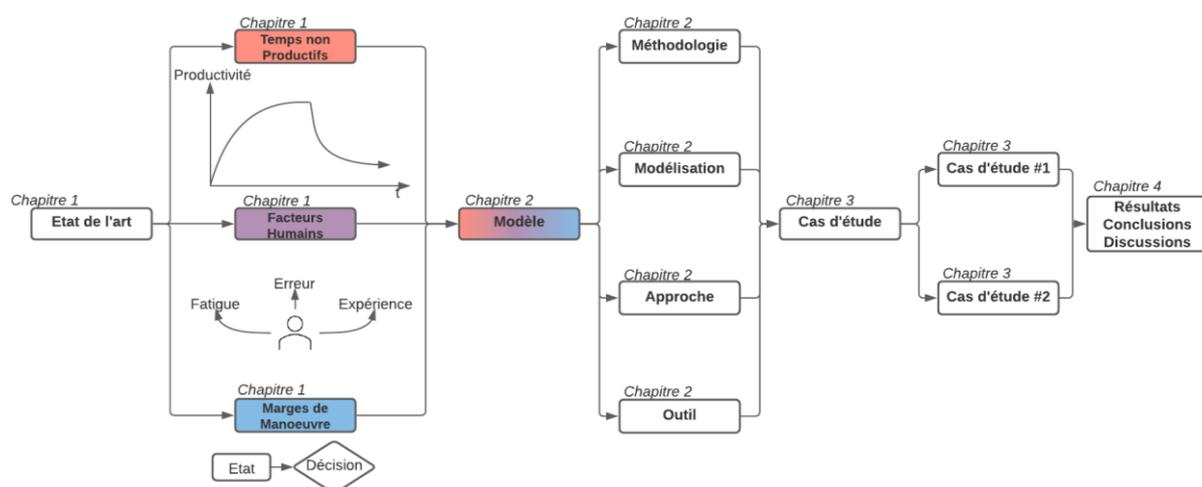


Figure 7. Plan visuel de la thèse

Le reste du manuscrit de cette thèse est organisé comme suit (voir Figure 7) :

Le chapitre 1 sert d'état de l'art pour la recherche bibliographique réalisée et se compose des 4 catégories discutées lors de la méthodologie de recherche, c'est-à-dire, les 3 piliers que sont : la productivité, les facteurs humains et les marges de manœuvre, ainsi que la 4ème catégorie qui est le modèle qui sert à regrouper tous ces concepts, et l'approche pour l'exploiter. Ce premier chapitre se conclut par la synthèse de la recherche bibliographique effectuée.

Le 2ème chapitre permet de présenter le modèle et l'approche développés. Ces deux aspects sont discutés en premier lieu avec une vue globale pour cerner l'objectif de chacun, ensuite avec une vue détaillée pour découvrir les différentes parties qui contribuent à leur fonctionnement. Ensuite, l'une des approches et des outils identifiés lors du 1er chapitre sont choisis, et leurs choix sont justifiés. Finalement, ce chapitre se conclue par une évaluation du modèle ainsi conçu pour estimer son efficacité.

Le 3ème chapitre permet d'utiliser le modèle et l'outil développés dans des cas d'étude réels. Cette partie permet de valider ce qui a été réalisé et d'augmenter la légitimité des résultats trouvés à la fois d'un point de vue scientifique et industriel. Elle permet aussi de valoriser le travail effectué en l'appliquant directement sur des cas d'étude. D'autant plus que les 2 cas d'étude sont similaires sur certains aspects ce qui permet de les comparer, et différents sur d'autres aspects ce qui permet d'étudier la flexibilité du modèle et de l'outil. Les cas d'études sont aussi complexes permettant de pousser le modèle, et ainsi étudier ses limites. Lors de ce chapitre, plusieurs aspects sont définis, identifiés et étudiés. Chaque cas d'étude est d'abord défini et mis en scénario. Les données sont ensuite collectées et la première simulation est réalisée pour identifier les points d'amélioration possibles. Plusieurs scénarii sont identifiés et simulés pour étudier leurs impacts sur le cas étudié. Enfin, les résultats sont analysés et une conclusion est développée.

Enfin, le manuscrit de cette thèse se termine avec une partie de conclusions, limitations et perspectives pour clôturer les travaux réalisés, les analyser avec une vision objective et définir les limitations et les perspectives d'amélioration possibles en se basant sur les limitations identifiées.

L'annexe est utilisée pour montrer le fonctionnement de l'outil développé et son utilisation grâce à un manuel d'utilisation et autres dispositions nécessaires. Les parties du code sont expliquées dans l'annexe, ainsi que les différentes comparaisons réalisées pour choisir l'approche et l'outil. Enfin, les réalisations scientifiques sont récapitulées.

Chapitre 1 : Recherche bibliographique

Résumé

Les systèmes de production sont en constante évolution. Dernièrement, l'évolution se dirige vers une alliance des approches en visant à la fois une amélioration de la productivité tout en améliorant les conditions de travail et la santé et sécurité de l'opérateur dans un système de production. À la suite de cette évolution, une nouvelle branche d'étude appelée « facteurs humains » est créée, premièrement dans la communauté d'ergonomie, puis dans la communauté d'ingénierie. Cette dernière a visé à quantifier et modéliser en se basant sur la maxime « Si on ne peut pas le mesurer, on ne peut pas le gérer ». Le suivi des facteurs humains via des méthodes mathématiques permet de mieux comprendre ses interactions dans un système de production, ce qui donne lieu à de meilleurs résultats. En effet, la prise en compte des facteurs humains, certes, permet d'améliorer les conditions de travail de l'opérateur dans un système de production, mais il permet aussi d'améliorer les performances de l'entreprise dans le court et le long terme. L'un des moyens de mesurer et de gérer les facteurs humains sont les marges de manœuvre. Ce nouveau principe suggère qu'il est important de donner une certaine indépendance (jusque-là peu existante dans les systèmes de production) aux opérateurs. Cette indépendance peut être allouée au niveau temporel, au niveau spatial ou au niveau organisationnel. Contrairement aux systèmes de production précédents qui se basent sur la parcellisation du travail et son appauvrissement, ce nouveau concept se base sur l'enrichissement des tâches et la confiance dans le choix des opérateurs à gérer leurs tâches de façon responsable et équilibrée, dans le but d'améliorer leurs conditions de travail et la performance industrielle.

Ce chapitre est dédié à une recherche bibliographique détaillée des différents concepts, méthodes et outils qui visent à répondre aux différentes questions scientifiques posées au niveau du chapitre précédent. Entre autres, ce chapitre permet d'étudier ces concepts, méthodes et outils pour identifier leurs points forts, leurs lacunes et les possibilités d'amélioration possibles à entreprendre lors de cette thèse.

Ce chapitre est divisé en plusieurs parties, chacune traitant un concept particulier dans le but de définir des réponses possibles pour les différents verrous scientifiques et technologiques identifiés précédemment. La recherche bibliographique commence par détailler les trois piliers principaux de la thèse dans la littérature scientifique, notamment : les temps non productifs, les facteurs humains et les marges de manœuvre. Ensuite, différentes études similaires qui proposent des méthodologies d'amélioration de la productivité, de la reconfigurabilité et des facteurs humains sont examinées et analysées. Ces différents aspects étant déjà présentés auparavant, l'identification et l'analyse des méthodologies peut être réalisée plus en détails permettant ainsi d'avoir une meilleure vue de chacune de ces méthodologies. Cette partie permet d'identifier les similarités et les différences entre les études existantes dans la littérature et l'étude actuelle. Une fois que les différents concepts identifiés et les méthodologies présentes dans la littérature étudiées, le but est d'identifier l'approche adéquate pour répondre aux questions de la thèse. Enfin, une synthèse du chapitre de recherche bibliographique est réalisée pour regrouper les points les plus importants qui serviront de points de départ pour réaliser le modèle et utiliser l'approche au niveau du chapitre 3.

1. Les trois piliers

Comme discuté dans l'introduction, le contexte actuel de l'industrie évolue dans la direction de la reconfigurabilité pour parvenir à répondre aux besoins du marché. Ce type de systèmes de production permet de se préparer aux fluctuations, variabilités et incertitudes du marché, ainsi que réduire les coûts de fabrication en visant à améliorer la réactivité du système de production grâce à sa reconfigurabilité (Prasad & Jayswal, 2018). Cette évolution pousse les systèmes de production à une fabrication à moyen volume et à grande variabilité (voir Figure 2). Certes, les machines et les systèmes de production automatiques sont très performants quand il s'agit d'exécuter des étapes simples et répétitives (Cheng et al., 2018) et les humains sont moins performants et plus soumis à des risques à cause de cette répétitivité (Botti et al., 2017). Cependant, quand il s'agit de fabrication à grande variabilité les humains ont un avantage, d'où la réapparition des systèmes de production orientés humain (Canetta et al., 2014). Cet avantage est d'autant plus large si ce type de système de production est implémenté en parallèle avec un outil numérique qui permet de tester différentes possibilités, allocations et façons d'attribuer les opérateurs, machines et produits, avant de les implémenter dans le système de production réel (Voir Figure 8) : l'un de ces outils peut être le jumeau numérique ou la simulation. Si on ignore le flux d'information (représenté par des pointillés de la Figure 8), et que le système de production dépend

uniquement du flux d'actions, il n'y aura aucun feedback ou bien le feedback sera en retard : après chaque décision prise par le Plan Directeur de Production et l'équipe de planification en prenant en compte les demandes de l'ERP, il faut attendre une durée assez conséquente pour avoir les résultats de l'action entreprise, ce qui engendre des pertes si la mauvaise décision est prise. En revanche, si on implémente une solution numérique, un jumeau numérique dans cette situation, un nouveau plan d'information parallèle au plan d'action permet d'avoir une estimation des résultats avant même leur implémentation, permettant d'éviter les mauvaises décisions et d'anticiper les bonnes.

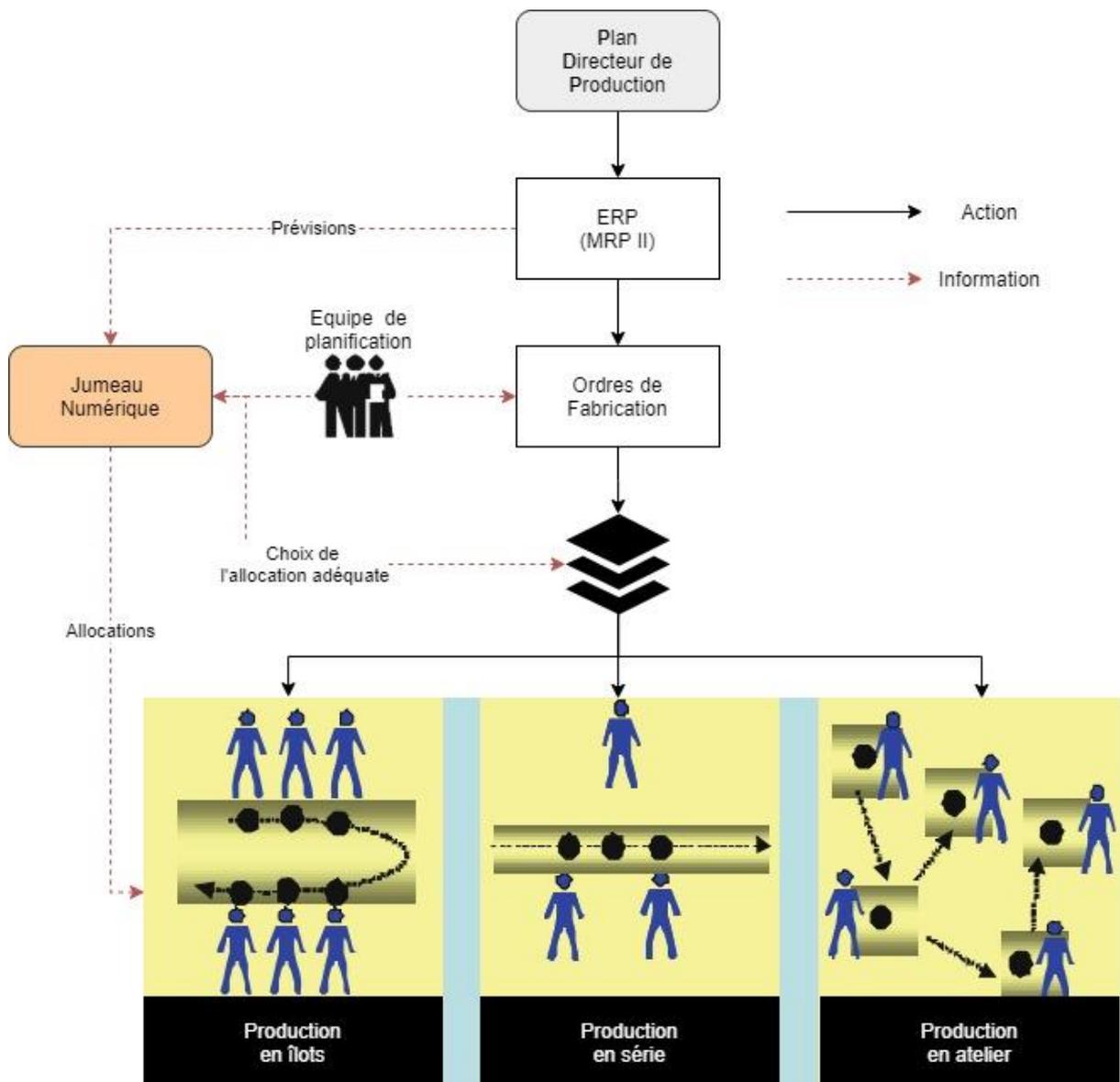


Figure 8. Importance de l'humain et d'un outil numérique dans un système de production reconfigurable (adapté de (Canetta et al., 2014))

Pour ces raisons, la thèse se concentre sur trois piliers principaux et fondamentaux en plus d'une approche numérique (Voir Figure 9). Le chapitre suivant sert à expliquer en détail le choix de chacun de ces piliers, ainsi que l'approche numérique, en se basant sur la littérature et les travaux précédents.

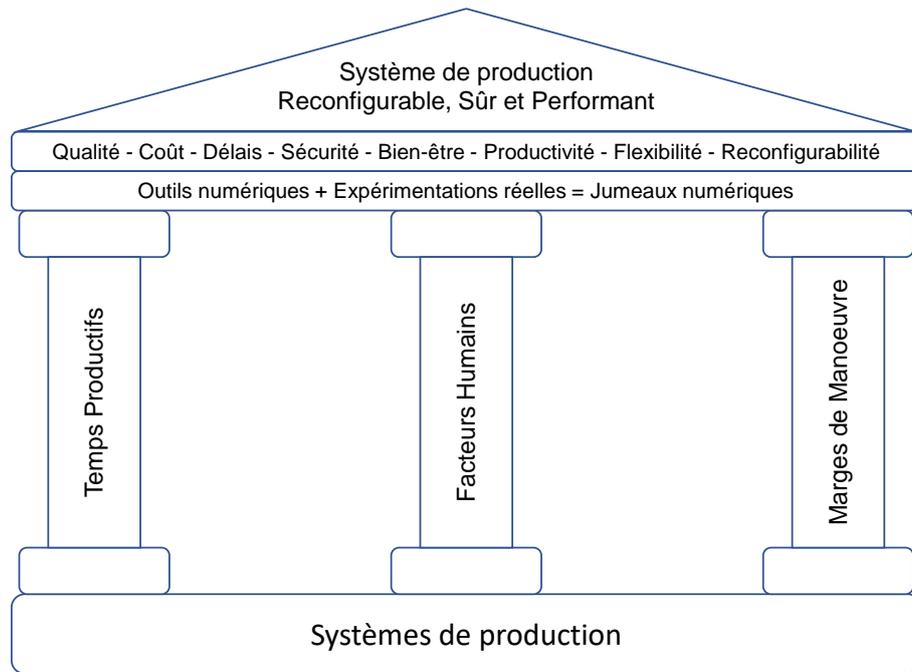


Figure 9. Structure de la thèse

II. Premier pilier : La productivité et la quantification des temps de production

En se basant sur l'évolution des systèmes de production, on remarque une tendance : l'amélioration de la productivité dans le but d'augmenter les profits. La productivité est ainsi étroitement liée au profit. Cependant, la définition du profit peut varier d'une époque industrielle à l'autre. Pour la majorité des époques, le profit est défini par la maximisation des sommes d'argent gagnées. En revanche, pour les nouvelles époques et plus précisément pour la production durable, le profit prend en considération le profit selon plusieurs angles tels que le bien-être de l'opérateur ou la durabilité (Laperche & Uzunidis, 2011). Cette partie du chapitre vise à identifier les définitions des productivités dans la littérature puis montrer le besoin d'une nouvelle définition de la productivité. Ce chapitre étant orienté sur l'aspect recherche bibliographique, il sert à identifier les arguments en faveur d'une nouvelle définition de la productivité en se basant sur les études existantes dans la littérature, alors que la nouvelle définition de la productivité est déterminée plus en détails au chapitre 2 (Définition des Temps non Productifs).

A travers les époques de la révolution industrielle, l'une des constantes est toujours la productivité : comment gagner plus d'argent en réduisant les coûts, en améliorant la qualité, en réduisant les gaspillages, en gérant mieux les ressources humaines ? A chaque étape de la révolution industrielle, un nouvel aspect d'amélioration de la productivité est identifié. Ces changements sont, en général, causés par des évolutions au niveau du marché et de leurs demandes, en revanche le but ultime reste constant : augmenter les profits. Par exemple, l'aspect d'amélioration de la productivité lors de l'époque du Fordisme et du Taylorisme était la division en étapes élémentaires, la

standardisation et la répétabilité (Coutarel, 2004). Ou bien lors de l'époque du Lean, l'amélioration de la productivité était surtout orientée au sens de la qualité (la devise du Lean : « Faites-le bien la première fois, à chaque fois ») et la minimisation des gaspillages d'où vient le terme Lean, qui veut dire mince en anglais (Gopinath & Freiheit, 2012). De nouveaux paradigmes permettent d'améliorer la productivité selon de nouveaux critères plus adéquats au marché et aux attentes d'aujourd'hui. Différents critères peuvent être mis en place pour améliorer la productivité des systèmes de production reconfigurables (les années 2000) ou des systèmes de production durables (les années 2010). Le but de cette étude bibliographique est d'identifier les points forts ainsi que les points faibles de chacun de ces critères d'amélioration pour pouvoir définir et construire un nouveau critère d'amélioration qui permet de répondre aux questions de cette thèse c'est-à-dire améliorer la productivité, les conditions de travail (facteurs humains) tout en prenant en compte les incertitudes du système.

1. Productivité à l'époque du Fordisme et Taylorisme

La première étape de la révolution industrielle peut être attribuée au Fordisme et au Taylorisme qui se basent principalement sur un management scientifique. Pour améliorer la productivité, un nouvel objectif est mis en place : le but est de trouver une solution à la répartition des tâches et à leur accomplissement. La solution est alors de simplifier le plus possible les différentes tâches de production à leurs étapes élémentaires et d'allouer un opérateur à chacune de ces tâches. Cette solution se base sur la séparation du rôle intellectuel qui conceptualise et répartit les tâches, et le rôle exécutif qui réalise les tâches (Coutarel, 2004). Le premier aspect de l'amélioration de la productivité peut être défini comme la subdivision des tâches en différentes opérations (Taylorisme), ensuite en plusieurs étapes élémentaires (Fordisme). Cette subdivision est connue sous le nom de parcellisation de travail ou son appauvrissement et a été introduite et rendue célèbre par Ford. D'un point de vue technique, selon (Coutarel, 2004) la parcellisation du travail a plusieurs avantages tels qu'une meilleure lisibilité du travail et des opérations réalisées, un gain de surface non négligeable, un accroissement de la sécurité et l'avantage le plus important : une production augmentée. En revanche, d'un point de vue psychologique ou social (psychosocial), cette technique de travail a des effets qui sont à l'opposé pour les opérateurs.

D'un point de vue temps, le Fordisme et le Taylorisme comptaient sur la technique de travail (division en étapes élémentaires) pour définir et dicter une vitesse de production, selon un nouveau critère appelé « temps de cycle ». Ce temps de cycle était, cependant, dicté par les machines, et les opérateurs devaient obligatoirement suivre cette vitesse. Les étapes élémentaires sont divisées en sorte que chaque opérateur a plus ou moins le même temps pour réaliser la ou les étapes qui lui sont attribuées, on parle alors d'équilibrage de la chaîne de production. Cet équilibrage, souvent, donnait lieu à des allocations des opérateurs à des tâches qui ne sont aucunement reliées. Comme sera présenté plus tard (voir Modèles des facteurs humains étudiés, page 50) au niveau de la littérature psychosociale autour des facteurs humains, deux aspects contradictoires rentrent en jeu : (1) la familiarité des tâches et la répétition contribuent

à l'apprentissage et une réduction du temps nécessaire pour réaliser la même tâche, et (2) le mélange des tâches sert à améliorer la motivation des opérateurs et à réduire leur lassitude (Salvendy, 2012). On constate, alors, qu'il faut trouver un compromis entre ces deux forces opposées. D'une part, la diversité des tâches joue un rôle dans l'amélioration de la motivation de l'opérateur, et d'une autre part, la répétition de tâches similaires joue un rôle dans l'amélioration de l'apprentissage et la productivité.

2. Productivité à l'époque du Lean

L'époque de la production de masse a duré plusieurs décennies et a suivi plusieurs itérations en commençant par Taylor puis Ford et d'autres améliorations. Une nouvelle époque a vu le jour lorsque les ingénieurs de Toyota ont proposé un nouveau système de production basé sur la réduction des gaspillages, l'amélioration continue et la standardisation du travail (Figure 10). Ce dernier concept (la standardisation) est le seul reliquat de l'époque précédente. Ce changement radical peut être représenté par l'un des objectifs du TPS (Système de Production Toyota) qui est de donner de l'importance à la voix des opérateurs en les intégrant dans la prise de décision. On aperçoit alors un effort envers l'intégration de l'Humain dans les systèmes de production, qui jusque-là était inexistante, voire indésirable (la séparation des rôles exécutifs et intellectuels).

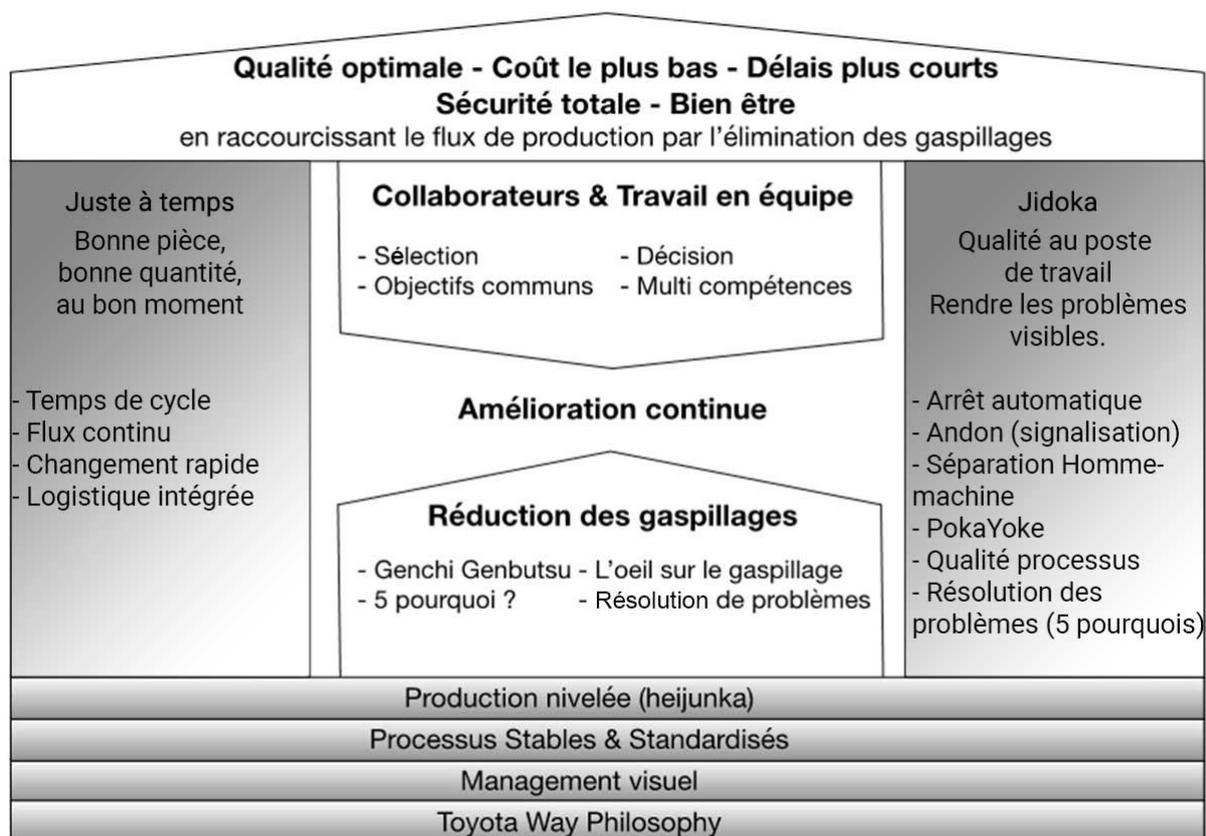


Figure 10. Les bases et piliers du système de production de Toyota (adapté de (Liker, 2008))

Avec l'ouverture des différents marchés à l'international et la fin de la 2ème guerre mondiale, la compétition devient plus féroce et le Japon se retrouve appauvri et avec

un grand taux de chômage (Plenert, 2010). Les raisons exactes de la conception du système de production de Toyota (TPS) restent incertaines, mais en dehors des causes sociales citées précédemment, les raisons techniques peuvent être regroupées en un manque de ressources naturelles, un appauvrissement suite à la 2ème guerre mondiale et donc une incapacité à construire de grandes entreprises et usines, et une inaptitude à fabriquer en masse (Plenert, 2010). Pour ces raisons, le Japon, et plus précisément Taiichi Ohno et Shigeo Shingo, deux ingénieurs industriels à Toyota, ont défini le TPS basé sur la réduction des gaspillages, ce système sera nommé Lean (mince ou maigre, en français) à la suite de son assimilation par les Américains. Ce nouveau système de production se base sur la réduction des gaspillages appelés « Muda » en Japonais. Plusieurs « Muda » ont été identifiés en utilisant le critère de la valeur. Chaque action ou tâche qui consomme des ressources sans donner de valeur est considérée comme gaspillage. Avec cette logique, 7 types de Mudas ont été identifiés :

- (1) La surproduction : il ne faut jamais produire plus que ce que l'entreprise va vendre, l'un des piliers du TPS appelé le juste-à-temps est basé sur ce principe.
- (2) L'attente : les tâches doivent être allouées de façon à minimiser l'attente entre elles.
- (3) Les déplacements et transports inutiles est un type d'attente où l'allocation physique peut être améliorée (contrairement à l'allocation temporelle du muda précédent), ce gaspillage consomme aussi de l'énergie de l'opérateur et augmente sa fatigue.
- (4) Les processus excessifs sont les processus complexes qui demandent un temps important pour être assimilés : il faut les simplifier.
- (5) Les stocks et inventaires, rejoignent la logique du premier muda et du juste-à-temps : il ne faut stocker que ce qui est nécessaire. En plus du stockage de produits, ce muda traite aussi le stockage des outils et ressources de production.
- (6) La non-qualité, les rebuts et les défauts : il faut viser la réalisation des pièces de bonne qualité du premier coup.
- (7) Les gestes et mouvements inutiles, souvent causés par une mauvaise gestion de l'espace de travail et un désordre au niveau de l'outillage.
- (8) Un 8ème Muda vient s'ajouter par la suite : le potentiel humain non-exploité, qui montre l'importance de l'humain dans le système de production : les opérateurs sont encouragés à partager leurs avis, expertises et améliorations, et ce non-partage est considéré un gaspillage (Womack & Jones, 2003).

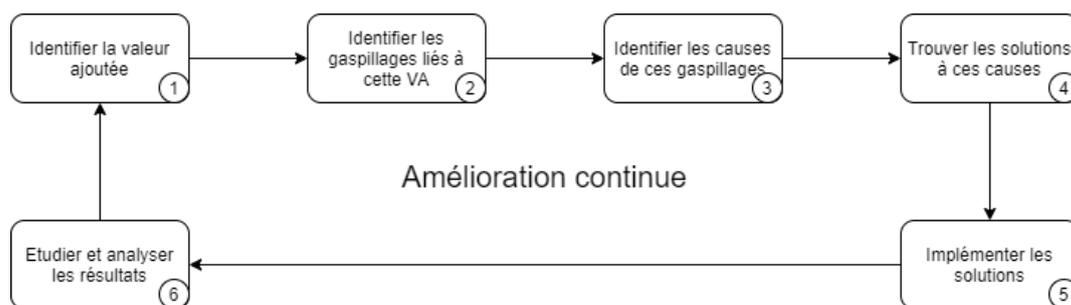


Figure 11. Méthodologie du Lean : amélioration continue

L'un des inconvénients les plus importants du Lean est la barrière d'entrée. En effet, le concept du Lean peut paraître simple, mais son implémentation demande un changement important à la structure et à la culture de travail de l'entreprise, ce qui résulte en un refus de la part des opérateurs (Gupta & Jain, 2013). Un travail important de la part du corps administratif et exécutif doit être réalisé pour impliquer la totalité du personnel et réussir l'implémentation du Lean. Il faut donc développer une méthodologie suffisamment simple d'implémentation à tous les niveaux hiérarchiques, tout en restant suffisamment complexe pour répondre aux besoins de la problématique. Il est aussi important de prendre en compte tous les gaspillages identifiés par le Lean, voire identifier d'autres types de gaspillages non-identifiés.

3. Productivité à l'époque post-Lean

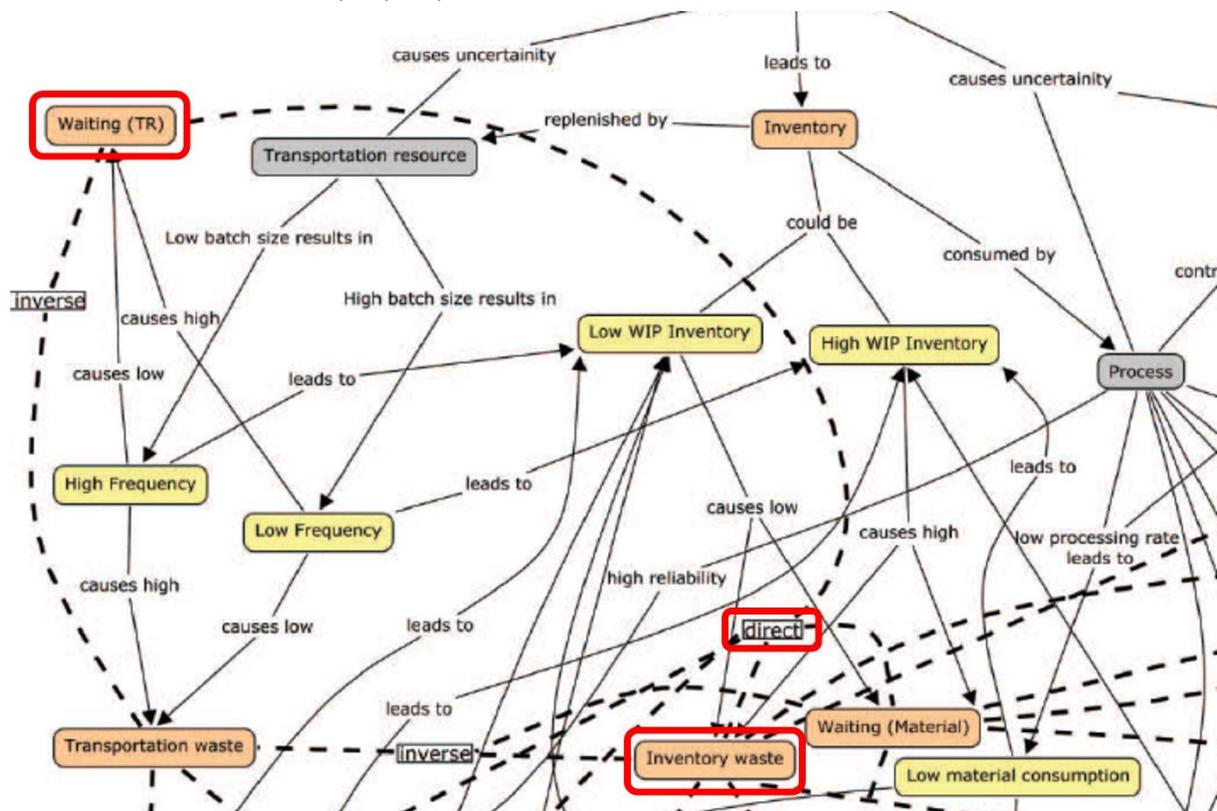


Figure 12. Partie du modèle de (Gopinath & Freiheit, 2012).

En rouge, les gaspillages de type attente et inventaire et la relation directe entre eux

Une tentative pour quantifier les aspects qualitatifs des gaspillages (Mudas) a été réalisée par (Gopinath & Freiheit, 2012). Dû au manque de métriques quantitatives simples pour mesurer les gaspillages et leurs influences sur le système de production, leur objectif est de créer une métrique centrale ou plusieurs métriques pour chaque gaspillage afin de mesurer et suivre l'évolution des gaspillages dans un système de production dans le but de rendre l'analyse de la performance du système de production plus simple, et ainsi faciliter la prise de décision. Les auteurs ont premièrement réalisé un modèle qui regroupe les 7 gaspillages. Ils ont ensuite identifié les causes ou déclencheurs de chaque gaspillage. Le modèle permet d'identifier les influences des gaspillages entre eux, qu'elles soient des influences directes ou indirectes, avec des

corrélations positives ou négatives. Par exemple selon eux, un gaspillage de type « attente » a une influence directe sur le gaspillage de type « inventaire » (Voir Figure 12). Le modèle complet est disponible en Annexe 1. Un modèle simplifié est présenté sur la Figure 13. Grâce à ces modèles, on peut conclure que les gaspillages sont liés et influencés, directement ou indirectement, par d'autres gaspillages ou par certaines activités. Ceci montre les bénéfices de se positionner selon une approche quantitative, contrairement aux approches qualitatives originales.

(Gopinath & Freiheit, 2012) puis (Pakdil & Leonard, 2014) et enfin (Cortes et al., 2016) regroupent les gaspillages et essaient de les quantifier avec une métrique mathématique. Le Tableau 3 regroupe les gaspillages et leurs métriques. Plus de détails sur les définitions, les métriques et les plans d'action peuvent être retrouvés en annexe pour mieux les identifier, les quantifier et les réduire. Ces données sont utilisées comme base pour le développement du modèle de manière quantitative. Le modèle et les données d'entrée sont expliqués plus en détails lors du chapitre du développement du modèle.

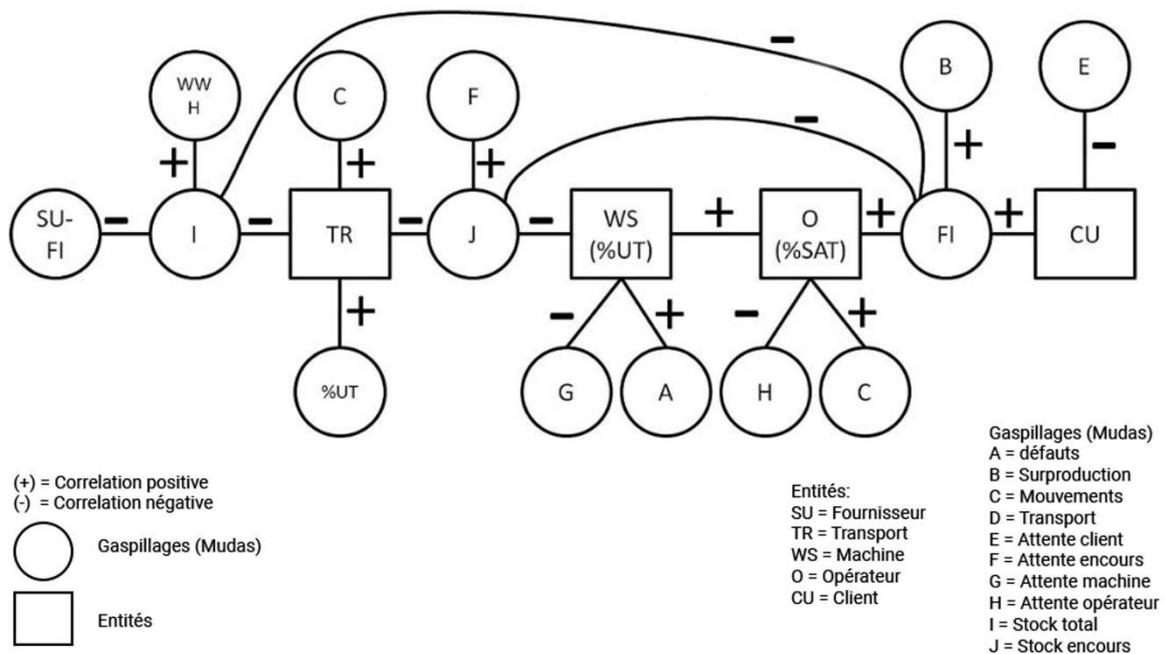


Figure 13. Modèle simplifié de (Gopinath & Freiheit, 2012).

Tableau 3. Gaspillages et leurs métriques (Adapté de (Cortes et al., 2016))

Gaspillage	Métrique	Utilité de la métrique	Paramètres
Attente (Client)	$\frac{T_A}{T}$	Pourcentage du temps d'attente du client	T_A Temps d'attente T horizon de temps choisi
Attente (Opérateur)	$1 - \left(\frac{T_A + T_M}{T}\right)$	Pourcentage du temps d'attente de l'opérateur	T_A Temps d'attente T_M Temps de mouvement T horizon de temps choisi

Attente (En cours)	$\sum_{en\ cours} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N FA_i$	Temps d'attente des encours	FA_i La pièce en position i dans la file d'attente N le nombre de pièces dans la file d'attente
Attente (Machine)	$1 - \frac{\sum_{activités} T_{O_i}}{nT}$	Pourcentage du temps d'attente des machines	T_{O_i} Temps de l'opération i T horizon de temps choisi n nombre de machines
Déplacements ou mouvements inutiles	$\frac{T_D}{T}$	Pourcentage du temps passé en mouvement	T_D Temps passé en mouvement T horizon de temps choisi
Transports inutiles	$\frac{F T_T}{T}$	Pourcentage du temps passé en transport	T_T Temps moyen d'une action de transport F fréquence de transport sur la durée T T horizon de temps choisi
Stocks Inventaire (Tous)	et $\int_0^T S dt$	Métrique normalisée dans le temps du stock total	S stock total
Stocks Inventaire (encours)	et $\sum_{en\ cours} \frac{1}{T} \int_0^T E_i dt$	Métrique normalisée dans le temps des encours	E_i Encours i T horizon de temps choisi
Non-qualité (Défauts)	$\sum_{activités} \frac{D_i}{P}$	Pourcentage des défauts de la i -ème activité	D_i Nombre de pièces défectueuses lors de la i -ème activité P nombre total de pièces produites
Non-qualité (Rebut)	$\sum_{activités} \frac{R_i}{P}$	Pourcentage des rebut de la i -ème activité	R_i Nombre de rebut lors de la i -ème activité P nombre total de pièces produites

D'une part, on remarque que les métriques utilisées pour quantifier les gaspillages sont rudimentaires. D'autre part, cet aspect simple des métriques permet de les implémenter plus facilement dans des outils numériques (Cortes et al., 2016).

Selon (Gopinath & Freiheit, 2012), il est impossible d'éliminer les gaspillages entièrement à cause des dépendances des gaspillages entre eux et de leurs corrélations positives et négatives (la réduction d'un gaspillage peut entraîner l'augmentation d'un autre). Ils stipulent même que certains gaspillages sont essentiels au bon fonctionnement du système de production. Le concept de l'importance de certains gaspillages et activités à non-valeur ajoutée pour le bon fonctionnement du système de production et le bien-être de l'opérateur est l'une des hypothèses sur lesquelles se base

cette thèse. (Low et al., 2014) identifie ces activités et les nomme « Activités à non-valeur ajoutée mais nécessaires » (Activités à NVAN). En effet, ils stipulent que les activités à NVAN sont des activités à valeur-ajoutée (VA) indirecte, comme la mise en place et le serrage d'un moule, qui selon les normes Lean sont considérées comme étant des activités à non-valeur-ajoutée (NVA). Le Lean identifie seulement 2 types d'activités : à VA et à NVA, et recommande que ce deuxième type d'activités soit complètement éliminé. C'est cette démarche qui donne au Lean sa rigidité indésirable. Cette nouvelle définition vient rajouter un 3ème type d'activités, les activités à NVAN, qui doivent être seulement réduits et non entièrement éliminés, puisqu'il est impossible de les éliminer entièrement et parce que certaines d'entre elles sont importantes au bon fonctionnement du système de production et à sa flexibilité (Voir Figure 14).

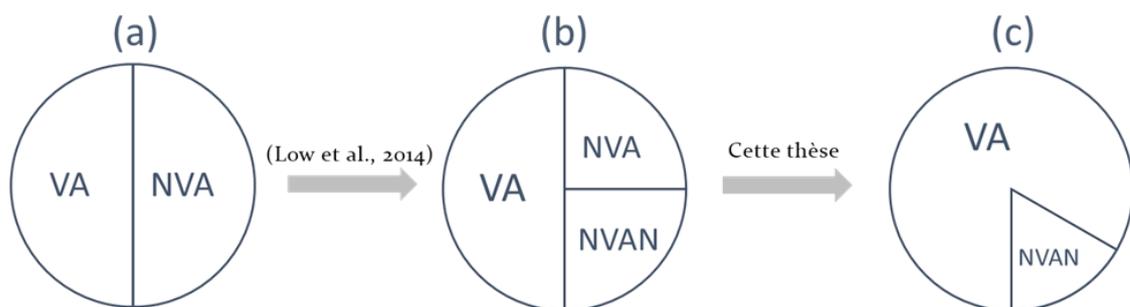


Figure 14. Evolution de la définition de valeurs selon les types d'activités. (a) le paradigme de base prend en compte uniquement les valeurs ajoutées et les non-valeurs ajoutées. (b) Paradigme proposé par (Low et al., 2014) en ajoutant la non-valeur ajoutée mais nécessaire. (c) Paradigme proposé par les travaux de cette thèse : réduire la NVAN et éliminer la NVA.

L'une des améliorations du Lean est la simplification de l'implémentation. En effet, (Gopinath & Freiheit, 2012) identifient ce qu'ils appellent « Métrique du Point Central de Pivot », selon cette métrique le gaspillage le plus impactant sur le système de production est le temps d'attente des machines. Cette unique métrique permet d'avoir une vue globale sur la performance du système de production, planifier la mise en place d'un projet Lean et la prise de décision. C'est donc la métrique qu'il faut impérativement surveiller. Le bénéfice de cette métrique est la simplification de l'implémentation du Lean qui peut être très demandeur en termes de ressources humaines et financières (Gupta & Jain, 2013). En effet, une entreprise peut commencer par cette métrique, puis décider de l'achèvement du projet de Lean. D'un autre point de vue, (Pakdil & Leonard, 2014) regroupent plusieurs études qui identifient d'autres métriques importantes à observer. Certaines stipulent que la métrique la plus importante à observer est le « Lead Time », ou bien le temps nécessaire, du début jusqu'à la fin, pour l'achèvement de toutes les activités nécessaires pour la production (Karlsson & Åhlström, 1996). D'autres expliquent que le temps de cycle est le plus important car il permet une flexibilité accrue dans le but de répondre à la variation du marché (Li & Rong, 2009). D'autres encore stipulent que le temps de changement de série est la métrique à considérer car cette dernière impacte directement la surproduction, et ainsi permet de rendre le système de production plus Lean (P. & F., 2013). Il existe plusieurs autres études qui stipulent d'autres métriques comme le Takt

time, le temps d'arrêt machine ou d'autres indicateurs de qualité tels que la TQM ou le KM (Lehyani, 2020). Les critères de choix de ces métriques étant différents, il est important de bien étudier le système de production avant de choisir la ou les métrique(s) dans le but de les implémenter dans le modèle développé. En effet, lors du développement du modèle, il est impossible de suivre toutes les métriques pour des raisons de limitations du modèle mais aussi parce que l'aide à la décision serait plus difficile si le nombre de métriques est trop important. Le choix de métrique est alors situationnel (Geneste, 1995).

Pour conclure, le premier pilier de la productivité et du temps a été traité de plusieurs façons différentes selon l'ère et selon la logique choisie. Cette partie a permis d'identifier ces manières d'analyser et de quantifier la productivité, en commençant par la manière la plus classique du profit qui divise les tâches en leurs étapes élémentaires et en les standardisant, en passant par la manière Lean qui prend en compte les activités. Cette dernière s'est avérée insuffisante, et certaines tentatives d'améliorations ont été réalisées comme celle de (Gopinath & Freiheit, 2012) qui ont quantifié ces activités et ont développé un modèle pour étudier les relations entre chacune des activités. Ils stipulent aussi l'existence de certains gaspillages qui ne peuvent être éliminés, voire qui sont importants pour le bon fonctionnement du système de production. Enfin, (Low et al., 2014) ont défini ce nouveau type d'activités : activités à non-valeur-ajoutée mais nécessaires (NVAN). Par conséquent, le choix des métriques est situationnel et dépend du système étudié. Il est alors important de choisir des métriques en adéquation avec les objectifs souhaités. Toutefois, il est possible d'améliorer certains systèmes existants dans le but d'améliorer un aspect en particulier (comme les travaux de (Gopinath & Freiheit, 2012)). En ce qui concerne cet aspect de temps, les travaux de cette thèse suivent une démarche similaire à cette dernière dans le but d'améliorer la définition des temps et la façon de les quantifier, les calculer et les améliorer.

III. Deuxième pilier : Les facteurs humains

1. Pourquoi les facteurs humains ?

Les TMS (Troubles Musculosquelettiques) engendrent un problème direct pour les travailleurs. En effet, c'est la maladie professionnelle la plus répandue en France avec un pourcentage de 70% en 2002 (Coutarel, 2004), au Canada (Durand et al., 2008) et dans le reste du monde (Coutarel, 2004). Il est donc important de traiter ce sujet dans cette thèse, car il a des enjeux sérieux sur un grand nombre de personnes, et sa prévention permettrait une amélioration de la qualité de travail et de vie de ces personnes.

En plus des répercussions sur la santé des travailleurs, ces facteurs de stress peuvent entraîner des conséquences sur la productivité, et ainsi sur les profits de l'entreprise. Dans un premier temps, les entreprises ont un intérêt économique de garder les employés en bonne santé, contents et motivés (Salvendy, 2012). Ceci a pour effet d'augmenter la productivité, réduire l'absentéisme et le turnover. Dans un deuxième

temps, les employés angoissés, passifs ou agressifs sont moins motivés et plus susceptibles à s'absenter, à quitter leur travail ou à produire moins. En conséquence, si des troubles surgissent, une certaine résistance peut se développer, réduisant ainsi la motivation et la productivité. Ces répercussions économiques ont un impact direct sur l'entreprise mais aussi sur la macroéconomie. Selon (Salvendy, 2012), la baisse de productivité et la hausse de l'absentéisme de ce type d'employés suscite une baisse de 10% du produit national brut.

Maintenant que les effets des conditions de travail médiocres sur la santé des travailleurs, sur les profits de l'entreprise mais aussi sur l'économie du pays sont examinés, il est important d'identifier ces conditions de travail, ce qui les influence et impacte, de manière directe ou indirecte. Ceci dans le but de mieux comprendre ces interactions et de proposer une solution qui a pour objectif de les améliorer.

2. Les catégories de facteurs humains dans la littérature

Le Tableau 4 regroupe les approches considérées les plus utilisées dans les systèmes de production, les recommandations pour les implémenter, les avantages qu'ils offrent et les coûts (financiers, physiques et mentaux) qu'il faut payer pour chaque approche. Il existe plusieurs approches dans la littérature scientifique qui sont des résultats directs de l'évolution des systèmes de production.

L'approche classique est la plus simple et la moins coûteuse à implémenter pour le personnel. Les temps de formation sont réduits. Les exigences de rémunération peuvent être moindres parce que les compétences (physiques et cognitives) nécessaires et les responsabilités sont réduites. De plus, les erreurs peuvent être moins fréquentes. Quant aux inconvénients, l'utilisation de l'approche classique peut aboutir à des emplois si simples et si routiniers que les opérateurs éprouvent une faible satisfaction et motivation au travail. Un travail excessivement physique et répétitif peut entraîner des problèmes de santé tels que des TMS.

Les premiers efforts visant à améliorer la satisfaction des opérateurs au travail étaient l'inverse de la parcellisation et la spécialisation du travail. Certaines études recommandent d'ajouter des tâches au travail initial avec un même niveau de responsabilité ou un niveau de responsabilité supérieur dans le but d'améliorer l'implication et la satisfaction de l'opérateur ((Ford, 1969; Herzberg, 1966) comme cités dans (Salvendy, 2012)).

Tableau 4. Recommandations, avantages et coûts de différentes approches de production (adapté de (Salvendy, 2012))

Approche	Recommandations		Avantages		Coûts	
	Augmentation	Réduction	Augmentation	Réduction	Augmentation	Réduction
Classique (Parcellisation et appauvrissement)	Spécialisation Simplification Répétition	Temps libre		Formation Problèmes de recrutement Erreurs humaines Fatigue mentale Indemnisation	Absentéisme Lassitude	Satisfaction Motivation
Organisationnelle (Psychologique)	Diversité Autonomie Importance Usage des compétences Implication Feedback Reconnaissance Développement de carrière Accomplissement		Satisfaction Motivation Implication Performances Services client Attention face aux erreurs	Absentéisme Turnover	Temps de formations Coûts de formations Erreurs humaines Stress mental Stress physique Compétences cognitives Indemnisation	

Facteurs Humains (Global) (Peut aussi être cognitif)	Qualité d'éclairage Qualité de contrôles Interface Homme- Machine	Exigences cognitives		Erreurs humaines Accidents Stress mental Stress physique Temps de formation Coûts de formation Problèmes de recrutement Indemnisation Compétences cognitives	Lassitude	Satisfaction
Biomécanique Ergonomique (Local) (Uniquement physique)	Confort assis Confort de posture	Force requise Endurance requise Facteurs de stress environnementaux		Compétences physiques Fatigue Maux Incidents	Coûts financiers Inactivité	

Contrairement à l'approche classique, l'approche sociotechnique ne se concentre pas uniquement sur le travail mais aussi sur les technologies et l'environnement de travail et son organisation. Selon ((Pasmore, 1988) comme cité dans (Salvendy, 2012)), la hausse de la complexité des systèmes de production doit impliquer une flexibilité plus élevée, une implication plus grande des opérateurs, la décentralisation de la prise de décision, la réduction des structures hiérarchiques et la formalisation des procédures.

Enfin, l'évolution actuelle des approches se retrouve avec l'Humain au centre du système de production, ce qui résulte en une approche orientée facteurs humains. Cette approche est le résultat de la fusion de plusieurs disciplines différentes dont l'ingénierie, l'ergonomie et la psychologie. Selon (Salvendy, 2012), cette approche cherche à fournir toutes les conditions nécessaires à l'Humain pour réaliser son travail. Ces conditions peuvent être aussi simples qu'un éclairage adéquat à la situation de travail ou aussi complexes qu'une bonne gestion de l'agencement du système de production (Lehyani et al., 2021). Le but de cette approche est d'améliorer la fiabilité, la sécurité au travail et la satisfaction des opérateurs. Les systèmes de production conçus selon cette approche déclarent une baisse de taux d'erreurs et d'accidents. L'amélioration des conditions de travail résulte en une baisse de stress physique et mental. Cependant, cette approche a quand même quelques inconvénients latents des approches précédentes. La littérature montre que le travail d'équipe améliore l'implication des opérateurs, leur performance ainsi que leur productivité (Salvendy, 2012). Certes, l'approche orientée facteurs humains permet de résoudre un certain nombre de problèmes liés aux approches précédentes, en revanche, les opérateurs travaillent toujours individuellement, isolés du reste des opérateurs, ce qui crée une sensation d'éloignement (à l'inverse de l'implication), résultant en une baisse de motivation, de satisfaction et par conséquent de productivité.

3. Les facteurs humains dans la littérature

Selon (Dekker & Hollnagel, 2004), le choix des facteurs humains à quantifier peut être réalisé selon 2 critères importants : la difficulté de mesurer le facteur humain et la fiabilité de l'interprétation du facteur humain. La Figure 15 représente des exemples de facteurs humains tracés selon ces 2 critères. Le but est de choisir des facteurs humains à la fois représentatifs et assez faciles à mesurer. Cependant, comme la figure le montre, il est impossible de trouver un facteur humain fortement représentatif et amplement facile à mesurer. Il est donc important de trouver un bon compromis entre ces deux critères. Le choix des facteurs humains peut être aussi réalisé selon le type d'effets influents sur la qualité : effets physiques, effets cognitifs, effets cardiovasculaires, effets psychologiques, effets biomécaniques, effets sociaux, etc. (Kolus et al., 2018). Les facteurs psychosociaux, biomécaniques et individuels sont utilisés dans la littérature dans le but de réduire les TMS (Lanfranchi & Dubeau, 2008). Ils sont donc de bons candidats pour cette thèse. De plus, la Figure 16 montre l'intérêt de ces facteurs. En effet, ils influencent grandement l'apparition et le développement des TMS. D'autres études peuvent être retrouvées dans la littérature étudiant les facteurs humains de manière expérimentale et quantitative comme la prise en compte de la consommation

maximale d'oxygène ($VO_2\text{max}$) (Liu, 2007), ou la respiration par minute, le volume respiratoire par minute, le rapport d'échange respiratoire (CO_2/O_2) ou même le battement par minute (Patton et al., 1991). Cependant, ces études traitent uniquement les efforts dus au mouvement. L'utilisation de ces modèles pour étudier les efforts de fabrication ne garantit pas leur validité dans ce contexte. De plus, ils requièrent des instruments et une expertise qui ne sont pas pris en compte dans cette thèse.

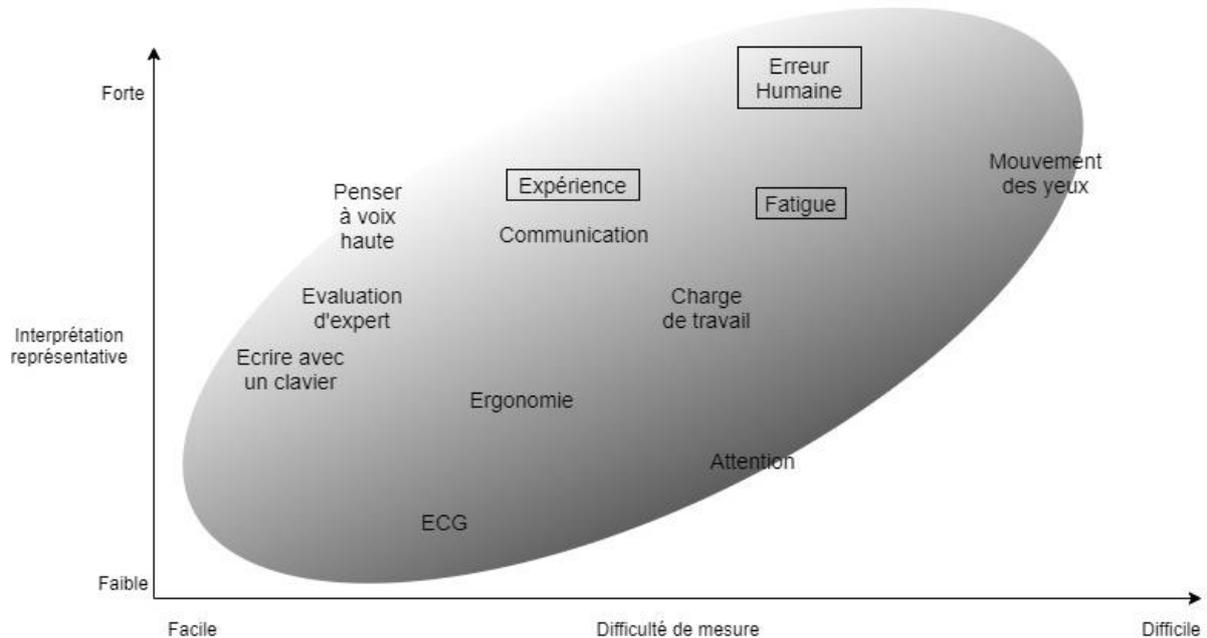


Figure 15. Facteurs humains selon leur difficulté de mesure et importance dans la littérature (adapté de (Dekker & Hollnagel, 2004))

Parmi les facteurs humains les plus notables dans la littérature scientifique, la fatigue est la plus présente dans plusieurs études scientifiques au niveau de l'ingénierie comme au niveau de l'ergonomie (Calzavara & Grosse, 2018; Dantan et al., 2020; El Mouayni et al., 2016, 2019, 2020; Gaudart & Weill-Fassina, 1999; Givi et al., 2015; Jaber et al., 2013; Petronijevic et al., 2019). Ce facteur humain est souvent corrélé avec plusieurs effets négatifs tels qu'une baisse de la motivation, une baisse des performances physique et cognitive, une mauvaise humeur, une détérioration des compétences cognitives notamment la mémoire, le temps de réaction, l'attention, la coordination œil-main, la prise de décision et la « cécité d'inattention » (Murray & Thimgan, 2016). A cause de tous ces changements, la fatigue exerce donc une influence directe sur la probabilité d'erreur humaine : une augmentation de la fatigue engendre une augmentation de la probabilité d'erreur humaine (Givi et al., 2015). Plusieurs études ont été réalisées dans le but de réduire la fatigue ou minimiser ses symptômes. Certaines suggèrent de réaliser des pauses adéquates avec des zones adaptées, d'autres stipulent de changer l'allocation pour améliorer les conditions de travail (rotations) et par ailleurs réduire la fatigue, alors que certaines se basent sur la gestion individuelle des opérateurs en donnant plus

d'autonomie aux opérateurs quand il s'agit de pauses par exemple (Fruggiero et al., 2016).

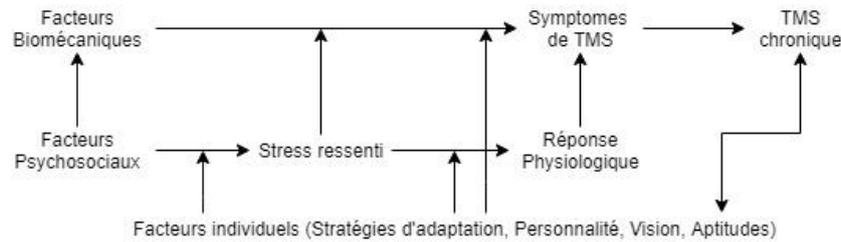


Figure 16. Modèle des relations d'influence des facteurs de risque sur les TMS – Qu'est-ce qui influence les TMS ? (adapté de (Lanfranchi & Duveau, 2008))

La seconde position des facteurs humains dans la littérature peut être attribuée à l'expérience ou l'apprentissage dû à leur importance et leur présence dans la littérature. La littérature stipule que ce facteur humain génère l'effet inverse de la fatigue. Là où l'augmentation de la fatigue entraîne une augmentation de la probabilité d'erreur humaine, c'est la réduction de l'expérience et de l'apprentissage qui a ce même effet sur l'erreur humaine. Une réduction de l'apprentissage peut prendre plusieurs formes telles qu'un manque de formation ou des procédures de fabrication ambiguës (Givi et al., 2015).

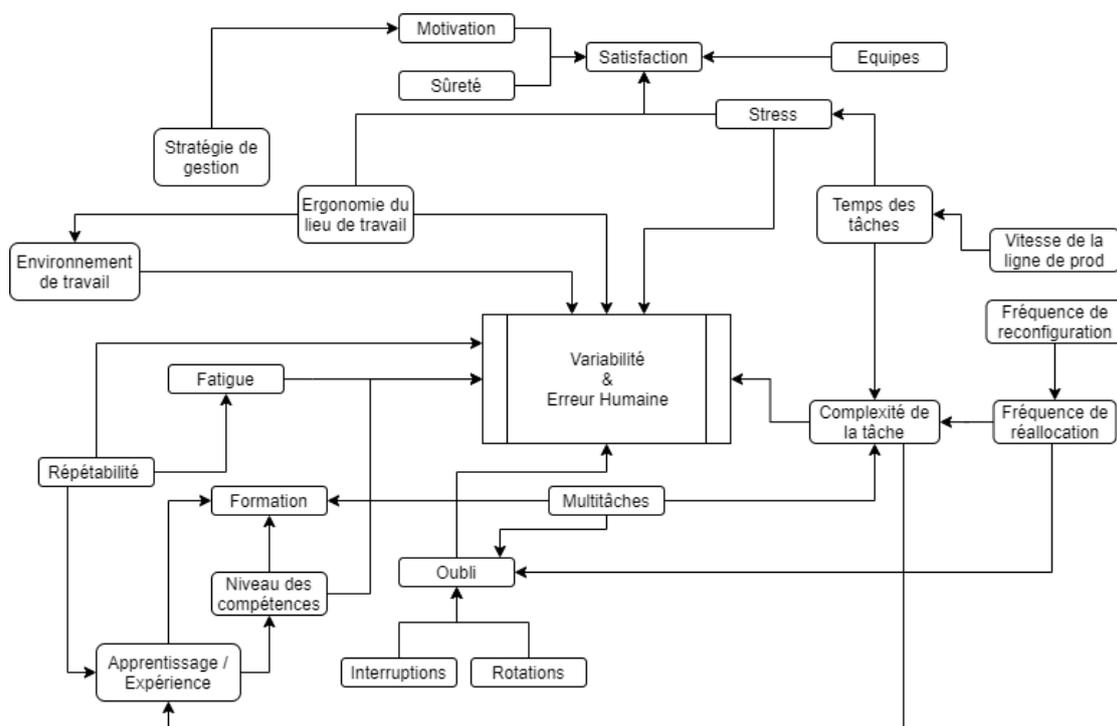


Figure 17. Diagramme des différents facteurs (dont facteurs humains) qui influencent la variabilité et l'erreur humaine (adapté de (Elmaraghy et al., 2008))

Ces facteurs humains sont liés entre eux et s'impactent les uns les autres (voir Figure 17). La fatigue et l'apprentissage impactent de façons différentes la probabilité d'erreur humaine. Selon (Jaber et al., 2013), ces facteurs sont tellement influents les uns sur les autres qu'il faut les implémenter dans un seul modèle, les auteurs ont alors développé

un modèle MAOFR « Modèle Apprentissage-Oubli-Fatigue-Repos » dont le but est de traiter les problématiques liées à cette codépendance entre ces facteurs. Ce modèle a ensuite été amélioré en y ajoutant la probabilité d'erreur humaine (Givi et al., 2015). La probabilité d'erreur humaine est le 3ème facteur humain traité dans cette thèse car il est étroitement lié aux précédents facteurs humains ainsi qu'au concept de qualité qui est prévalente dans ce sujet de thèse. En effet, une probabilité d'erreur humaine élevée entraîne des rebuts et des retouches, ce qui réduit le taux de qualité des pièces fabriquées.

Pour conclure, les facteurs humains sont très importants pour cette thèse à la fois d'un point de vue de santé et conditions de travail des opérateurs que d'un point de vue pragmatique pour l'entreprise. En effet, l'amélioration des facteurs humains dans une ligne de production soit au niveau de l'aspect physique ou psychosocial ou cognitive engendre plusieurs améliorations qui, si bien paramétrés, génèrent une amélioration des performances, et donc des profits.

4. Modèles des facteurs humains étudiés

a. *Modèle de la fatigue et du repos*

L'opérateur est l'acteur principal du système de production, et par conséquent, également du modèle. Cependant, modéliser un opérateur dans son intégralité reste impossible. Il est donc important de simplifier le modèle pour l'objectif souhaité. Ces modèles se basent sur certaines hypothèses. Par exemple, la fatigue est considérée affecter la totalité du corps. Selon (Jaber et al., 2013), le travail et le repos sont étroitement liés pour générer ou dégager la fatigue, et ce, selon une loi exponentielle. Selon les auteurs, la génération et le dégagement de la fatigue sont liés par les équations suivantes, d'abord l'équation (1) décrit la génération de la fatigue :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Où $F(t)$ est la fatigue de l'opérateur au moment t et λ est le taux de fatigue de l'opérateur. Il faut noter qu'il y a un maximum de temps à ne pas dépasser, le Temps d'Endurance Maximal ($t < TEM$). Si l'opérateur travaille de manière continue sans repos pendant cette période, la posture du corps et les efforts fournis par les muscles ne peuvent plus être soutenus et donc ne permettent plus d'exécuter les activités nécessaires.

A partir du modèle de fatigue, et lorsque l'opérateur arrête de travailler et prend une pause, la fatigue commence à baisser selon une loi exponentielle décrite par l'équation (2) :

$$R(\tau_i) = F(t)e^{-\mu \tau_i} \quad (2)$$

Où $R(\tau_i)$ est la fatigue résiduelle de l'activité précédente $F(t)$. $R=0$ signifie l'absence de fatigue résiduelle et donc un repos total, et $R=F(t)$ signifie une fatigue résiduelle totale (fatigue maximale) ou bien le manque de repos après le travail, μ est le taux de repos de l'opérateur.

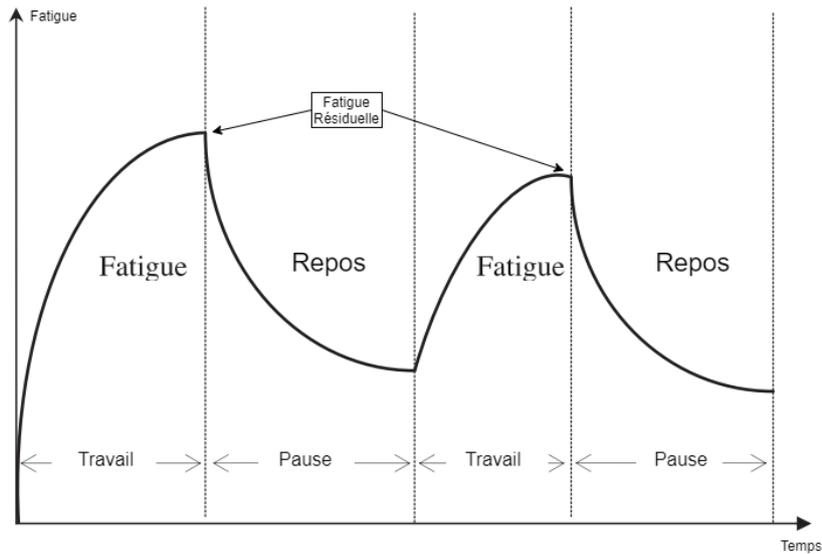


Figure 18. Exemple de graphe de fatigue-repos

Deux remarques importantes sont à noter :

- Des taux de fatigue et de repos, λ et μ , élevés signifient des capacités à se fatiguer et à se reposer rapides, et inversement, des taux bas signifient des vitesses de fatigue et de repos lentes. Ces paramètres permettent de régler et calibrer le modèle pour se rapprocher de la réalité. Ils permettent aussi d'ajouter l'aspect d'individualité au modèle. En effet, certains opérateurs se fatiguent plus rapidement que d'autres, en choisissant des paramètres différents pour différents opérateurs, il est possible d'imiter cette individualité.
- L'équation (1) dans son état actuel, ne permet pas le suivi de la fatigue et la fatigue résiduelle et leur accumulation dans une journée de travail, car elle se base sur le repos total de l'opérateur ce qui n'est pas le cas dans la réalité, car les durées des repos ne sont pas assez longues pour le permettre. Pour cela, une modification est nécessaire pour garder un « historique » des fatigues précédentes. L'équation (3) représente cet historique en prenant en compte la fatigue résiduelle du cycle précédent en introduisant des cycles de travail et de repos. En effet, La première partie de l'équation permet d'accumuler la fatigue résiduelle, alors que la deuxième partie permet de le dissiper lors des pauses. La différenciation entre la phase de travail et la phase de repos est réalisée par le choix de la variable t pour la phase de travail ou τ_i pour la phase de repos.

$$F_{i+1}(t) = R(\tau_i) + (1 - R(\tau_i))(1 - e^{-\lambda(t_n - t_i)}) \quad (3)$$

Où t_n est le temps de production du cycle i . Et t_i est calculée à partir de la projection de la valeur de la fatigue résiduelle $R(\tau_i)$ sur la courbe de fatigue $F(t)$ selon l'équation (4) :

$$t_i = -\frac{\ln(1 - R(\tau_i))}{\lambda} \quad (4)$$

L'introduction de cycles de travail et de repos permet de séparer la fatigue actuelle et la fatigue résiduelle (voir Figure 18). En effet, pendant un cycle de travail, la fatigue

augmente. Ensuite, lors du cycle de repos, la fatigue résiduelle est égale à la fatigue maximale atteinte lors du cycle de travail précédent, qui commence à baisser selon la durée de la pause.

b. Modèle de l'apprentissage et de l'oubli (expérience)

Tout comme le modèle de fatigue-repos, le modèle d'expérience contient deux états qui alternent entre deux cycles : l'apprentissage pendant le cycle de travail et l'oubli pendant le cycle de pause. Le modèle d'expérience décrit la relation entre le nombre de pièces fabriquées (l'effort fourni) et le temps de production pour fabriquer ces pièces (l'expérience acquise). Selon (Jaber et al., 2013), plus l'opérateur produit de pièces plus le temps de fabrication baisse pour cet opérateur (voir équation (5))

$$T_x = T_1 x^{-b} \quad (5)$$

Où T_x est le temps nécessaire pour produire la x-ème pièce et T_1 est le temps nécessaire pour fabriquer la 1ère pièce, x est la production cumulée et b est la puissance d'apprentissage, calculée à partir du taux d'apprentissage TA selon l'équation (6)

$$b = -\frac{\log(TA)}{\log(2)} \quad (6)$$

Inversement, l'oubli est une fonction miroir de l'apprentissage :

$$T'_x = T'_1 x^f \quad (7)$$

Où, cette fois, T'_x est le temps nécessaire pour produire la x-ème pièce en prenant en compte l'expérience perdue, T'_1 est le temps nécessaire pour fabriquer la 1ère pièce lorsque l'apprentissage est terminé, x est la production cumulée si l'interruption de la production n'a pas eu lieu et f est la puissance d'oubli (calculée à partir du taux d'oubli de la même manière que la puissance d'apprentissage en équation (6)).

Ces deux équations d'apprentissage et d'oubli en plus de l'introduction de cycles de travail et de pause ont permis de développer l'équation du modèle d'expérience en équation (8)

$$T_{xi} = T_1 (x_i + u_i)^{-b} \quad (8)$$

Où T_{xi} est le temps nécessaire pour produire la x-ème pièce pendant le i-ème cycle, u_i est l'expérience transférée à partir du cycle précédent i-1 (voir l'équation (9)) et représente le nombre de pièces fabriquées pendant le cycle précédent, et x_i le nombre de pièces fabriquer pendant le cycle i.

$$u_{i+1} = (u_i + x_i)^{1+f_i/b} S_i^{-f_i/b} \quad (9)$$

Avec $u_1 = 0$ (sous l'hypothèse que l'opérateur commence sans expérience - cette valeur peut être changée pour mieux correspondre à la réalité) et S_i est le nombre de pièces qui auraient pu être produites si la production n'était pas arrêtée. En effet, la première partie de l'équation (10) permet de calculer les pièces « perdues » à cause de la baisse d'expérience pendant l'arrêt, alors que la deuxième partie de l'équation permet de calculer le nombre de pièces qui auraient pu être fabriquée si aucune pause n'a été prise. En ce qui concerne l'équation (11), elle représente le rapport entre l'expérience

de l'opérateur représentée par les paramètres b le taux d'apprentissage, u_i l'expérience cumulée et x_i la production cumulée et l'oubli total B . Les paramètres S_i et f_i sont calculés selon les équations suivantes :

$$S_i = \left[\frac{1-b}{T_1} \tau_i + (u_i + x_i)^{1-b} \right]^{\frac{1}{1-b}} \quad (10)$$

$$f_i = \frac{b(1-b)\log(u_i + x_i)}{\log(1+B)} \quad (11)$$

$$B = \frac{D}{t(x_i)}, \quad \text{où } t(x_i) = \int_0^{x_i+u_i} T_1 y^{-b} \quad (12)$$

Où τ_i est la durée de l'interruption pendant le cycle i , B est le rapport entre le temps d'oubli total (D) et le temps pour produire $u_i + x_i$ pièces en continu ($t(x_i)$). La Figure 19 représente un exemple de graphe du modèle d'expérience (apprentissage-oubli).

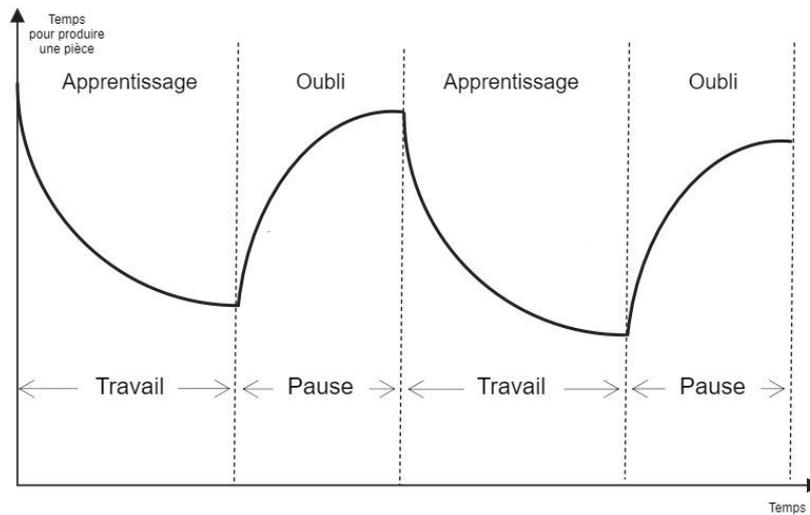


Figure 19. Exemple de graphe d'apprentissage-oubli

c. Modèle de la probabilité d'erreur humaine

Le troisième aspect que le modèle de l'opérateur doit prendre en compte est la probabilité d'erreur humaine. Selon (Givi et al., 2015), la probabilité d'erreur humaine (HEP) est une fonction des deux aspects précédents, c'est-à-dire l'expérience et la fatigue. Il est donc possible de développer la HEP à partir des modèles de fatigue-repos et d'apprentissage-oubli cités précédemment. Dû à l'impact de l'erreur humaine à la fois sur la santé et sécurité de l'opérateur et sur la performance de production, il est important de l'inclure dans le modèle de l'opérateur.

La probabilité d'erreur humaine est la première interaction entre les deux phénomènes contradictoires qui sont la fatigue et l'expérience. En effet, selon (Givi et al., 2015), lorsque l'opérateur est en cycle de travail, il gagne de l'expérience ce qui réduit sa probabilité d'erreur, mais en même temps il gagne en fatigue ce qui le rend plus enclin à commettre des erreurs, et inversement pendant le cycle de pause. Cependant, les vitesses de gain d'expérience et de fatigue (et inversement leur perte) sont différentes

– l’opérateur acquiert de l’expérience et de la fatigue à des taux différents, ce qui crée une situation où l’opérateur est amené à gagner en expérience avant d’atteindre sa limite ou son seuil de fatigue. Inversement, lors du repos, l’expérience n’est pas perdue à la même vitesse que la fatigue. En effet, l’expérience acquise, qu’elle soit cognitive ou physique, subsiste avec son détenteur pendant plus longtemps que la fatigue et l’effort endurés pour l’acquérir, et se perd plus lentement aussi.

Une fonction d’utilité de l’erreur humaine est développée en prenant en compte les deux aspects d’apprentissage et de fatigue, selon l’équation (13)

$$U(A, F) = u_A \cdot p_A + u_F \cdot p_F \quad (13)$$

Où $U(A, F)$ est l’utilité de l’apprentissage et de la fatigue, u_A est l’utilité de l’apprentissage, p_A sont poids, u_F l’utilité de la fatigue et p_F son poids (sous condition que $p_A + p_F = 1$).

Les fonctions d’utilité individuelles sont calculées selon les équations (14) – (17)

$$SAN = \frac{t_x}{T_1} \quad (14)$$

$$u_A = \alpha \times SAN \quad (15)$$

$$SFN = \frac{F(t)}{F_{max}} \quad (16)$$

$$u_F = \beta \times SFN \quad (17)$$

Où SAN est le Score d’Apprentissage Normalisé, t_x est le temps pour réaliser la x-ème pièce, T_1 est le temps nécessaire pour fabriquer la première pièce, α est une constante d’apprentissage, SFN est le Score de Fatigue Normalisé, $F(t)$ est la fatigue au moment t , F_{max} est la fatigue maximale que l’opérateur peut endurer et β est une constante de fatigue.

Finalement, selon (Elmaraghy et al., 2008), due à la nature du modèle, les résultats de l’HEP peuvent varier de 10^{-6} à 1. Il est donc conseillé de réaliser une mise à l’échelle des résultats. En conséquence, le modèle final de l’HEP peut être exprimé selon l’équation (18) :

$$\log(HEP) = 6\log(U(A, F)) \quad (18)$$

La difficulté de ce modèle se retrouve principalement dans la quantification des paramètres présentés. En plus, chaque Humain est unique dans la vraie vie, les paramètres du modèle doivent être unique pour chaque personne simulé. C’est pour cette raison que (Givi et al., 2015; Jaber et al., 2013) ont développé des limites pour chaque paramètre, et (El Mouayni et al., 2018; Petronijevic et al., 2019) ont validé ces limites par des expériences et/ou des simulations.

IV. Troisième pilier : Les marges de manœuvre

1. Les marges de manœuvre : niveaux et dimensions, individuelles ou collectives

Les marges de manœuvre (MM) se basent sur un principe plutôt simple : dans le but d'absorber les incertitudes et les variations, il faut garder une réserve ou un tampon (temporel pour chaque opérateur ou physique comme les pièces brutes ou produits en stock) dans l'éventualité que certaines perturbations arriveront tôt ou tard. En réalité, les incertitudes et les variabilités ne sont pas éventuelles mais inévitables, la question n'est donc pas « si ? » mais « quand ? ». Ce principe peut être appliqué selon deux niveaux différents (conceptuel ou opérationnel), suivant plusieurs dimensions (temporelle, spatiale ou organisationnelle) et au niveau individuel ou collectif.

Dans un système de production, le principe des marges de manœuvre qui encourage d'avoir des degrés de tolérance va à l'encontre du Lean qui encourage le juste-à-temps. Ce dernier crée des conditions de travail défavorables pour les opérateurs dû à sa rigidité. De plus, à l'apparition de la moindre perturbation (ce qui est inévitable) le système de production rencontre des problèmes de stabilité. En plus des bénéfices au niveau des systèmes de production, les marges de manœuvre offrent une flexibilité et autonomie accrues à l'opérateur ce qui améliore les facteurs humains discutés précédemment (Dantan et al., 2020).

Selon (Coutarel et al., 2013), les marges de manœuvre peuvent être implémentées selon deux niveaux différents : selon un niveau conceptuel ou selon un niveau opérationnel (Voir Figure 20). Chacun de ces niveaux vise des objectifs différents et est implémenté différemment. L'implémentation au niveau conceptuel se fait, comme son nom l'indique, au moment de la conception du système de production. Ce qui lui donne certains avantages, mais aussi des inconvénients. En effet, l'implémentation au niveau conceptuel a plus de potentiel comparé au niveau opérationnel, car le système de production peut être conçu en intégrant les marges de manœuvre. Une étude préalable peut être réalisée pour étudier la charge potentielle des postes, les cadences, les efforts physiques et cognitifs etc. et concevoir le système de production de façon à améliorer ces critères (Coutarel et al., 2013). Le point négatif le plus important de ce niveau d'implémentation est qu'il est possible uniquement lors de la phase de conception. C'est pour cette raison que l'implémentation au niveau opérationnel est plus intéressante car elle offre une meilleure flexibilité pour les systèmes de production déjà conçus. L'implémentation à ce niveau vise plutôt des changements des façons de faire, l'amélioration des tampons temporels et physiques et l'exécution de changements organisationnels et stratégiques comme l'implémentation d'une stratégie de rotation des opérateurs ou de rotation des tâches.

Les marges de manœuvre peuvent aussi être implémentées selon trois dimensions : temporelle, spatiale ou organisationnelle. Contrairement aux niveaux d'implémentation, les dimensions d'implémentation peuvent être utilisées individuellement ou ensemble. Par exemple, (El Mouayni et al., 2018) ont implémenté les marges de manœuvre selon la dimension temporelle et organisationnelle. Les

auteurs ont développé un indicateur pour évaluer le besoin de marges de manœuvre selon ces dimensions dans le but d'améliorer la flexibilité et la productivité de l'opérateur.

Les marges de manœuvre peuvent aussi être adoptées au niveau individuel et/ou collectif (Coutarel, 2004). L'auteur définit les marges de manœuvre individuelles comme étant la possibilité de l'opérateur de choisir ses gestes, et dans une certaine mesure, son rythme de travail (lentement pour maximiser les facteurs humains, ou rapidement pour profiter de pauses plus longues), etc. et définit les marges de manœuvre collectives comme étant les possibilités de mobilités et de coopérations entre les opérateurs comme les rotations et les changements de poste. Il est donc important de faire bon usage des deux types de marges de manœuvre pour améliorer les conditions de travail et la productivité du système de production.

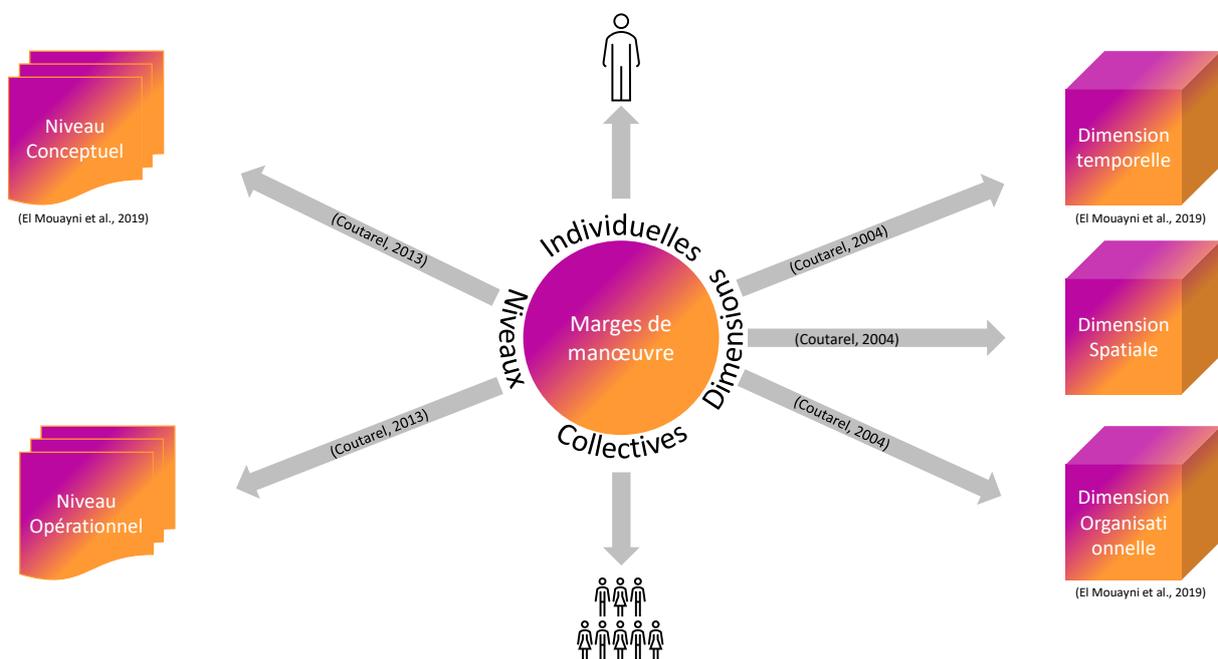


Figure 20. Niveaux et dimensions d'implémentation des marges de manœuvre

2. Les avantages et inconvénients des marges de manœuvre

Les marges de manœuvre sont un concept assez récent qui a été développé par la communauté ergonomique puis adopté par la communauté d'ingénierie. La littérature sur ce sujet est peu abondante. Les différents avantages et inconvénients des marges de manœuvre sont alors des résultats extraits des différents cas d'étude trouvés, donc cette liste n'est pas exhaustive et ne reflète pas un consensus global de tous les chercheurs sur le sujet. En plus, les différentes études se concentrent surtout sur les avantages, et fournissent rarement les inconvénients de la solution adoptée. Est-ce que l'implémentation des marges de manœuvre est sans inconvénients ? Ou est-ce que la littérature glorifie les marges de manœuvre ?

La liste non-exhaustive des avantages trouvés dans la littérature peut être résumée en :

- La réduction des TMS (Coutarel, 2004)

- L'amélioration de l'apprentissage et donc de la productivité (Coutarel, 2004)
- Equilibre entre les exigences de travail et la santé de l'opérateur (Coutarel, 2004)
- Amélioration des facteurs humains et de l'efficacité du travail via la régulation externe (cahier des charges) et la régulation interne (auto-régulation de l'opérateur) des conditions de travail (Coutarel, 2004)
- Impact positif sur la productivité à court terme sous la forme de réduction de blocage du flux physique, des erreurs de production, voire des risques et des accidents de travail (El Mouayni et al., 2018).
- Impact positif sur la productivité à long terme sous la forme de réduction des maladies professionnelles et l'amélioration des conditions de travail et donc à la pérennité de l'entreprise (Dantan et al., 2019; El Mouayni et al., 2018).
- Ne nécessite pas d'investissements importants ni spécifiques si réalisé lors de la conception du système de production.

Etant donné l'inexistence d'inconvénients des marges de manœuvre dans la littérature, le seul inconvénient découvert se base sur les constatations personnelles lors de la réalisation de cette thèse. En effet le concept des marges de manœuvre est un principe simple en théorie, mais dont l'implémentation est difficile en pratique.

Pour conclure, les marges de manœuvre s'annoncent comme un concept prometteur qu'il faut bien garder en tête lors de la réalisation de cette thèse, sous condition d'aussi garder en tête les inconvénients potentiellement constatés lors de la mise en place et l'exploitation de ce concept. Les marges de manœuvre vont de pair avec les facteurs humains. En effet, une bonne mise en place des marges de manœuvre pourra améliorer les facteurs humains et donc entraîner les différents avantages cités précédemment dans le chapitre des facteurs humains. Le but est ainsi de trouver un moyen d'utiliser ces trois piliers dans un seul système ou modèle pour obtenir les résultats souhaités.

3. Implémentation des marges de manœuvre

Le dernier modèle lié à l'opérateur restant est le modèle des marges de manœuvre. Comme discuté précédemment, les marges de manœuvrer sont très importantes car elles permettent à l'opérateur de pouvoir gérer les aléas et les écarts entre la théorie et la réalité (entre la capacité de l'opérateur et les exigences du travail), en lui offrant des libertés sur les décisions à prendre.

Les marges de manœuvre peuvent être implémentées selon deux niveaux : conceptuel et opérationnel. À l'inverse des travaux de (El Mouayni et al., 2018) qui implémentent les marges de manœuvre au niveau conceptuel, c'est-à-dire pendant la phase de conception du système de production, les travaux de cette thèse visent à implémenter les marges de manœuvre au niveau opérationnel, dans des systèmes de production déjà existants dans le but de les améliorer. Les raisons de ce choix sont justifiées dans la partie précédente, mais la plus importante est la flexibilité et la possibilité d'implémenter les marges de manœuvre dans n'importe quel système de production existant, et par conséquent, réduisant la barrière d'utilisation de la méthode.

L'implémentation des marges de manœuvre prend en compte la cadence de l'opérateur et les exigences de travail. Si l'opérateur dispose d'une cadence légèrement élevée que les exigences de travail, à un certain moment, il bénéficie d'une marge de manœuvre qu'il peut utiliser pour prendre des pauses indépendantes ou augmenter sa performance (d'où l'importance de l'indépendance de l'opérateur, contrairement aux systèmes de production Fordistes et Tayloristes). L'implémentation des marges de manœuvre est sous forme de logique (algorithme) comparant les disponibilités de l'opérateur et les besoins du système de production. C'est une imitation primitive de la logique d'un opérateur. Cet algorithme est décrit plus en détails dans la partie développement de l'outil et simulation.

V. Modèles développés et approches existantes

Lors de cette recherche bibliographique, plusieurs études qui traitent des sujets similaires ont été analysées. En général, ces études traitent un seul aspect de la thèse, mais certaines en traitent plusieurs à la fois. A notre connaissance, aucune autre étude n'a traité les trois piliers en même temps avec un niveau de complexité et de reconfigurabilité souhaités. En effet, de nouvelles études doivent être réalisées pour en apprendre plus sur l'impact et les interactions de ces trois piliers.

1. Approches de modélisation et résolution de la problématique

Plusieurs approches sont utilisées pour traiter le type de problématiques visées par cette thèse, c'est-à-dire exploiter les temps non productifs pour améliorer la productivité, la reconfigurabilité et les conditions de travail. Une tendance apparaît au niveau des études analysées lors de l'étape de recherche bibliographique sur les trois piliers. En effet, les simulations (multi-agents et à événements discrets), les optimisations et les techniques de recherche opérationnelle sont les plus présentes dans la littérature, soit au niveau de l'ergonomie ou de l'ingénierie. Le Tableau 6 est une synthèse de ces études avec les approches utilisées dans chacune d'elles. L'approche choisie doit répondre aux exigences suivantes :

- Modélisation des comportements (opérateurs, machines, produits et leurs interactions)
- Modélisation des logiques, processus, événements et comportements
- Possibilité de communiquer et interagir entre les acteurs du modèle
- Possibilité de gérer un modèle de taille et de complexité élevées (prise en compte des différences et similarités des acteurs du modèle)
- Prise en compte des incertitudes, variabilités et aspects aléatoires de la réalité
- Gestion du temps de manière continue et/ou discrète
- Aide à la prise de décision (via des logiques et des états)
- Flexibilité, modularité et reconfigurabilité du modèle via la modélisation de scénarii « what if ? »
- Possibilité d'ajouter des contraintes
- Facilité de la modélisation des systèmes de production

La première approche la plus utilisée (surtout au niveau des facteurs humains) est la simulation. Cette approche permet de modéliser et d'imiter l'Humain. En effet, un bon modèle de simulation permet d'imiter un comportement simplifié d'un opérateur, sa réaction, la logique qu'il peut suivre, et même ses facteurs humains internes comme la fatigue et l'apprentissage (El Mouayni et al., 2018). Grâce à la simulation multi-agents, il est possible de « donner vie » à plusieurs agents dans le monde simulé. Chacun de ces agents peut être unique, avec ses propres modes de fonctionnement, ses propres réactions, etc. grâce à la logique qui est modélisée. Et grâce à la simulation à événements discrets, il est possible de gérer les flux d'informations et les flux physiques dans le but de prendre des décisions avec un très bon degré de granularité au niveau temporel, physique et logique (Grosse et al., 2017), c'est-à-dire, un contrôle précis sur les paramètres temporels et physiques ainsi que le développement de logiques de manière explicite et détaillée. La simulation est ainsi l'outil idéal pour modéliser des problèmes complexes, où les acteurs sont uniques et différents les uns des autres. De plus, elle offre une possibilité de reconfigurabilité et de changements rapides. Ceci permet de recréer exactement le problème industriel comme elle a été imaginée, et ainsi, s'assurer de l'applicabilité de la solution dans la réalité, et la possibilité de changer les différents paramètres de la simulation pour convenir à des changements de situations comme dans la réalité (possibilité de reconfigurabilité).

L'optimisation est utilisée en grande partie dans les problématiques de productivité surtout lorsque l'incertitude est faible. En effet, l'optimisation rencontre des problèmes de gestion d'incertitude (Sahinidis, 2004). La nature déterministe de l'optimisation empêche la possibilité d'introduire des incertitudes et des variabilités au modèle (du moins de manière plus facile que la simulation). Cependant, l'un des points forts de l'optimisation est la possibilité de trouver des solutions globales et de ne pas tomber dans le piège des optimums locaux. En revanche, certains problèmes peuvent être tellement complexes qu'il est impossible, même pour l'optimisation, de trouver une solution et d'être sûr que c'est une solution globale et non pas locale (Series, 2012).

D'autres techniques de la recherche opérationnelle sont aussi possibles. Ces techniques, quant à elles, sont utilisées en majorité dans les problématiques de type agencement et ordonnancement (Wu et al., 2018). Elles permettent de modéliser un système de production avec plusieurs contraintes et de trouver une solution suivant ce modèle. Comme l'optimisation, ces techniques ne permettent pas d'introduire (facilement) les incertitudes et les variabilités à cause de leur nature déterministe. Certaines de ces techniques n'existent que pour résoudre un problème bien précis, généralement en allant du local vers un niveau global supérieur, dans ce cas on parle de métaheuristiques (Glover & Kochenberger, 2006).

Le Tableau 5 est une synthèse des 3 approches présentées avec leurs avantages et inconvénients.

Tableau 5. Avantages et inconvénients des trois approches étudiées (les besoins de la thèse sont marqués par un dièse (#) et les inconvénients majeurs à la thèse par (-))

Approche	Avantages	Inconvénients
Simulation	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilité de conception des simulations • Modélisation des comportements (Homme ou machine) (#) • Modélisation des logiques, processus et événements (#) • Possibilité de communiquer et interagir entre les acteurs du modèle (#) • Complexité et taille du modèle (ABS) (#) • Incertitude, variabilité et stochastique (#) • Gestion du temps (DES) (#) • Aide de prise de décision (#) • Modélisations de scénarii « what if ? » (#) 	<ul style="list-style-type: none"> • Impossible de savoir si la solution est optimale • Impossible d'imiter la réalité à 100% • Plus compliqué à mettre en place que l'optimisation et la recherche opérationnelle
Optimisation	<ul style="list-style-type: none"> • Possibilité d'obtenir un optimum global • Possibilité d'ajouter des contraintes pour réduire la plage de solutions (#) 	<ul style="list-style-type: none"> • Difficulté de modéliser incertitudes et variabilités (-) • Impossible de « communiquer » entre les parties du modèle (-)
Autres techniques de recherche opérationnelle	<ul style="list-style-type: none"> • Facilité de modéliser les systèmes de production (#) • Facilité de traiter les problèmes d'agencement et d'ordonnancement • Possibilité de modéliser les facteurs humains (#) 	<ul style="list-style-type: none"> • Difficulté de modéliser incertitudes et variabilités (-) • Impossible de communiquer entre les parties du modèle (-) • Les contraintes sont obligatoires dans un modèle RO

En se basant sur l'étude précédente, l'approche choisie est la simulation. En effet, cette dernière permet de modéliser des modèles plus complexes qu'avec les autres approches identifiées. Elle permet de gérer l'aspect temporel ainsi que l'aspect Humain. Avec la simulation, il est possible d'imiter la réalité en modélisant des logiques, des comportements et des réactions à certains stimuli. Un aspect très important dans le choix de la simulation est la possibilité de communiquer entre les différents acteurs du

modèle. Cet aspect est très compliqué à implémenter dans les 2 autres approches. Pour ces raisons, l'approche convenue est simulation. Enfin, comme le tableau le montre, certes la simulation a ses propres inconvénients, cependant, le cadre de ces travaux de thèse juge la nécessité d'utiliser la simulation malgré ces inconvénients.

2. Travaux antérieurs

Les travaux de cette thèse sont la continuité des travaux de (El Mouayni et al., 2018; Petronijevic et al., 2019) qui traitent, respectivement, :

- (El Mouayni et al., 2018) : l'amélioration des aspects de santé et sécurité des opérateurs dans un système de production lors de sa phase de conception en développant un indicateur des marges de manœuvre. Avec cette approche, leur but est de résoudre les problèmes de santé et sécurité à la phase de conception. Pour cela, le principe des marges de manœuvre temporelles est exploité, et des indicateurs de performances ont été proposés pour évaluer les conditions de travail et la productivité de l'opérateur. Ces indicateurs ont ensuite été testés et analysés sur une simulation qui a été développée, puis des cas d'étude académiques ont été réalisés pour valider le modèle et la simulation développés. L'approche de simulation utilisée est multi-agents (Agent-Based Simulation), ce qui permet de traiter plusieurs acteurs de manière individuelle dans un même modèle, et donc de traiter des problèmes complexes. Ils stipulent qu'en plus des effets positifs sur la santé et la sécurité (qui, en plus, peuvent impacter l'image de l'entreprise de façon positive sur le long terme), cette approche permet aussi d'améliorer la productivité de manière indirecte. Par exemple, via l'amélioration des conditions de travail, l'opérateur est moins susceptible de commettre des erreurs, et ainsi éviter les rebuts et les retouches. Deux cas d'étude ont été étudiés. En ce qui concerne le premier cas, cette approche a permis d'estimer les conditions de travail et la productivité d'une future ligne de production. Quant au second cas d'étude, l'outil a permis de comparer trois configurations et a trouvé que les marges de manœuvre temporelles allouées aux opérateurs sous forme de temps de pauses permettent non seulement d'améliorer les conditions de travail, mais aussi la productivité (El Mouayni et al., 2018).
- (Petronijevic et al., 2019) : l'étude des facteurs humains sous incertitudes dans le but d'améliorer la santé, sécurité et productivité en développant une méthodologie en deux phases, dont une première d'optimisation globale et une seconde d'optimisation locale. Pour cela, une approche basée à la fois sur la simulation et l'optimisation a été choisie. Cette fusion entre ces approches a permis de trouver des résultats globaux et locaux. En effet, l'approche développée consiste à d'abord trouver une solution globale grâce au modèle d'optimisation, puis d'utiliser les résultats de l'optimisation comme données d'entrée pour la simulation pour affiner d'avantage les résultats et trouver un meilleur résultat local. L'étude se base sur l'hypothèse suivante : la performance du système de production est liée au bien-être de l'opérateur. Donc, améliorer le bien-être de l'opérateur via l'amélioration des critères de santé et de sécurité au travail aura comme conséquence d'améliorer la

productivité et la performance du système de production. Pour répondre à cet objectif, les marges de manœuvre ont été utilisées comme un outil de l'opérateur pour choisir comment contrôler le déroulement de la production.

(El Mouayni et al., 2018) ont développé une solution outillée pour améliorer les aspects de santé et sécurité au travail pour les opérateurs en se concentrant sur l'étape de conception. Avec cette approche, leur but est de résoudre les problèmes de santé et sécurité lors de la création du système, c'est-à-dire pendant la phase de conception. Pour cela, le principe des marges de manœuvre temporelles est exploité, et des indicateurs de performances ont été proposés pour évaluer les conditions de travail et la productivité de l'opérateur. L'approche utilisée dans ces travaux de recherche est la simulation multi-agents.

(Petronijevic et al., 2019) étudient les facteurs humains et leur caractère incertain. Le but de cette étude est de trouver une allocation de production (par type de produit et par opérateur) qui permet de réduire la fatigue sans perdre en productivité voire l'améliorer. Pour cela, une approche ingénieuse en deux phases a été choisie. La première phase est une optimisation globale, qui est ensuite raffinée pendant la deuxième phase grâce à une optimisation locale.

(Gopinath & Freiheit, 2012) ont développé un modèle relationnel entre les différents types de gaspillages ainsi qu'une métrique qui permet d'estimer la productivité du système de production. Le but de cette étude est de comprendre les interactions entre les types de gaspillages et les métriques de productivité. L'approche utilisée est la modélisation et la simulation du modèle dans le but de le valider.

On remarque que les études citées, traitent chacune un ou deux aspects de cette thèse, mais rarement les 3 ensembles. Dans le cas où l'étude traite les 3, elle s'applique à quelques opérateurs seulement (1 ou 2 opérateurs au maximum). Il est donc important de suivre cette piste et d'étudier les trois piliers ensemble et d'étudier les différentes interactions entre eux dans un système de production réel avec plusieurs opérateurs travaillant sur plusieurs machines fabriquant plusieurs types de produits. Le Tableau 6 regroupe le reste des travaux de recherche analysés, ainsi que les similarités et les différences comparées aux résultats attendus des travaux de cette thèse.

3. Approches existantes : stratégies d'allocation

Quand il s'agit des stratégies d'allocation des opérateurs, des machines et des ressources en général, la littérature est très riche. Certes, l'allocation classique (un opérateur par machine et une machine par opérateur) reste la plus simple à implémenter, cependant, sa performance par rapport à d'autres allocations est moins intéressante (Range et al., 2019). En effet, les allocations en îlots et en rotation dynamiques, par exemple, permettent d'améliorer la performance de la ligne de production (Azadeh et al., 2010). De même, l'agencement des machines joue un rôle important dans la productivité du système de production (Lehyani et al., 2021). Toutefois, il n'est pas toujours possible de modifier cet agencement. Il est alors plus simple de modifier l'allocation des opérateurs.

L'allocation dynamique des ressources est un problème complexe et sujet aux fluctuations du marché, de l'offre et de la demande (S. A. Kumar & Suresh, 2008), il est donc important de varier l'allocation de façon dynamique et fréquente pour garder l'avantage compétitif. La méthodologie développée dans le chapitre suivant est exploitée grâce à des outils numériques permettant de comparer les différentes allocations et aider dans la prise de décision. Comme discuté précédemment, les outils numériques sont adéquats à ce type de problématiques qui nécessite une flexibilité et une rapidité lors de la prise de décision.

Tableau 6. Synthèse des travaux antérieurs

Etude	Productivité	Facteurs humains	Marges de manœuvre	Incertitudes & variabilités	Complexité du modèle	Approche
(El Mouayni et al., 2018)	X	X	X	X	1 à 5 opérateurs 1 à 5 machines 1 type de produit	Modèle + Simulation (ABS)
(Petronijevic et al., 2019)	X	X	X	X	1 à 2 opérateurs 1 à 2 machines 3 types de produits	Optimisation + Simulation (ABS + DES)
(Gopinath & Freiheit, 2012)	X				-	Modèle + Simulation
(Givi et al., 2015)	X	X			1 opérateur 1 machine	Modèle + Simulation (DES)
(Jaber et al., 2013)		X			1 opérateur 1 machine	Modèle + Simulation (DES)
(Xu et al., 2012)	X	X			1 à M opérateurs 1 à M machines	Recherche opérationnelle (fonction objectif)
(Battini et al., 2015)	X	X			-	RO (Modèle multi-objectif & modèle mono-objectif)
(Digiesi et al., 2006)	X	X			1 à 2 opérateurs 1 à 2 machines	Modèle + Simulation (DES)
(Mirzapour Al-E-Hashem et al., 2011)	X			X	0 à k opérateurs	RO multi-objectif + Optimisation
(Botti et al., 2017)	X	X			6 opérateurs 12 types de produits	Modèle (ILP) + Simulation
(Heijden et al., 2018)	X	X			-	Modèle
(Kasperski et al., 2012)	X				2 machines	Modèle (ILP)
(Lu et al., 2015)	X			X	1 machine	Modèle (ILP) + Algorithme génétique
Cette thèse	X	X	X	X	0 à 15 opérateurs (+ robots) 1 à 15 machines	Modèle + Simulation (ABS + DES) + Aide à la décision

VI. Conclusion de la recherche bibliographique

La recherche bibliographique réalisée est divisée en deux parties : la première partie traite l'identification et la définition des trois piliers (la productivité, les facteurs humains et les marges de manœuvre) et la deuxième partie se concentre sur les approches utilisées pour étudier et analyser ces trois piliers. Cette recherche bibliographique a permis d'identifier les définitions, modèles et approches existants dans la littérature qui ont répondu à des problématiques similaires à celles des travaux de cette thèse. Ce qui a ainsi permis d'identifier les concepts manquants ou les lacunes à développer ou à améliorer. Enfin, la recherche bibliographique montre que les trois piliers sont souvent étudiés séparément, d'où l'importance de cette thèse qui vise à étudier l'interaction entre ces trois piliers. Cette conclusion récapitule ces concepts, leurs lacunes et les améliorations potentielles.

La première partie de la recherche bibliographique a permis d'identifier certaines lacunes, notamment l'importance de l'Humain dans les systèmes de production actuels qui comptent sur des productions à grandes variabilités et à moyens volumes. Cependant, cette importance de l'Humain n'est pas reflétée dans les méthodes de conception et d'utilisation des systèmes de production. Cette recherche bibliographique a montré l'importance de la reconfigurabilité et l'utilisation des solutions numériques dans la bonne implémentation de l'Humain dans les systèmes de production. Elle a aussi montré la nécessité d'une nouvelle définition de productivité (et par contraste, de non-productivité) en prenant en compte plusieurs aspects tels que les gaspillages ou les facteurs humains, contrairement à la définition classique. Certes, une définition multicritère est plus complexe car elle prend en compte plusieurs aspects. Cependant, c'est pour cette raison même qu'elle permet d'avoir une meilleure compréhension de la productivité sous tous ses angles. Cette première partie a montré que plusieurs tentatives ont été réalisées dans le but d'améliorer les performances de travail, certaines se sont même intéressées aux conditions de travail de l'opérateur. Un exemple est le Lean qui encourageait les opérateurs à prendre l'initiative et exprimer leurs opinions dans le but d'améliorer le système de production. Certes, cette démarche donne de l'importance à l'opérateur. Cependant, l'application des concepts du Lean dans un système de production aboutit à une rigidité qui a des inconvénients pour la santé et sécurité de l'opérateur, ainsi que la productivité. Un besoin en flexibilité est ainsi primordial. Cette flexibilité permet d'améliorer les facteurs humains sans perte de performance voire son amélioration. La recherche bibliographique montre que cette flexibilité peut être acquise et gérée via la prise en compte des temps et des marges de manœuvre. Ces dernières peuvent être implémentées selon plusieurs niveaux, dimensions et degrés différents. Selon les résultats de la recherche bibliographique, il est possible d'implémenter les marges de manœuvre dans le but d'améliorer les facteurs humains, mais aussi la productivité à court et à long terme.

La deuxième partie de la recherche bibliographique traite les approches utilisées pour étudier les trois piliers identifiés. La majorité des études identifiées dans cette recherche bibliographique traitent au plus deux des trois piliers identifiés. Le reste des études qui traitent les trois piliers ensemble manquent de complexité ou de reconfigurabilité, d'où la nécessité de cette thèse. Toutes les études identifiées sont ensuite regroupées pour réaliser une synthèse dont le but est de déterminer leurs résultats, leurs lacunes et les possibilités d'amélioration possibles. Ceci a alors permis d'identifier les différentes pistes à suivre pour la thèse. En plus des études similaires, cette partie traite également les différentes approches utilisées pour étudier des problématiques semblables. Les approches identifiées sont la simulation, l'optimisation et des techniques de recherche opérationnelle. Les avantages et les inconvénients de chacune de ces approches sont étudiés ce qui a permis d'identifier l'approche la plus adéquate aux travaux de cette thèse.

Pour conclure, l'amélioration de la productivité et des facteurs humains est une objective qui touche l'industrie 4.0. Le marché évolue et se dirige vers des productions de grande variété et de moyen volume, ce qui pousse à cet objectif. La reconfigurabilité, la prise en compte des facteurs humains et une nouvelle approche à la productivité sont identifiées parmi les moyens qui permettent d'améliorer à la fois la performance industrielle et les conditions de travail. De plus, la littérature montre qu'il n'est pas suffisant d'étudier ces aspects séparément. Il est important de les étudier ensemble dans le but de mieux les comprendre ainsi que leurs interactions. Pour cela, il faut d'abord les définir selon de nouvelles normes. Cependant, il existe plusieurs façons de les définir. L'analyse des définitions existantes a permis de choisir celles en adéquation avec la problématique étudiée et d'identifier des lacunes auxquelles le chapitre suivant va essayer de répondre. Ce choix est basé sur plusieurs contraintes telle que la représentabilité de la métrique par rapport à la difficulté de sa mesure. Finalement, des approches pour traiter cette problématique sont identifiées, analysées et comparées. Les attentes de la thèse et les contraintes identifiées ont permis de choisir l'approche la plus adéquate. Cette approche, le modèle ainsi que la nouvelle définition de la productivité sont définis et développés lors du chapitre suivant en prenant en compte les lacunes identifiées dans ce chapitre de recherche bibliographique.

Chapitre 2 : Modèle & Approche

Résumé

Les systèmes de production évoluent dans une direction reconfigurable et durable qui met l'Homme en son centre. Pour arriver à cet objectif, certains changements sont nécessaires, notamment au niveau de la productivité. Une nouvelle définition de la productivité est alors proposée en se basant sur la définition de la valeur. Un modèle et une méthodologie sont développés pour prendre en compte cette nouvelle définition en plus des facteurs humains pour créer un outil d'aide à la décision. Cet outil est conçu pour permettre de simuler plusieurs scénarii, et ainsi atteindre la reconfigurabilité et l'anticipation de l'incertitude souhaitées. Le modèle de système de production est réalisé selon une démarche ascendante « bottom-up » dont le principe est de modéliser un système complexe en partant de plusieurs sous-systèmes plus simples connectés entre eux par des connexions et interactions.

Le but de ce chapitre est de décrire la méthodologie proposée d'identification des temps non productifs (TnP) pour l'amélioration de la productivité et des conditions de travail en se basant sur cette nouvelle définition des temps non productifs, sur les facteurs humains et les marges de manœuvre. Ce chapitre présente aussi la méthodologie développée d'aide à la décision en se basant sur une solution outillée. Le chapitre commence par définir les temps non productifs et la méthodologie utilisée pour arriver à cette définition. Ensuite, le modèle et ses paramètres sont définis et leur choix est justifié. Puis, le modèle est présenté, d'abord sous une vue globale, puis sous une vue détaillée. Enfin, l'outil est développé et justifié, et une synthèse est proposée.

La recherche bibliographique présentée dans le chapitre 1 met en avant les points sur lesquels se focaliser dans la réalisation du modèle. En effet, le premier point à traiter est le développement d'une nouvelle définition de la productivité (et par contraste, la non-productivité) pour répondre au besoin d'une définition qui prend en compte à la fois la performance et les facteurs humains. La recherche bibliographique met aussi en avant les autres paramètres à impérativement considérer vu leur importance dans la prédiction de ces indicateurs de performance. Le premier paramètre des facteurs humains permet d'estimer les conditions de travail pour mieux les comprendre au niveau individuel et au niveau de leur interaction et comportement dans le système. Le deuxième paramètre identifié qui peut aider à gérer les facteurs humains sont les marges de manœuvre, ce concept offre une certaine indépendance à l'opérateur qui lui permet de proprement gérer ses propres facteurs humains et sa productivité. Enfin, la recherche bibliographique met aussi en avant le type d'approche à utiliser pour ce genre de problématique. La solution outillée est développée selon l'approche en simulation identifiée dans la partie bibliographique.

1. Nouvelle définition de la productivité

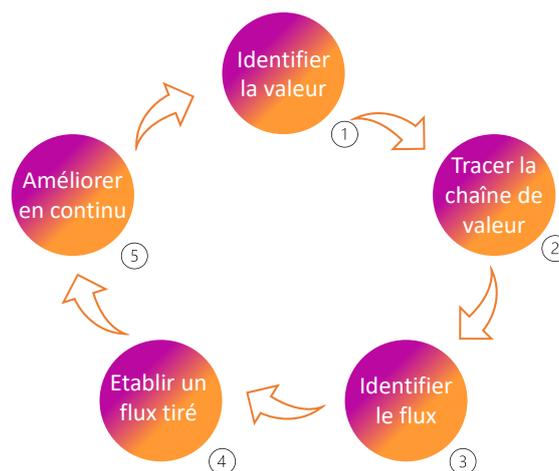


Figure 21. Le Lean Thinking (adapté de (Womack & Jones, 2003))

Malgré la rigidité du Lean qui va à l'encontre de la reconfigurabilité et la flexibilité que ces travaux de thèse souhaitent atteindre (Doll & Vonderembse, 1991; Salvendy, 2012), il propose des concepts intéressants notamment le Lean Thinking (la réflexion Lean) (voir Figure 21) qu'on utilise comme base pour définir la nouvelle définition de la

productivité puis de la non-productivité. Plus spécifiquement, la première étape de définition et d'identification de la valeur et de la non-valeur.

Le Lean se base sur la réduction des gaspillages pour offrir au client uniquement ce qu'il a demandé sans aucune addition à non-valeur-ajoutée dans le but de réduire les coûts pour l'entreprise et réduire le prix pour le client. Pour cela, il faut d'abord passer par l'étape d'identification de cette valeur en répondant à la question « Quelle est la valeur ? Plus précisément, pour quelle valeur le client est-il prêt à payer ? ». La réponse à cette question dépend de plusieurs facteurs. Dans le cas du Lean, la valeur est la somme de toutes les raisons pour lesquelles le client est prêt à payer. Dans le cas du Taylorisme et du Fordisme, la valeur est le nombre de pièces produites par unité de temps.

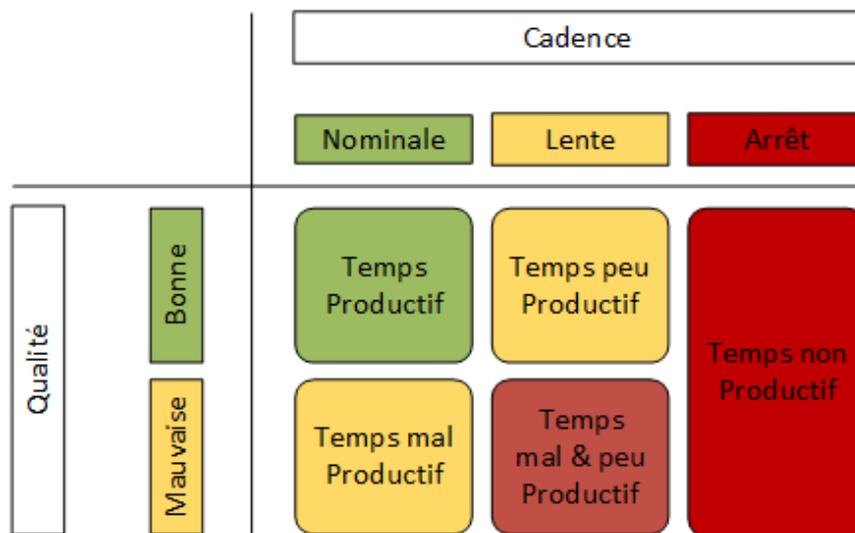


Figure 22. Définition des temps productifs et non-productifs

Dans le cas de ces travaux de thèse, la valeur est divisée en deux parties : la première est la productivité, la seconde sont les conditions de travail des opérateurs qui constitue une nouvelle dimension. Ces deux parties sont expliquées plus en détails par la suite. Selon le cas, ces deux parties peuvent être à parts égales ou non, mais jamais nulles. Deux paramètres sont identifiés qui prennent en compte à la fois la productivité et les conditions de travail. En effet, c identifie 2 paramètres qui décrivent la performance industrielle en terme d'impact sur le système de production dans sa totalité, puis en terme d'impact sur ses aspects individuels. Ils stipulent que le premier facteur est influencé en grande partie par l'attente puis par les mouvements et les transports, et que le deuxième facteur est influencé en grande partie par les erreurs, défauts et rebuts puis par les transports. On remarque deux thèmes importants : un premier thème lié au temps et à l'attente (et donc à la cadence de production) et un thème lié à la qualité (erreurs et rebuts). En se basant sur ces thèmes de productivité et de qualité et sur la matrice d'Eisenhower, une nouvelle définition de la productivité est proposée en Figure 22. Les temps sont, ainsi, définis par les activités réalisées, et la productivité de ces activités est définie par sa performance en termes de cadence et de qualité. Par exemple, si la cadence est nominale et la qualité est bonne on peut dire que

l'activité réalisée est productive et donc le temps passé à réaliser cette activité est productif également, et si la production est à l'arrêt (c'est-à-dire, la cadence est nulle) le temps est obligatoirement non productif.

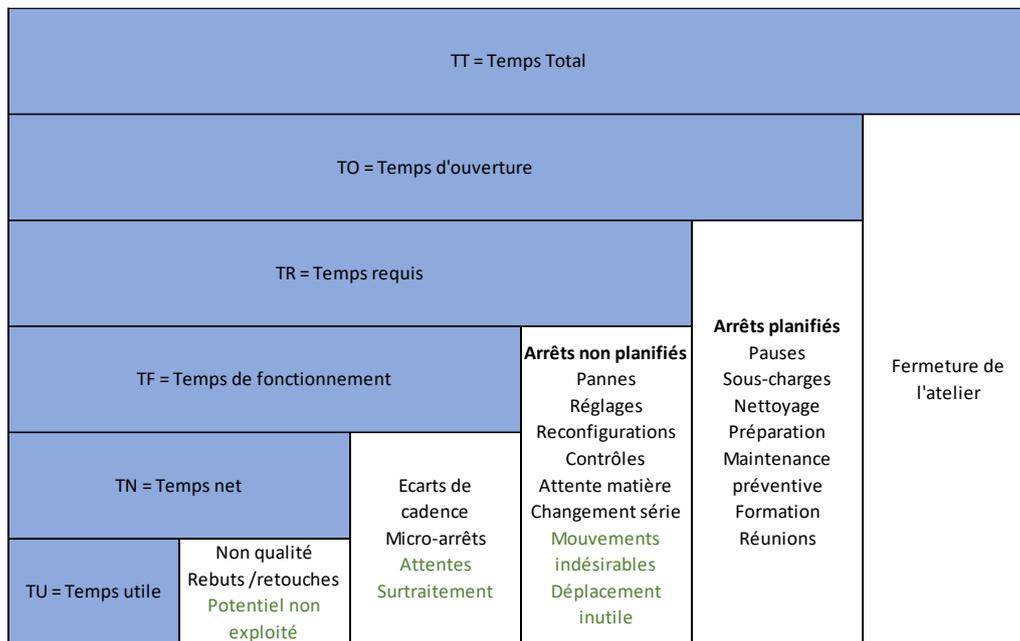


Figure 23. TRS opérateur

A la suite de cette définition, un taux de rendement synthétique (TRS) opérateur est réalisé à l'image d'un TRS classique. Le but de ce TRS opérateur est d'identifier les activités et les tâches qui réduisent la cadence ou la qualité (voir Figure 23). Le TRS opérateur permet de suivre le premier indicateur de performance lié à la productivité discuté précédemment. Le TRS est souvent divisé en 3 indicateurs de performance : disponibilité, qualité et performance. Le TRS opérateur peut aussi être divisé selon la même classification. Chacun de ces indicateurs est influencé par des actions internes ou externes à l'opérateur qui finissent par réduire ou augmenter le TRS opérateur. En se basant sur ce principe et la matrice d'Eisenhower développée, les temps sont regroupés selon 4 catégories : les temps productifs, les temps peu productifs, les temps mal productifs et les temps non productifs. Ces différentes catégories, à l'exception des temps productifs, sont définies plus en détails en prenant en compte les causes qui les provoquent partiellement ou entièrement (voir Figure 24). Cette taxonomie est réalisée en s'inspirant de plusieurs études (Badiger & Gandhinathan, 2008; Foulloy et al., 2019; Garre et al., 2017; Manotas Duque & Cadavid, 2007; Singh et al., 2013; Stamatis, 2010), elle est ensuite validée via les cas d'étude avec les partenaires industriels. Un plan d'action est développé pour expliquer chaque activité dans cette taxonomie. Ce dernier est expliqué plus en détails selon 3 axes : sa définition, les méthodes de mesure théoriques ou pratiques et les plans d'action pour améliorer les temps de cette activité. Le Tableau 7 est un exemple du modèle Définition-Mesure-Plan d'action pour l'attente. Le reste des activités de la taxonomie peut être retrouvé en Annexe 2.

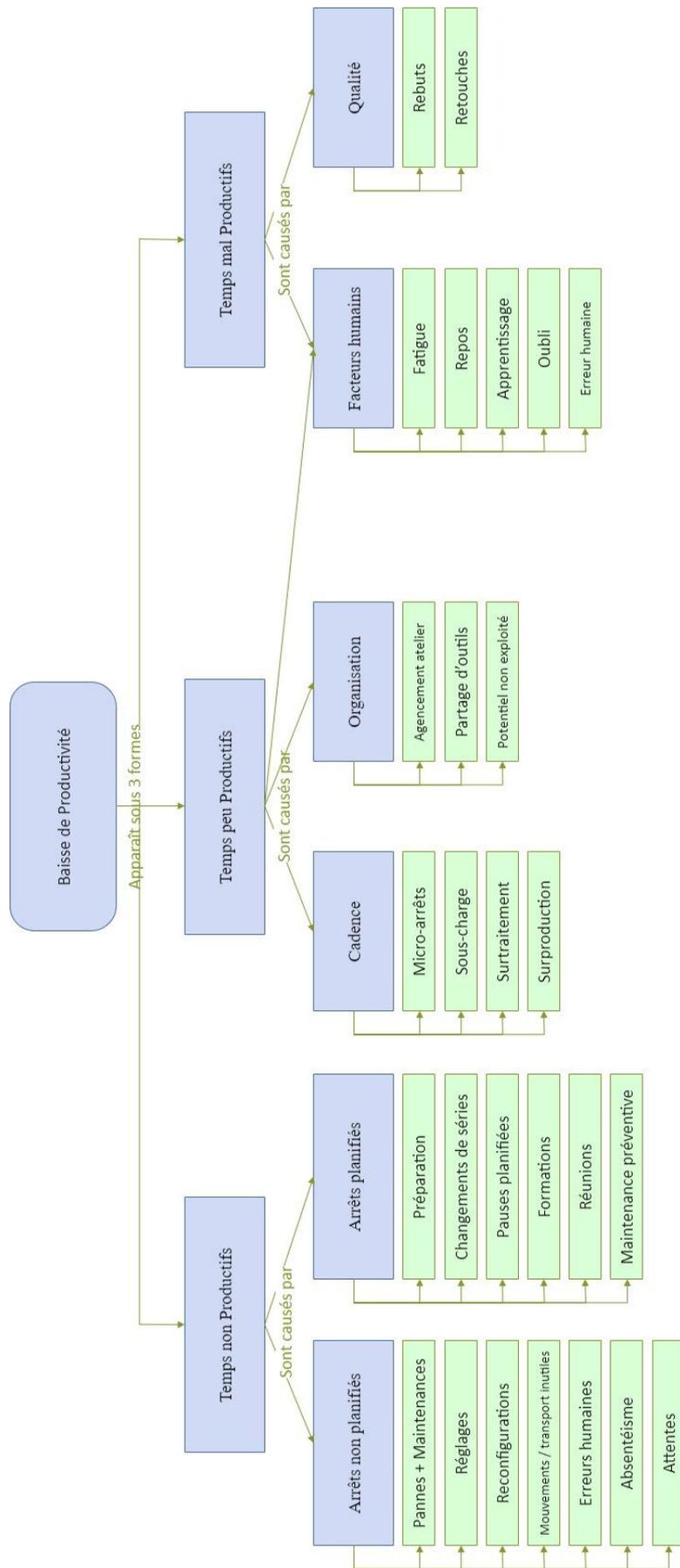


Figure 24. Taxonomie des trois catégories des temps non productifs, peu productifs et mal productifs

Tableau 7. Définition, mesure et plan d'action pour l'attente

Définition	Mesure	Plan d'actions
<p>(Stamatis D. 2010) catégorise les attentes selon deux logiques complémentaires :</p> <p>1) Selon la disponibilité de l'opérateur ou la machine : si l'un des deux est indisponible, alors une attente est obligatoire.</p> <p>2) Selon le flux d'information et de matière dans le système de production : dans ce cas l'attente est un résultat soit d'un blocage de flux (en aval), ou bien d'une coupure (en amont).</p> <p>Pendant ce temps d'attente, le produit est en train de gagner en coût et perdre en valeur (Stamatis D. 2010).</p> <p>Selon le même auteur, ce temps d'attente ne peut être amélioré qu'en traitant la ligne de production en entier.</p>	<p>(Cortes H. et al. 2016) identifient 4 types d'attentes et les façons de les mesurer:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Attente client : $W_c = \frac{T_w}{T}$ • Attente en cours : $W_{WIP} = \frac{\sum_{\forall WIP} 1}{N} \sum_{i=1}^N WQ_i$ • Attente machine : $W_m = 1 - \frac{\sum_{\forall W} T_{Ri}}{nT}$ • Attente opérateur : $W_o = 1 - \left(\frac{T_w + T_m}{T}\right)$ 	<p>Le but de la thèse est de mettre en place des actions pour réduire et exploiter les Temps non Productifs (attentes incluses) en se basant sur les variations de cadence, les facteurs humains et autres paramètres du système de production.</p>

Les temps perdus sont regroupés selon les 3 catégories identifiées précédemment. Par exemple, vu que le temps non productif est décrit comme un arrêt de la production, il se compose des activités qui enclenchent un arrêt partiel ou complet du système de production. Ces arrêts sont ensuite divisés en 2 parties : les arrêts planifiés et les arrêts non planifiés. Cette catégorisation sert à différencier les arrêts sur lesquels l'entreprise a un contrôle direct et peut donc réduire leur fréquence, leur amplitude ou leur impact. Par exemple, les pannes sont des arrêts sur lesquels l'entreprise exerce une influence indirecte parce que pour les réduire il faut influencer d'autres paramètres comme les maintenances ou l'utilisation de la machine. La deuxième catégorie des temps peu productifs est influencée par l'attente et les mouvements qui sont regroupés selon 3 catégories : la cadence, l'organisation et certains facteurs humains. Ces catégories peuvent contenir des aspects tels que les micro-arrêts qui ne sont pas assez longs pour entraîner l'arrêt de la production, mais qui sont assez longs pour être pris en compte au vu de leur influence. L'attente et les mouvements sont influencés par l'agencement de l'atelier de travail, donc, un changement de l'agencement peut avoir un impact positif (ou négatif) pour l'attente. Enfin, la troisième partie est influencée par la qualité et les facteurs humains. La relation entre les deux est expliquée plus en détails dans le chapitre précédent. Par exemple, des facteurs humains médiocres résultent en une hausse de la probabilité d'erreur humaine et donc plus de chance de commettre des erreurs (Givi et al., 2015).

Dans la suite de la thèse sont notés Temps non Productifs (TnP) les 3 catégories des temps perdus. Donc les Temps non Productifs (TnP), Temps peu Productifs (TpP) et les Temps mal Productifs (TmP) sont tous regroupés sous le terme générique TnP.

II. Modèle et méthodologie

1. Présentation de la méthodologie et du modèle

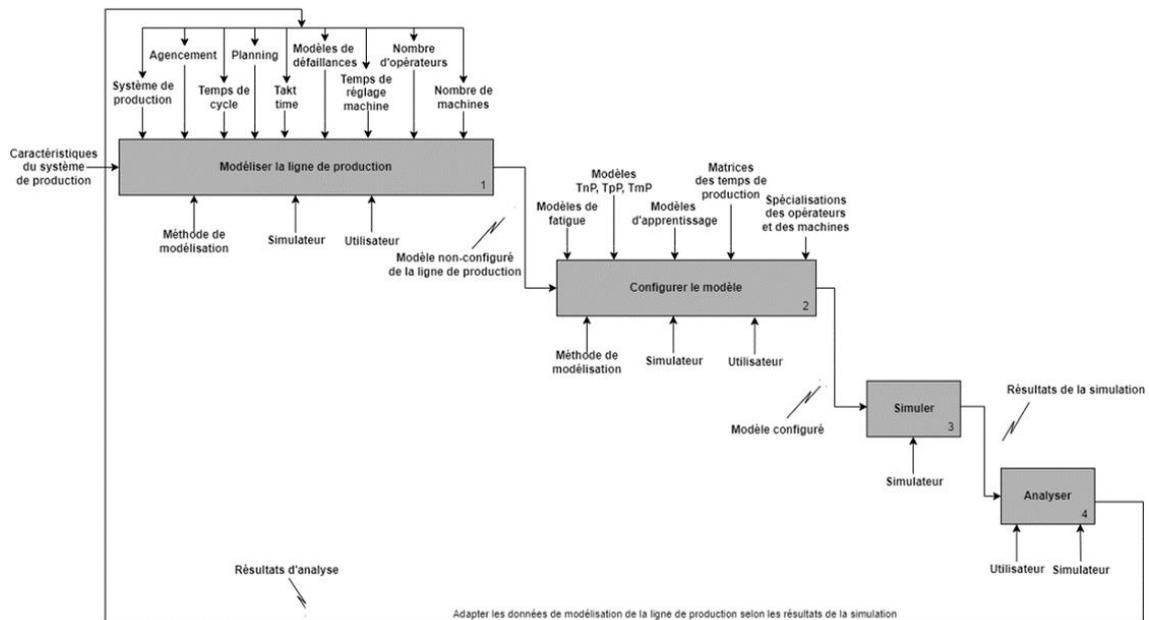


Figure 25. Méthodologie de développement du modèle

La question clé à laquelle cette partie tente de répondre est comment développer un modèle qui permet d'étudier tous les aspects précédemment cités, les analyser ainsi que leurs interactions. Une partie de cette question est déjà répondue lors du chapitre de recherche bibliographique dans le choix des concepts et de l'approche. En revanche, leurs détails ainsi que la méthodologie et le modèle ne sont pas encore présentés. Le but de cette partie est d'établir ces éléments dans le but de répondre à la question clé. Par la nature pratique et opérationnelle de cette thèse, le modèle doit répondre à certaines exigences spécifiques telles que :

- Le modèle doit pouvoir gérer les 3 piliers simultanément : la productivité (et par contraste, la non-productivité), les facteurs humains et les marges de manœuvre.
 - Quantifier la productivité pour un meilleur suivi.
 - Quantifier les facteurs humains qui sont originellement de nature qualitative.
 - Gérer les marges de manœuvre de manière implicite à partir de la productivité et des facteurs humains (par exemple, selon le taux d'utilisation de l'opérateur).
- Le modèle doit pouvoir gérer les paramètres classiques d'un système de production (comme les temps de cycle, les défaillances, etc.).
- Le modèle doit traiter la variabilité de production.
- Le modèle doit gérer un système de production complexe.

- Le modèle doit offrir une flexibilité pour pouvoir alterner entre plusieurs cas d'étude & scénarii.
- Modèle multi-agents : Le modèle doit prendre en compte l'aspect de population pour décrire plusieurs acteurs similaires.
- Modèle multi-agents : Le modèle doit prendre en compte l'aspect d'individualité pour modéliser des acteurs de la même population de manière indépendante.
- Le modèle doit être facile à utiliser, comprendre et interpréter pour assister la prise de décision.

Pour répondre à ces exigences, la méthodologie suivie pour développer le modèle est composée de trois étapes principales (voir Figure 25) :

- (1) La modélisation d'une ligne de production.
- (2) L'enrichissement du modèle via la prise en compte des TnP, des facteurs humains et des marges de manœuvre.
- (3) La simulation via la prise en compte de stratégies et scénarii. Cette dernière étape consiste à tester plusieurs stratégies comme l'allocation statique, la rotation statique (îlots) ou la rotation dynamique.

Chacune de ces stratégies est ensuite mise en place selon plusieurs scénarii différents pour étudier leurs résultats. Cette méthodologie permet d'avoir plusieurs couches, chacune traitant un aspect des exigences citées, pour permettre des modifications et ainsi une flexibilité lorsque les changements sont sollicités. En plus, le modèle est itératif. Les résultats de la simulation sont ensuite réinjectés dans la première étape en changeant les données d'entrée et de contrôle dans le sens des résultats souhaités. Dû à la complexité du problème, et comme discuté dans le chapitre précédent, trouver une solution globale pour ce type de problématique est très difficile, voire impossible, d'où le besoin d'une méthodologie itérative.

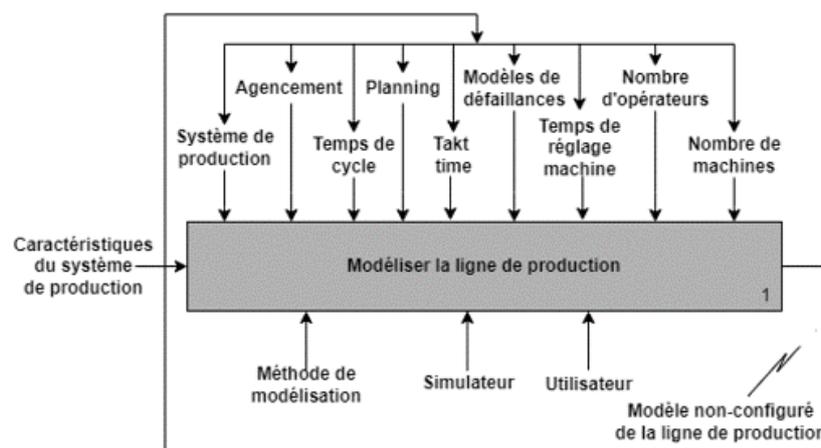


Figure 26. Modélisation de la ligne de production

La Figure 26 représente la première partie de modélisation d'un système de production. Elle se base sur plusieurs études et les différentes améliorations suite aux expérimentations réalisées lors de cette thèse. En effet, hormis les paramètres

classiques comme l'agencement du système de production, le nombre d'opérateurs et le nombre de machines, d'autres paramètres comme le temps de cycle s'avèrent avoir une influence importante sur la performance et les facteurs humains des opérateurs (Botti et al., 2017). Selon (Pakdil & Leonard, 2014), un temps de cycle idéal doit prendre en compte les incertitudes et les variabilités, sans quoi les facteurs humains des opérateurs peuvent se détériorer. Le temps de cycle doit ainsi avoir une certaine marge de manœuvre pour offrir plus de flexibilité à l'opérateur. Le choix du modèle de défaillance utilisé pour simuler les pannes des machines est aussi important. Les modèles de défaillances sont étudiés plus en détails lors du développement de la logique opérateur (voir Figure 32. Modèle de défaillances : loi exponentielle et loi Weibull).

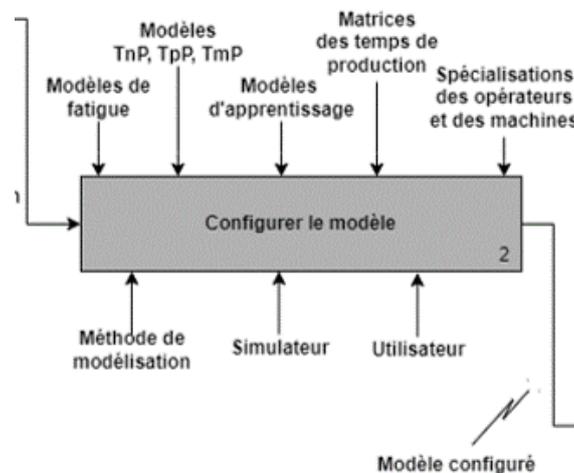


Figure 27. Configuration du modèle de la ligne de production

Le modèle réalisé grâce à cette première étape est ensuite utilisé pour alimenter la prochaine étape. Il est utilisé pour définir plusieurs cas d'étude ou scénarii pour la 3ème étape de simulation en réalisant les changements nécessaires sur les données d'entrée dans le but de produire le scénario le plus adéquat (ou reproduire un scénario réel pour le simuler). Avant cette étape, le modèle en sortie de la première étape est utilisé dans la 2ème étape pour être enrichi par d'autres aspects et modèles dont les trois piliers et les aspects d'individualisation des opérateurs et machines etc. (voir Figure 27). Finalement, la troisième étape est le processus de simulation qui prend en compte les 2 étapes précédentes en tant que données d'entrée pour le simulateur. Cette étape de simulation est expliquée plus en détails à la fin de cette partie.

Le modèle en Figure 28 regroupe les 4 entités principales aux travaux de cette thèse : l'opérateur, la machine, le produit et la tâche (ou l'activité). Ces 4 entités sont regroupées selon une planification. Par exemple, un opérateur réalise une tâche ou une activité sur une machine pour fabriquer un produit. Ces 4 données sont inscrites selon une planification qui précise son début et sa durée (ou sa fin). Les travaux de cette thèse ne s'intéressent pas à la planification ou à son optimisation, mais plutôt à l'identification des TnP, d'où l'utilisation et l'utilité de la planification. L'intérêt de ce modèle est de regrouper les 3 piliers ainsi que les paramètres du système de production

pour étudier et analyser les interactions des différentes entités dans un milieu similaire à la réalité. Ce type de modèle aussi appelé modèle distribué ou parallèle (Cicirelli et al., 2011) se base sur le partitionnement du modèle en plusieurs sous-modèles où chacun gère un aspect différent. Ces sous-modèles, ensuite, communiquent entre eux via des messages asynchrones et chaque sous-modèle est géré par des diagrammes d'état. L'utilisation des diagrammes d'état permet de réagir et s'adapter face à l'environnement grâce à leur nature. En effet, les états sont liés entre eux par des connexions qui peuvent être conditionnelles ou non. Théoriquement, le choix des conditions est illimité. Cependant, dans la réalité, le choix des conditions est limité par l'outil choisi. Par exemple, des conditions de passage d'un état à l'autre peut être le changement d'une certaine propriété de l'agent.

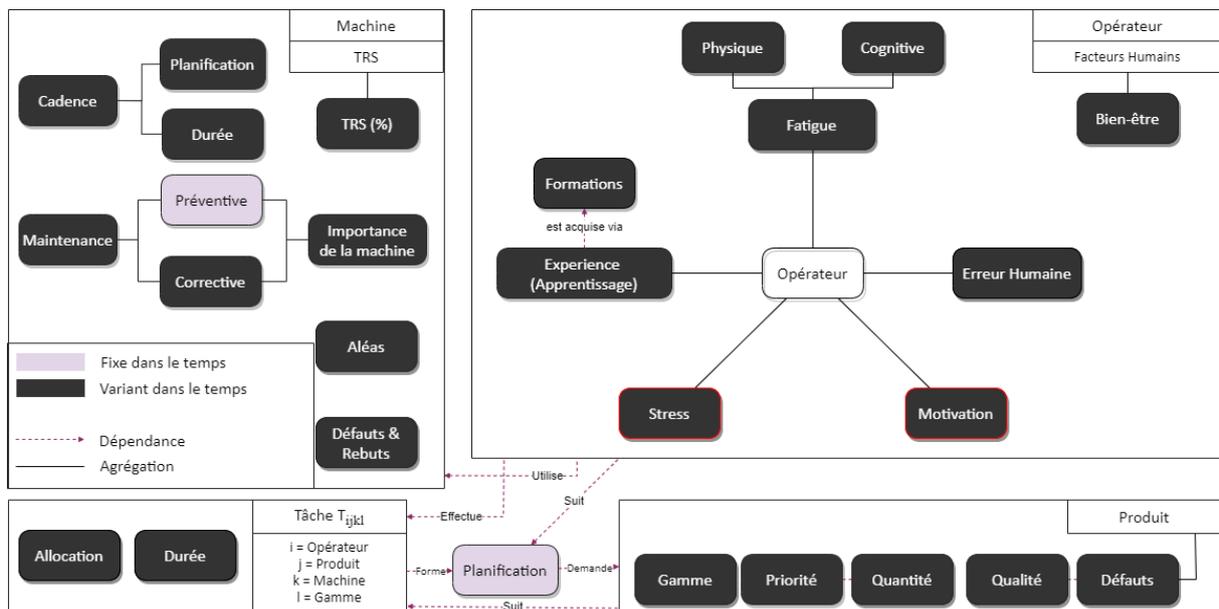


Figure 28. Modèle Opérateur-Machine-Produit-Tâche (Le modèle ne traite pas le stress et la motivation, mais ils font partie des facteurs humains de l'opérateur)

Le diagramme de classes du modèle (voir Figure 29) représente mieux le rôle de la tâche (activité) comme entité centrale qui lie les quatre autres entités. Ce modèle est aussi plus adapté à implémenter dans un simulateur grâce à son organisation orientée objet, ce qui permet de présenter de manière distincte chaque classe avec son nom, ses attributs (ses paramètres intrinsèques) et ses méthodes (ses fonctions ou actions). Le diagramme de classes permet aussi de mieux expliquer les relations entre les classes, leurs types et leurs dépendances et d'exprimer certaines hypothèses telles que les cardinalités. Pour ce modèle, l'opérateur est associé à une tâche, un opérateur peut réaliser plusieurs tâches. Une tâche peut être réalisée sans opérateur (dans le cas d'une machine automatique) ou au maximum par un opérateur. Le diagramme permet aussi de décrire la relation entre les tâches et les machines et les tâches et les produits. Enfin, la tâche est une agrégation de la planification. Autrement dit, la planification contient plusieurs tâches qui lui sont agrégées.

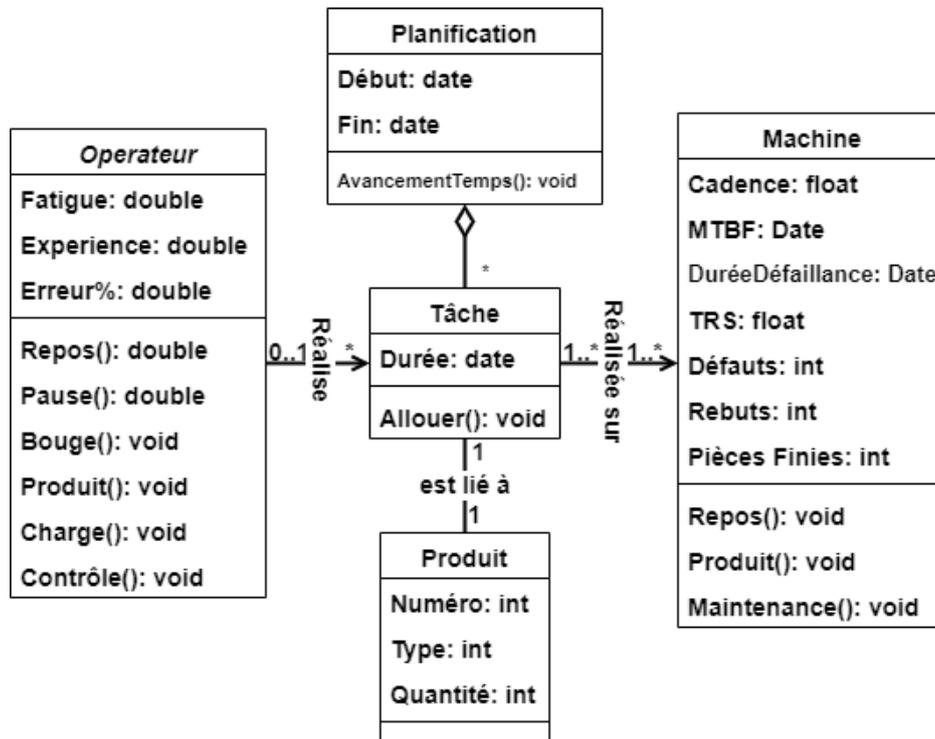


Figure 29. Diagramme de classes du modèle

2. Vue globale du modèle : entités et paramètres

Le modèle (Figure 28) contient plusieurs entités pour assurer le bon fonctionnement de la simulation. Les entités identifiées sont :

- L'environnement : dans ce cas l'usine est l'environnement de travail et représente le lieu général qui regroupe le reste des entités.
- La ligne de production : l'espace exact de travail à l'intérieur de l'environnement (l'usine) et qui contient les différentes entités telles que les machines et les opérateurs, les différents flux physiques de matière et les flux d'informations.
- Les allocations, comme les flux d'informations, ne sont pas des entités physiques, mais sont primordiales au bon fonctionnement du modèle et à la communication entre les autres entités.
- Les distances entre les différentes entités peuvent être statiques comme la distance entre les machines, ou dynamiques comme la distance entre un opérateur en mouvement et une machine.
- Les opérateurs sont les acteurs principaux du modèle. Ils prennent des décisions selon certains critères et enclenchent des processus si besoin.
- Les machines sont en étroite relation avec les opérateurs. Ces deux entités communiquent entre elles de manière constante, ce qui permet aux opérateurs de prendre des décisions. La communication entre les machines et les opérateurs dans le modèle théorique peut être comparée aux signaux lumineux des machines dans la réalité.
- Les pièces (brutes, semi-finies et finies) : représentent le flux physique qui se déplace dans le système de production. Une pièce avance dans le système de

production lorsque l'opérateur et/ou la machine a validé le transfert. Selon le système de production étudié, cette validation peut être réalisée par l'opérateur, la machine ou les deux (d'où la nécessité d'un modèle flexible et reconfigurable).

Une entité représente une population d'agents. Pour différencier entre les agents, des paramètres sont introduits. Le Tableau 8 regroupe les entités utilisées dans le modèle, ainsi que leurs paramètres et leurs utilisations.

Tableau 8. Liste des entités, leurs paramètres et fonctions

Entités	Paramètres	Définition & utilisation
Environnement	Horizon de travail	Représente la durée de travail que le modèle traite. Ce paramètre permet de choisir exactement l'horizon du modèle de quelques minutes jusqu'à plusieurs jours.
	Liste des opérateurs	Permet de choisir parmi la liste totale des opérateurs, ceux qui sont inclus dans le modèle
	Liste des machines / stations	Permet de choisir parmi la liste totale des machines, celles qui sont incluses dans le modèle
	Pauses	Fixer l'heure de prise de pauses et leurs durées (dans le cas où les marges de manœuvre sont rigides ou semi-rigides)
	Matrice Opérateur-machine	Permet de faciliter le choix du couple opérateur-machine (dans le cas où l'agencement est fixe) ou le placement des opérateurs au début (si l'agencement est dynamique)
	Matrice opérateur-temps	Temps opératoire de l'opérateur
	Matrice activités	Temps opératoire par activité ou par tâche
	Matrice machine-produit	Temps opératoire de la machine pour un certain type de pièce
	Matrice machine-stock	Possibilité d'ajouter des pièces en stock en début du lancement du modèle
	Paramètres des facteurs humains	Permet de modifier les paramètres des facteurs humains pour refléter les changements souhaités
Paramètres de défaillance machines	Permet de modifier les paramètres des machines comme les durées des défaillances et les MTBF	

Opérateur	Diagramme d'état	Décrit la logique que l'opérateur suit (se reposer, attendre, bouger, produire, charger, contrôler)
	Facteurs humains	Stocke les informations relatives aux facteurs humains de chaque opérateur tels que la fatigue, l'expérience et la probabilité d'erreur humaine
	Vitesse de marche	La vitesse de déplacement de l'opérateur en m/s
	Distance totale parcourue	Compteur de la distance totale parcourue par l'opérateur calculée par incrémentation
	Historique machines	L'historique des machines que l'opérateur a manipulé
	Liste « To-do »	Une liste des tâches à réaliser et des machines à manipuler
	Historique des tâches	L'historique des tâches réalisées par l'opérateur
	Paramètres de productivité	Historique, histogrammes et graphes des paramètres de productivité (et de non-productivité) propres à l'opérateur
	Fonctions	Les différentes fonctions que l'opérateur peut accomplir
Machine	Diagramme d'état	Décrit la logique que la machine suit (Pause, Production, Maintenance)
	Horaires	Précise les horaires de mise en marche et fermeture des machines (si existant)
	Historiques	Historiques des opérateurs et des produits passés par cette machine
	Paramètres de productivité	Historique, histogrammes et graphes des paramètres de productivité (et de non-productivité) propres à la machine
Produit	Type	Type de produit
	Stock	Disponibilité et quantité en stock

3. Vue détaillée du modèle : relations entre les entités du modèle

Entre les entités physiques décrites dans la partie précédente existent des relations pour partager des informations, transmettre des ordres ou diriger son fonctionnement :

- Flux interne opérateur : flux interne d'informations d'aide à la décision qui régit la logique de l'opérateur dans le système de production.
- Entre l'opérateur et la machine : un flux d'information est nécessaire pour transmettre les disponibilités des machines et celles des opérateurs. Ce flux

permet aussi d'informer les opérateurs des défaillances des machines, ou pour informer les machines de la non-disponibilité des opérateurs pour la production ou la maintenance.

- Entre l'opérateur et l'environnement : un flux d'information entre l'opérateur et l'environnement dans le but d'informer l'opérateur des débuts et fins de pauses, de production et autres informations importantes relatives à la production comme les rotations.
- Flux interne machine : flux interne d'information qui régit le bon fonctionnement de la machine selon la situation.
- Entre la machine et le produit : pour garder un historique des pièces produites par chaque machine ou l'inverse.
- Entre le produit et l'environnement : pour suivre l'évolution du stock des produits et des pièces brutes.

4. Vue détaillée du modèle : modèle de l'environnement

L'environnement est l'espace physique et informationnel où se tient le modèle. Physiquement, c'est l'espace où sont installés les machines, stocks et convoyeurs. Les opérateurs empruntent les chemins pour se déplacer, pour aller à une machine ou déplacer les palettes de pièces, par exemple. D'un point de vue d'information du modèle, l'environnement assure le rôle de communication entre les différentes entités.

5. Vue détaillée du modèle : modèle de l'opérateur

En plus des modèles identifiés dans le chapitre précédent, c'est-à-dire les modèles des facteurs humains, le modèle fatigue-repos, le modèle apprentissage-oubli, le modèle de la probabilité d'erreur humaine et le modèle des marges de manœuvre, d'autres sont définis dans ce chapitre.

a. *Modèle des temps*

Le dernier aspect que le modèle de l'opérateur doit gérer est l'aspect de temps et surtout les temps non productifs définis lors de cette thèse. En effet, les temps permettent de quantifier la performance de l'opérateur. Jusque-là le modèle gère l'aspect des facteurs humains et des marges de manœuvre, ce qui regroupe la santé et la sécurité au travail, donc les temps permettent de gérer la partie performance de l'opérateur. La gestion des temps par le modèle est expliquée plus en détails dans la partie développement de l'outil et de la simulation.

b. *Modèle simplifié de l'opérateur*

Le modèle de l'opérateur est simplifié pour répondre aux exigences des travaux de cette thèse. En plus des exigences des facteurs humains, le modèle de l'opérateur doit prendre en compte les marges de manœuvre et les temps (voir Figure 30). La synthèse du modèle en Figure 30 ne représente pas les relations entre les différents sous-modèles. Par exemple, comme montré précédemment dans le chapitre de recherche bibliographique, il existe une relation directe entre la cadence de l'opérateur et sa fatigue. Le modèle prend en compte cette relation et d'autres, similaires. Cependant, elles ne sont pas représentées sur la Figure 30 pour ne pas encombrer la figure. Cette

figure regroupe uniquement les trois piliers de la thèse qui forment le modèle de l'opérateur.

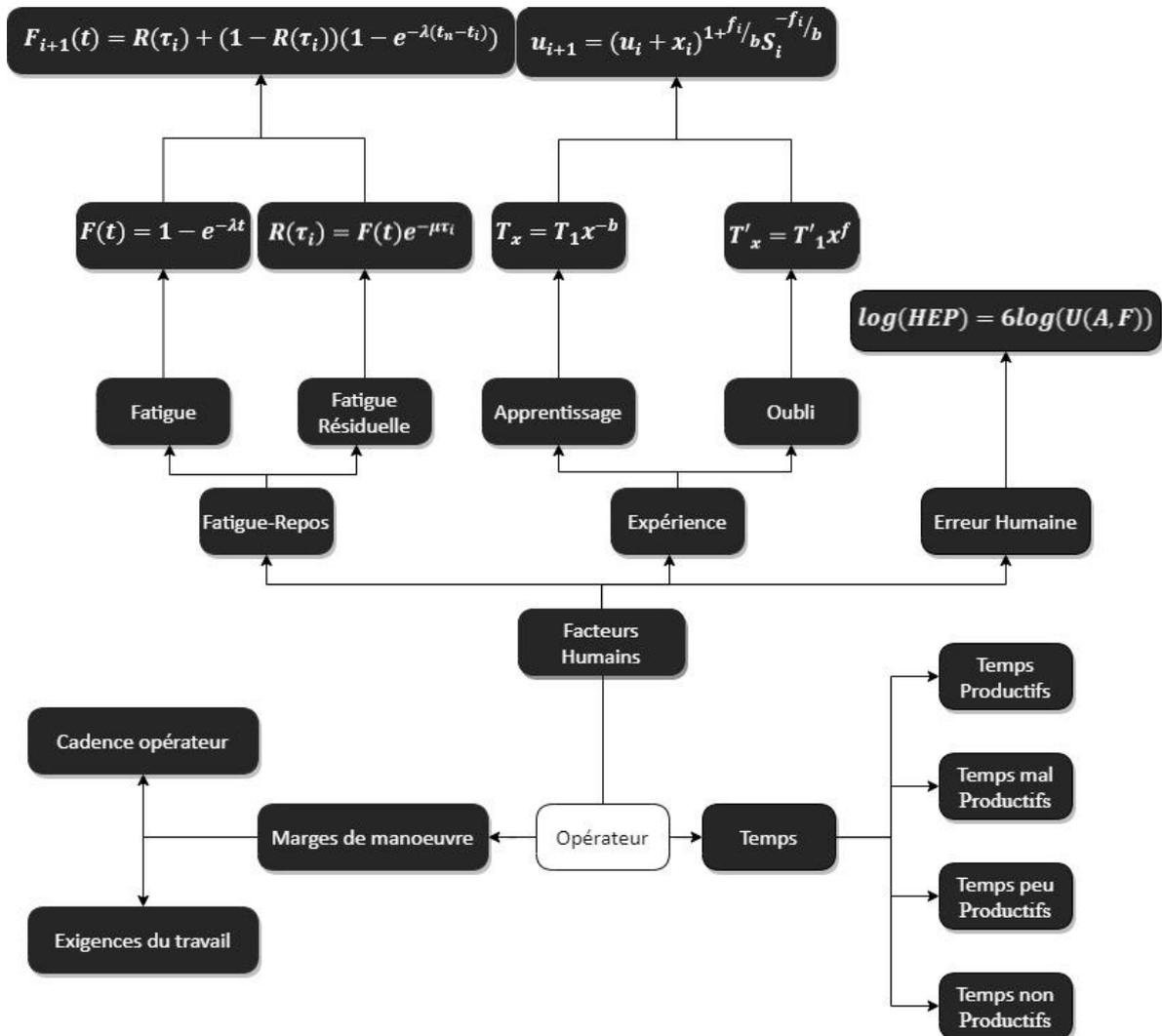


Figure 30. Synthèse du modèle de l'opérateur

c. Diagramme d'état de l'opérateur

Pour piloter le modèle de l'opérateur, un diagramme d'état est développé. Celui-ci permet de régir le bon fonctionnement du modèle de l'opérateur par rapport au reste du modèle selon un ordre et raisonnement souhaités. L'utilisation des états et transitions permet de vérifier des contraintes, calculer des indices de performances clés (KPI), de communiquer avec les autres acteurs ou avec l'environnement, de lancer des algorithmes, ainsi que d'autres actions, notamment au niveau des transitions, telles que les transitions temporelles qui s'enclenchent uniquement après un certain délai, les transitions stochastiques qui suivent une loi de probabilité, les transitions messagères qui permettent de communiquer entre les acteurs du modèle et les transitions conditionnelles qui vérifient si certaines conditions prédéfinies sont remplies.

La Figure 31 représente le diagramme d'état du modèle de l'opérateur. Selon la logique développée sur ce diagramme, l'opérateur commence par vérifier l'ouverture des

machines. Autrement dit, l'opérateur vérifie si sa période de travail a commencé. Une fois que l'opérateur débute (la machine est ouverte), il peut rejoindre la machine à laquelle il est alloué via l'état nommé « Point_départ ». C'est au niveau de cet état que l'opérateur décide d'utiliser une stratégie ou une autre, comme la stratégie d'allocation statique, la stratégie de rotation ou la stratégie d'îlots de fabrication. Cet état permet à l'opérateur d'agir différemment selon la stratégie choisie. Cet état offre aussi deux possibilités à l'opérateur selon sa situation et/ou la durée écoulée : (1) prendre une pause ou (2) continuer à travailler.

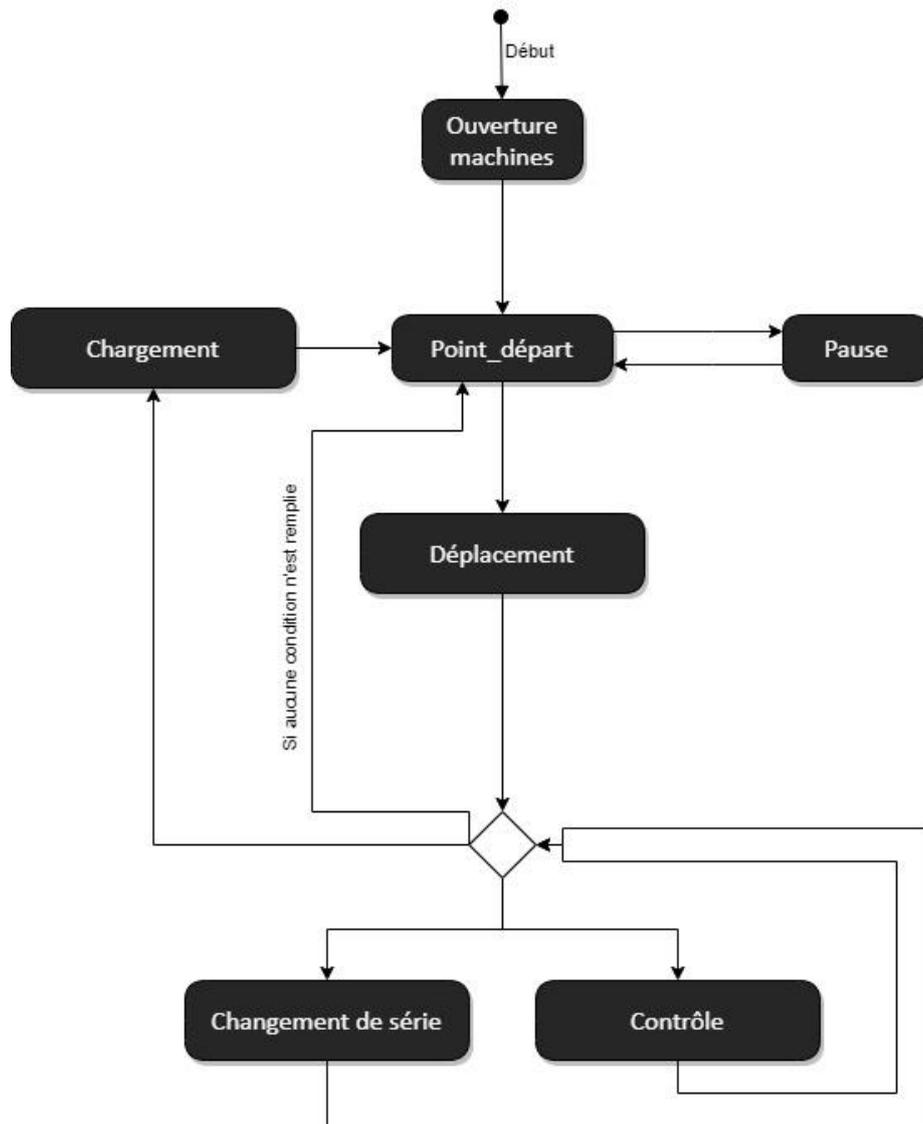


Figure 31. Diagramme d'état du modèle de l'opérateur

Si l'opérateur est fatigué (représenté par un seuil limite) ou si l'heure de pause est atteinte, l'opérateur change vers l'état « Pause » qui permet de prendre une pause. Cet état contient des algorithmes qui calculent la fatigue actuelle et la fatigue résiduelle de l'opérateur (la fatigue avant et après la pause). Cet état est lié à une transition temporelle qui contrôle la durée de la pause, l'opérateur revient ensuite à l'état précédent lorsque la durée de la pause est terminée. Pendant qu'il est dans cet état,

l'opérateur attend la disponibilité d'une machine, avant de s'y déplacer. Cette décision est représentée par la transition messagère puis la transition d'arrivée d'acteur. La première représente la libération de la machine et son appel, et la seconde détermine le moment de l'arrivée de l'opérateur à la machine. Une fois que l'opérateur est arrivé à la machine, il a plusieurs possibilités selon la situation : (1) réaliser un contrôle visuel sur la machine, (2) réaliser un changement de série, (3) charger un produit / produire ou (4) revenir à la case départ « Point_départ » au cas où les trois premiers choix ne sont pas possibles. Dû à la nature du nœud, ces actions peuvent être réalisées en série ou individuellement. Cependant dans tous les cas, l'opérateur réalisera la 3^{ème} opération de chargement/production qu'il ait réalisé le contrôle et/ou le changement de série ou non. Les trois premiers états ou actions sont tous régis par une durée prédéfinie comme donnée d'entrée du modèle. Autrement dit, les durées de contrôle visuel, de changement de série et de chargement/production sont facilement gérés par le modèle via les données d'entrée. De plus, ces temps sont aussi influencés par les modèles de facteurs humains présentés précédemment. Par exemple, le temps de production ou de chargement peut baisser ou augmenter selon l'apprentissage et la fatigue de l'opérateur. Le modèle est ainsi dynamique et plus réaliste que les modèles développés dans la littérature. Finalement, l'opérateur revient vers la case départ et le cycle recommence. Toutefois, il faut garder en tête que le modèle de l'opérateur n'est pas dissocié des autres modèles : il est lié au modèle de la machine, au modèle de l'environnement ou encore au modèle des produits. Tous les modèles sont interconnectés et communiquent entre eux. Cette interconnectivité crée une dynamique qui, à notre connaissance, n'a pas pu être représentée dans d'autres modèles disponibles dans la littérature. Après avoir défini chaque modèle séparément, les interactions entre les modèles sont présentées à la fin de ce chapitre.

6. Vue détaillée du modèle : modèle de la machine

Il existe plusieurs types de machines de production. Il est donc impossible de réaliser un modèle qui englobe tous les types de machines. Pour ces travaux de thèse, le modèle des machines se base sur les machines de production semi-automatiques où le rôle de l'opérateur se limite à charger et le décharger de la machine, ensuite la machine s'occupe de la production de manière automatique (assemblage). Le modèle permet aussi de représenter une production manufacturière où l'opérateur travaille directement sur la machine pour produire (comme les machines-outils). Peu importe la situation modélisée, le modèle global doit alors gérer les temps et les marges de manœuvre par rapport à des temps masqués de production, de mouvement, de réglages et autres manipulations.

Comme le modèle de l'opérateur, le modèle de la machine est divisé en plusieurs sous-modèles où chacun gère un aspect particulier de la machine. Le premier sous-modèle gère l'ouverture et la fermeture de la machine, le second gère les différentes tâches à réaliser pour garantir le bon fonctionnement de la machine telles que les réglages ou les changements de série. Le troisième gère le fonctionnement de la machine et la

production. Enfin, le dernier traite l'aspect des défaillances dans le but d'imiter les défaillances dans la réalité.

a. Modèle de fermeture et fermeture de la machine

Le premier modèle, aussi simple soit-il, contrôle un aspect très important du modèle global. En effet, il permet de gérer la planification de la production en ouvrant et en fermant les machines. Il permet aussi de communiquer avec les opérateurs vis-à-vis de ces fermeture et ouverture de chaque machine. Il permet alors une gestion facile de la planification de façon statique ou dynamique. En effet, il est possible d'utiliser des méthodes d'optimisation de planification lors de cette première étape. Les travaux de cette thèse ne visent pas à optimiser les planifications. La planification en sortie du modèle est régie par les logiques des opérateurs, machines et environnement sans post-traitement. L'implémentation de méthodes d'optimisation pendant cette étape est discutée plus en détails dans le chapitre de perspectives.

b. Modèle des tâches

Pour assurer le bon fonctionnement de la machine, un sous-modèle est implémenté pour gérer le besoin des machines en termes de maintien en état. Ce sous-modèle prend en compte plusieurs aspects tels que :

- **Chauffe machine** : aussi appelée première passe, c'est la période en début de fabrication où la machine a besoin de temps pour atteindre le régime idéal de fonctionnement.
- **Réglage** : en plus de la chauffe, les machines ont besoin de certains réglages pour bien fonctionner. Selon la machine, les réglages peuvent être réalisés une fois par journée ou plusieurs fois, par exemple avant chaque production. D'autres fréquences de réglages existent aussi.
- **Besoin opérateur** : le sous-modèle permet de prendre en compte la période où la machine est en manque d'opérateur et donc n'est pas productive. Deux remarques importantes à garder en tête : (1) ce temps est minime dans l'allocation statique, mais important dans les rotations et la stratégie en îlots, (2) le sous-modèle permet de faire la différence entre le « besoin opérateur » et la production automatique où la machine n'a pas besoin d'opérateur.
- **Changement de série & changement d'outils** : est une étape enclenchée lorsque la planification décide de changer de type de produits
- **Besoin produit** : Similaire au besoin opérateur, le sous-modèle permet de prendre en compte la cadence des différentes machines et la dynamique entre les machines, opérateurs, produits, stocks, distances, etc. Avant d'amorcer l'étape de production, la machine vérifie grâce à ce sous-modèle si les stocks amonts sont suffisants.

Pour conclure, ce sous-modèle permet de régir le bon fonctionnement de la machine entre le moment où elle est ouverte et le moment de produire. Comme pour le modèle de l'opérateur, il n'est pas détaché du reste du modèle, mais communique avec plusieurs

autres modèles et aspects du modèle global pour créer une dynamique complexe qui se rapproche de la réalité.

c. Modèles de fonctionnement et production

Le modèle de fonctionnement et de production suit l'étape de vérification du besoin produit, chronologiquement parlant. Il est divisé en 3 « circuits » : chargement/déchargement, production et contrôle. Cette division permet de séparer ces trois tâches pour se rapprocher de la réalité modélisée. En effet, dans cette réalité modélisée ces 3 tâches sont en série, c'est-à-dire qu'une tâche ne peut commencer que lorsque la dernière est terminée. Cependant, il est tout à fait possible (à la suite d'une simple modification du modèle et du code) de réaliser ces tâches en parallèle, dans le but de se rapprocher d'une autre réalité où le chargement est réalisé en parallèle de la production, par exemple. Pour ces travaux de thèse, la première logique est employée. La seconde logique n'est pas prise en compte dans la portée de cette thèse, mais elle est expliquée lors du chapitre de perspectives.

d. Modèle de défaillances

Le sous-modèle de défaillances est un aspect très important du modèle global car il doit imiter l'aspect aléatoire des défaillances dans la réalité. Deux modèles de défaillances sont identifiés : (1) la loi de Weibull et (2) la loi exponentielle. Contrairement à la loi exponentielle qui n'a qu'un seul paramètre λ (voir l'équation (19)), la loi Weibull contient trois paramètres α , β et γ (voir l'équation (20)), où α est le paramètre d'échelle, β est le paramètre de forme et γ est le paramètre de position aussi appelé min (Figure 32). De ce fait, la loi Weibull est souvent utilisée pour imiter ou simuler la défaillance, elle permet de représenter une meilleure approximation de la défaillance des machines grâce aux plus grands nombres de possibilités qu'elle propose.

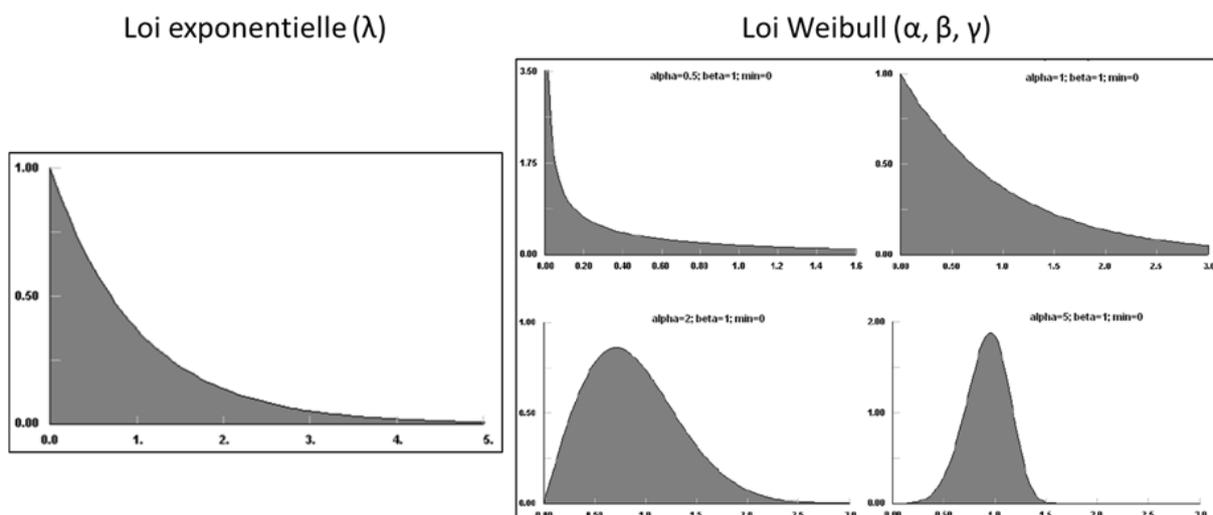


Figure 32. Modèle de défaillances : loi exponentielle et loi Weibull (AnyLogic Help, 2021)

$$f(x; \lambda) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{x - \min}{\beta}\right)^{\alpha-1} e^{-\left(\frac{x - \min}{\beta}\right)^\alpha} \quad (20)$$

Dans ce modèle développé, la loi Weibull est utilisée pour régir la logique des défaillances machines et ajouter l'un des différents aspects aléatoires que le modèle peut gérer. En effet, pour imiter la réalité, le modèle doit gérer certaines incertitudes. Enfin, lors du chapitre de cas d'étude, une étude sur les deux lois de défaillances identifiées est réalisée pour les évaluer leurs performances.

e. Synthèse du modèle des machines

Les sous-modèles développés peuvent être synthétisés sous forme du modèle global des machines figurant sur la Figure 33. Ce modèle comprend 4 sous-modèles principaux qui régissent un aspect particulier de la logique des machines, et qui, lorsqu'ils sont regroupés, permettent de piloter la logique de la machine dans sa globalité.

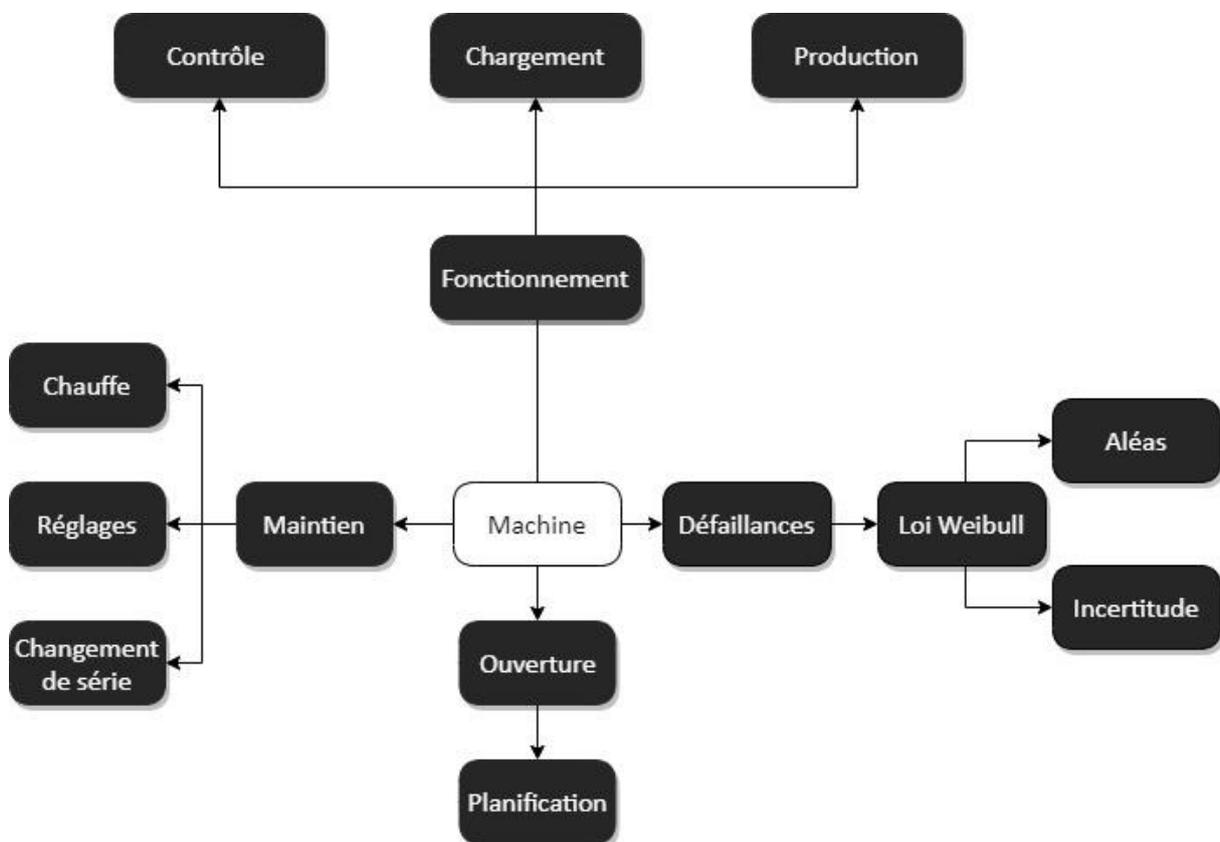


Figure 33. Synthèse du modèle des machines

f. Diagramme d'état de la machine

Tous les sous-modèles décrits précédemment sont assemblés pour générer le modèle qui régir la logique des machines. Pour piloter ce modèle, un diagramme d'état est développé. Tout comme le diagramme d'état de l'opérateur, celui-ci permet de s'assurer du bon fonctionnement de la logique des machines, au niveau des planifications, des tâches à réaliser, de la production, des défaillances ou même des communications internes et externes. Le diagramme d'état des machines se compose aussi d'états et de

transitions dans le but de séparer le fonctionnement individuel des sous-modèles développés tout en les unissant pour avoir un modèle cohérent.

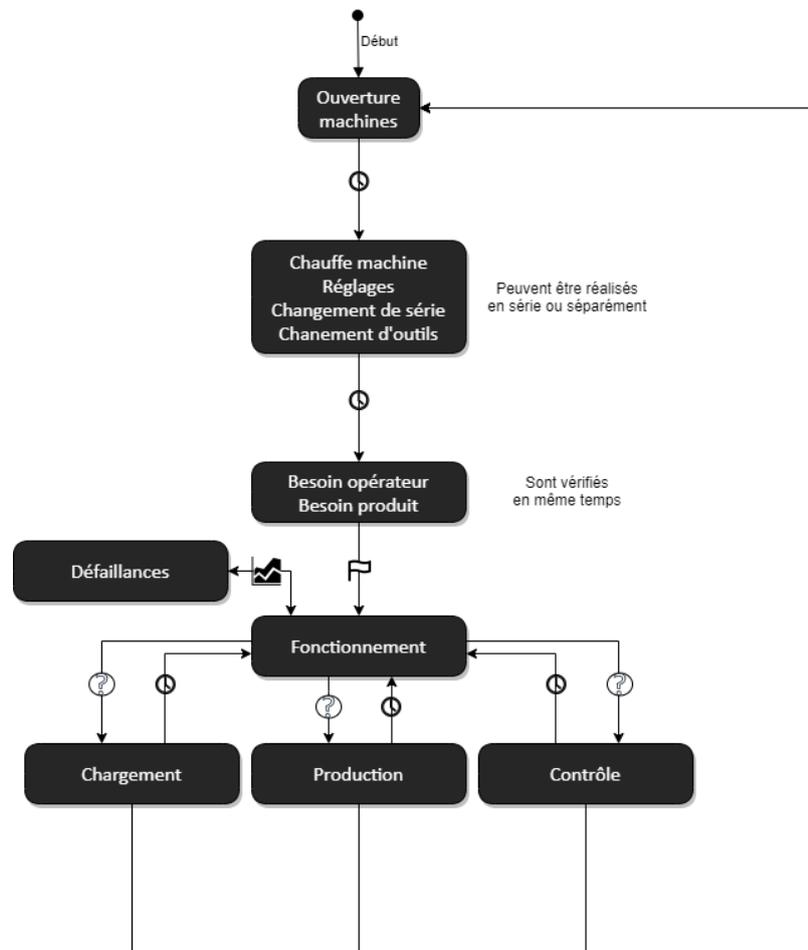


Figure 34. Diagramme d'état des machines

La Figure 34 représente le diagramme d'état des machines (les transitions sont expliquées en Tableau 11). La logique du diagramme commence par ouvrir les machines selon une planification prédéfinie, puis notifie les opérateurs. Selon le choix des données d'entrée, les tâches de type chauffe machine, réglage, changement de série et changement d'outils peuvent être réalisés automatiquement ou manuellement, et en série ou individuellement. Ensuite, la présence de l'opérateur et des pièces brutes sont vérifiées, ainsi que le besoin de réaliser un contrôle et/ou un chargement avant de commencer la phase de fonctionnement. La machine, ensuite, entre en phase de fonctionnement, où elle peut réaliser des tâches de chargement, de production ou de contrôle. Ces tâches peuvent être réalisées en la présence d'un opérateur ou non, le modèle permet de choisir entre un système de production entièrement manuel, automatique ou tout autre type intermédiaire. Par exemple, dans les cas d'étude considérés la production est entièrement automatique alors que le contrôle est entièrement manuel, cependant, la production est automatique pour certaines machines et manuelle pour d'autres. Ce modèle permet une flexibilité et une diversité qui, à notre connaissance, est absente dans la littérature. Finalement, en parallèle avec

le fonctionnement, une défaillance peut survenir. Selon le choix, elle peut être modélisée pour s'enclencher à n'importe quel moment ou uniquement pendant la production. Elle est régie par la loi Weibull précédemment définie. Pendant cette phase, la machine fait appel à un opérateur pour traiter la défaillance et revenir en phase de fonctionnement.

7. Interactions entre les modèles

Les points forts de l'approche choisie peuvent se résumer par les modèles développés de l'opérateur et de la machine. Ces derniers offrent une variété de possibilités suivant les aspects de facteurs humains qui offrent une nouvelle façon d'étudier et de quantifier la performance, mais aussi par les interactions entre ces modèles, notamment leurs communications internes et externes. Les interactions internes ont été traitées dans la partie du développement du modèle comme la baisse ou l'augmentation du temps de production suite aux changements de l'expérience et de la fatigue. Les interactions externes, quant à elles, sont les interactions entre les agents d'un même modèle (d'une même population) comme une interaction entre opérateurs, ou les interactions entre les agents de modèles différents (de populations différentes) comme une interaction entre un opérateur et une machine.

La Figure 35 représente les communications entre les modèles de l'opérateur et de la machine définis précédemment. Ces communications sont représentées en pointillés rouges, et peuvent être transmises dans les deux sens, de l'opérateur vers la machine ou dans le sens inverse. Ces communications permettent d'ajouter des contraintes externes aux modèles ce qui crée une dynamique complexe au sein du modèle qui se rapproche de la réalité. Par exemple, dans une stratégie en îlots où un opérateur gère plusieurs machines, une machine doit d'abord notifier l'opérateur de sa disponibilité, l'opérateur doit terminer sa tâche actuelle, dans ce cas-là, la machine sera en attente de la disponibilité de l'opérateur ce qui bloque l'avancement de la logique de la machine (chose qui ne serait pas arrivée si les modèles étaient indépendants).

8. Fonctionnement du modèle global & conclusion

La Figure 35 montre le fonctionnement du modèle global en se basant sur les deux sous-modèles de l'opérateur et de la machine, ainsi que les messages asynchrones qu'ils s'échangent. Cette approche offre une hiérarchie implicite qui a été définie de manière explicite via les états et les transitions. En effet grâce à la distribution de la logique des agents sous formes d'états et de transitions, une hiérarchie spécifique est mise en place ce qui donne un ordre d'exécution bien précis (voir les étapes 1 à 10). Ces étapes ne sont pas forcément chronologiques car les logiques de l'opérateur et de la machine fonctionnent de manière parallèle jusqu'à envoi de message asynchrone. Par exemple, l'étape 1 et 8 sont généralement exécutées simultanément, et les deux agents communiquent entre eux pour trouver un opérateur ou machine adéquats.

Pour conclure, le modèle global est l'ensemble des sous-modèles, relations, messages, données et paramètres définis et développés travaillant ensemble pour créer un système de production complexe qui imite un système de production réel dans le but de simuler

des situations, des scénarii et des stratégies de façon plus rapide, flexible, modulaire et moins coûteuse que de réaliser des expérimentations sur la ligne de production qui peuvent échouer. La méthodologie utilisée pour développer ce modèle commence du plus général vers le plus spécifique. En effet, elle commence par définir l'objectif globale qui est composée de trois étapes principales : modéliser la ligne de production, configurer le modèle et le simuler. Ces trois étapes sont ensuite définies plus en détails, aussi en allant du plus général au plus spécifique. L'architecture globale est définie en premier, puis les données, paramètres, agents, etc. sont définis par la suite. Finalement, chacun de ces détails est développé encore plus dans le but de bien identifier le rôle de chacun d'eux et d'offrir assez de détails pour la reproductibilité du modèle si nécessaire.

Le modèle et la méthodologie choisis pour le développer permettent de subdiviser le problème en ses segments élémentaires le rendant ainsi plus facile à gérer. En effet, une telle méthodologie permet de modéliser un système complexe en développant plusieurs sous-systèmes simples. Comme constaté pendant ce chapitre, les relations et interactions entre ces sous-systèmes sont aussi importantes que les sous-systèmes eux-mêmes, voire plus importantes dans certains cas. Enfin, le modèle tel que défini permet d'être implémenté plus facilement dans un outil de simulation.

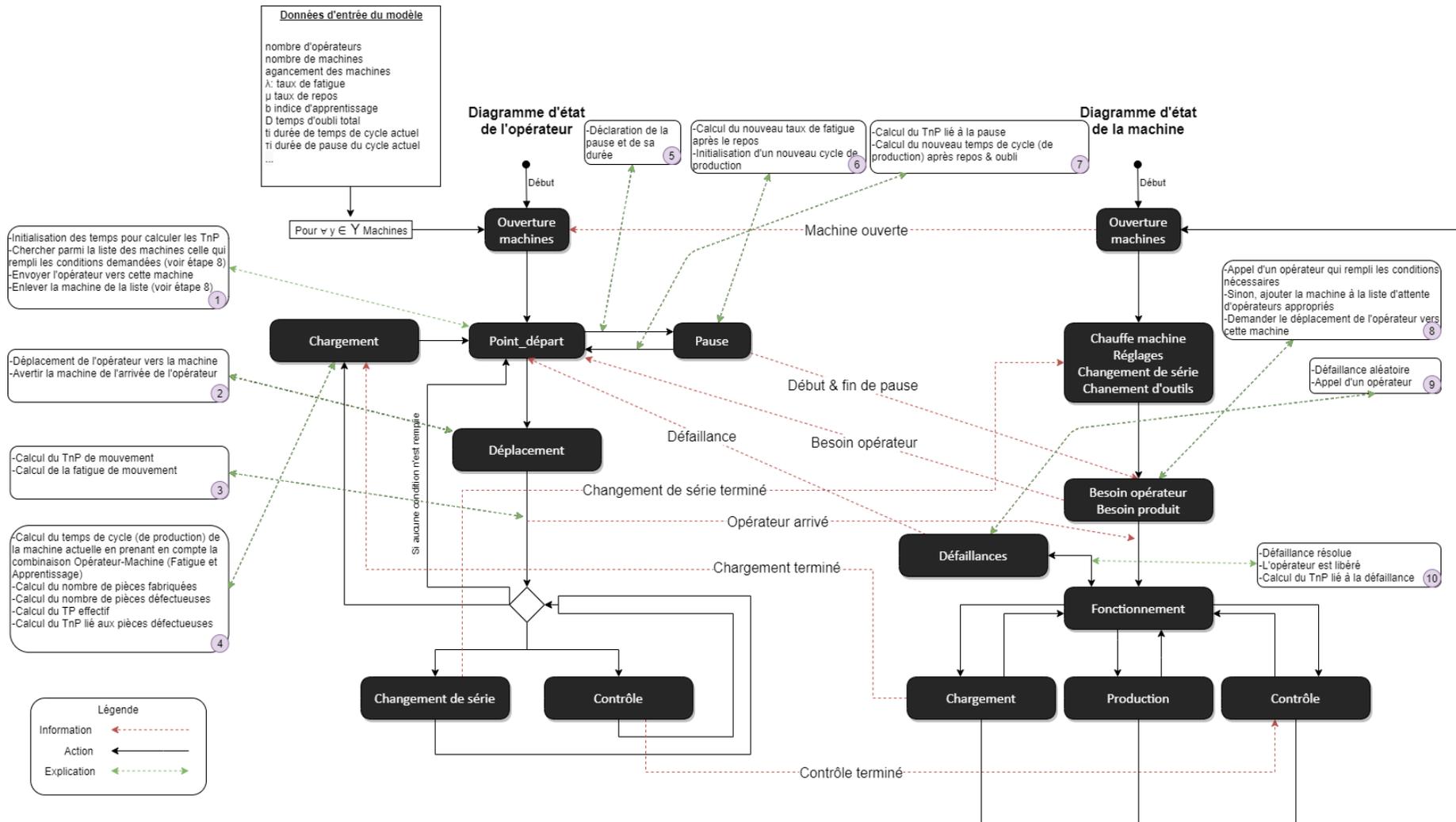


Figure 35. Fonctionnement du modèle global

La partie suivante de ce chapitre est consacrée au choix de l'outil et l'implémentation du modèle dans cet outil.

III. Choix de l'outil et implémentation et évaluation du modèle

1. Choix de l'outil

Comme discuté lors du chapitre de recherche bibliographique, l'approche choisie pour étudier le modèle est la simulation. Dans cette partie, deux outils de simulation sont comparés et un outil est choisi selon des critères répondant aux exigences du modèle. Les deux outils de simulation considérés pour cette étude sont Simio et AnyLogic. Ils sont comparés par rapport aux critères du modèle et selon leurs avantages et inconvénients. Le Tableau 9 regroupe les critères comparés ainsi que leur description et utilité dans le modèle.

Tableau 9. Comparaison entre Simio et AnyLogic

Critères	AnyLogic	Simio	Description / Utilité
Modélisation multi-agents	X	X	Modélisation d'entités totalement ou partiellement autonomes (via un diagramme d'état par exemple)
Modélisation continue	X	X	Modélisation des données continues (comme le temps)
Modélisation discrète	X	X	Modélisation des données discrètes (comme le nombre de pièces produites)
Manipulation directe	X	X	Interface Homme-Machine permettant le suivi en temps réel de la simulation
Modélisation dynamique	X	X	Les modèles peuvent changer dans le temps au fur et à mesure de l'évolution de la simulation (via les diagrammes d'état, les transitions, les événements, par exemple)
Modélisation graphique	X	X	Les modèles graphiques permettent, entre autres, de modéliser les probabilités aléatoires
Méthode de Monte Carlo	X	X	Permet de répliquer la simulation un grand nombre de fois pour mieux estimer les comportements aléatoires
Outils de présentation	X	X	Permet de présenter les résultats sous différents graphes
Modélisation stochastique	X		La modélisation stochastique permet de prendre en compte les aléas, incertitudes et variabilités
Blocs prédéfinis	X	X	Facilite l'implémentation de certains blocs prédéfinis selon l'industrie
Personnalisation des blocs	X		Possibilité de programmer les blocs en Java et de créer ses propres blocs
Modélisation 3D	X	X	Aspect visuel de la modélisation pour faciliter la compréhension et le suivi

On remarque que les deux solutions sont similaires. Seulement 2 critères les différencient, et c'est ces deux critères qui sont les plus importants pour la résolution de la problématique de cette thèse. En effet, c'est la possibilité de modéliser les variabilités et l'aléatoire et des algorithmes personnalisés au modèle qui représentent l'une des contributions majeures de ces travaux. Grâce à la modélisation stochastique, il est possible d'implémenter les variabilités dans le système étudié. Et grâce à la personnalisation des blocs, il est possible d'ajouter des sous-modèles tels que les modèles de facteurs humains d'apprentissage et d'oubli ou ceux de fatigue et de repos. Pour ces raisons et les critères étudiés dans le Tableau 9, l'outil choisi pour simuler le modèle est AnyLogic.

2. Implémentation du modèle

Pour implémenter le modèle dans AnyLogic, certains changements doivent être réalisés pour l'adapter à l'outil. Premièrement, les données d'entrée doivent être adaptées à l'outil en les identifiant, leurs types et leurs intervalles de définition (voir Annexe 3). Ensuite, les logiques et les diagrammes d'état doivent être adaptés pour convenir à la syntaxe de l'outil. Finalement, les sous-modèles (facteurs humains, par exemple) doivent être ajustés pour pouvoir être utilisé au niveau de l'outil.

a. Données d'entrée

Le Tableau 10 regroupe les données d'entrée nécessaires pour exécuter la simulation sur l'outil. Elles sont adaptées à partir de leurs définitions comme déterminées lors des chapitres précédents. Ce tableau n'est pas exhaustif et ne compte pas les données tabulaires comme les allocations opérateur-machine, les compétences opérateur-machines ou les types de fabrications produit-machine.

Tableau 10. Données d'entrée adaptées à AnyLogic

Données	Définition / Remarques	Conditions
Nombre d'opérateurs	Selon le système étudié	≥ 0
Nombre de machines	Selon le système étudié	≥ 1
Agencement des machines	Coordonnées des machines (x, y)	
Agencement des chemins	Chemins que l'opérateur, les convoyeurs, AGV, et tout autres agents en mouvement	
Temps de cycle	Par machine	≥ 0
MTBF	Temps moyen entre les défaillances	> 0
Durée de la défaillance	La moyenne des défaillances constatées dans la réalité	> 0
Vitesse de marche	Selon (Al-Zuheri et al., 2013), la vitesse de marche moyenne est entre 0.7 et 1.4 m/s (dans cette étude, la valeur de 1.34 m/s est choisie car	[0.7, 1.4] m/s

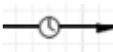
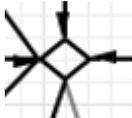
		elle représente une vitesse normale, ni rapide ni lente)	
Critère de distance	de	Obligatoire lors de la stratégie en rotation	-
Durée des pauses	-		>0
Fréquence des pauses	des	-	>1
Indice de fatigue λ		0.0064 représente une fatigue lente, 0.19 représente une fatigue rapide. Dans cette étude, la valeur moyenne de 0.0096 est choisie	[0.0064, 0.19]
Indice de récupération μ	de	0.0064 représente une récupération lente, 0.19 représente une récupération rapide. Dans cette étude, la valeur moyenne de 0.0096 est choisie	[0.0064, 0.19]
Seuil de fatigue max		Une valeur optimale est entre 0.75 et 0.9 pour maximiser la productivité sans trop fatiguer l'opérateur, sinon un seuil de 0.75.	[0, 1]
Indice d'apprentissage b		0.152 représente un apprentissage lent, 0.515 représente un apprentissage rapide. Dans cette étude, la valeur moyenne de 0.0.322 est choisie	[0.152, 0.515]
Indice d'oubli f		-	-
Temps d'oubli max D		Durée en mois qui représente le temps nécessaire pour complètement oublier une expérience acquise	>0

b. Logiques et diagrammes d'état

La deuxième partie du modèle global qui doit être adaptée à l'outil sont les logiques et les diagrammes d'état définis précédemment. Le Tableau 11 présente les différentes transitions que l'outil offre. Ces transitions offrent un niveau de détail supérieur aux transitions développés via les fonctions qu'elle remplit, comme la communication ou les choix multiples.

Tableau 11. Types de transitions du modèle

Type de transition	Représentation graphique	Définition / Utilisation
Transition simple		Le modèle passe par cette transition directement sans blocage
Transition messagère		Le modèle attend un message prédéfini ou non avant d'entamer cette transition
Transition de type « arrivée »		Le modèle attend l'arrivée d'un autre acteur/agent prédéfini ou non avant d'entamer la transition

Transition conditionnelle		Le modèle vérifie si la condition prédéfinie est remplie avant d'entamer la transition
Transition temporelle		Lorsque le modèle atteint cette transition, un chronomètre prédéfini est enclenché, la transition est entamée lorsque le chronomètre atteint zéro
Transition stochastique		Lorsque le modèle atteint cette transition, une probabilité prédéfinie doit être atteinte selon une loi de probabilité prédéfinie aussi. Si elle est atteinte, la transition est entamée
Nœud		Un nœud permet de décider entre plusieurs états selon plusieurs conditions dont une décision par défaut au cas où aucune condition n'est remplie
Transition en pointillés		Transition par défaut si aucune autre transition ne remplit les conditions

Avec ces nouvelles informations, les diagrammes d'état présentés en Figure 31 et Figure 34 sont adaptés à l'outil. La Figure 36 représente les diagrammes d'état adaptés à l'outil en utilisant les transitions améliorées. On remarque notamment que le diagramme d'état de l'opérateur n'a pas fait face à plusieurs modifications, cependant, celui de la machine a considérablement changé pour s'adapter à l'outil.

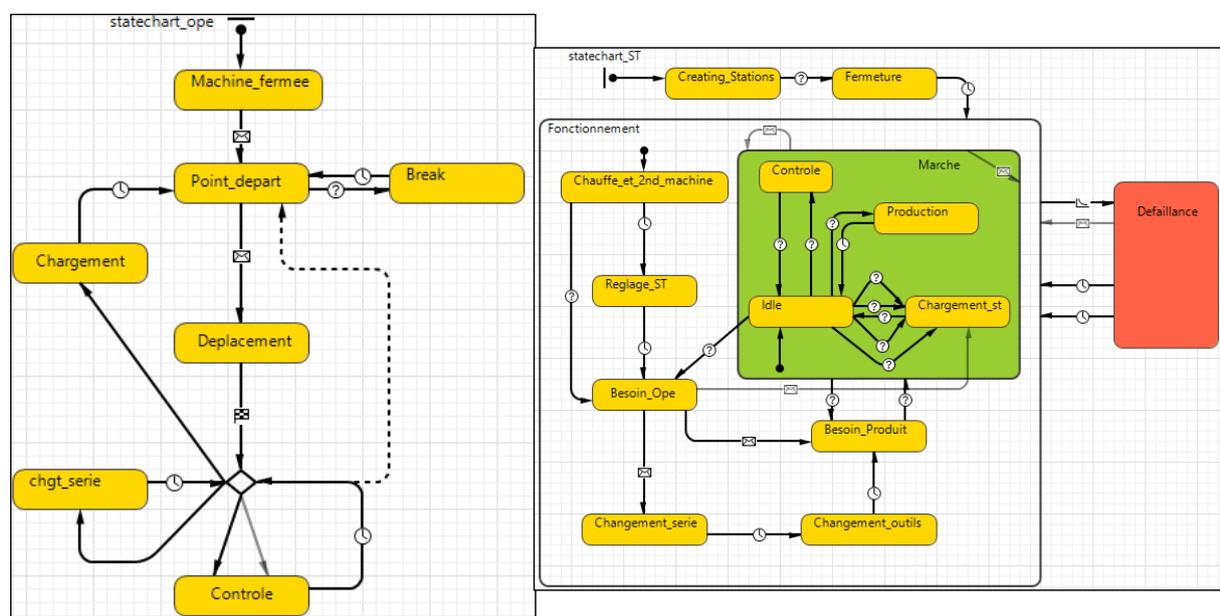


Figure 36. Diagramme d'état de l'opérateur (à gauche) et de la machine (à droite) adaptés pour l'outil

c. Sous-modèles

Les sous-modèles des temps non productifs, des facteurs humains, etc. qui sont définis précédemment ne peuvent être utilisés dans l'outil sans d'abord être transformés. Certaines transformations sont simples et ne requiert qu'une bonne mise en place du

sous-modèle par rapport au diagramme d'état, alors que d'autres sont plus complexes et requiert que le sous-modèle ou sa formule soit adaptés pour répondre aux besoins de l'outil, assurer le bon fonctionnement de la simulation et éliminer les erreurs de programmation.

Pour pouvoir calculer les temps (temps productifs et temps non productifs), l'outil met à disposition des jeux de données. Grâce à ces bases de données, il est possible de stocker et lier les différents temps à une tâche spécifique et un agent spécifique (opérateur ou machine), et ainsi réaliser le suivi des temps d'une manière détaillée. Cette méthode permet de prendre en compte tous les temps définis précédemment (voir Figure 24). A la fin de la simulation, il est possible d'agréger ces données pour simplifier leur lecture et faciliter l'aide à la décision.

En ce qui concerne les sous-modèles des facteurs humains, la méthode pour calculer et suivre leur évolution en temps-réel lors de la simulation est de les définir en utilisant les transitions et les états des diagrammes d'état. Cette méthode imite la réalité, en effet, elle permet de compartimenter les différents facteurs humains et les lier à une activité spécifique. Par exemple, le sous-modèle de repos calcule la fatigue résiduelle de l'opérateur uniquement lorsqu'il est dans l'état de pause ou à l'arrêt. De la même manière, le sous-modèle de fatigue calcule la fatigue de l'opérateur uniquement lors de l'état de chargement, fabrication ou de déplacement. Plusieurs facteurs humains peuvent être pris en compte lors de la même activité, par exemple, lors de la fabrication, l'opérateur gagne simultanément en fatigue et en expérience, ce qui influence l'erreur humaine selon le sous-modèle défini précédemment (voir l'équation 18 en page 54).

Finalement, d'autres paramètres sont aussi pris en compte pour avoir une vue globale lors de la phase d'aide à la décision. En effet, l'aide à la décision ne peut se faire sans la performance industrielle en tête. Le modèle et l'outil offrent la possibilité de quantifier, suivre et récapituler la performance des opérateurs et des machines via des formules, équations, fonctions et algorithmes implémentés au niveau des états et des transitions. Les indices de performances clés suivis peuvent varier d'un cas d'étude à l'autre, cependant, les indices pris en compte peuvent aller du nombre de produits fabriqués par chaque opérateur ou machine, au nombre de pièces défectueuses ou à retoucher, en passant par la quantité de consommables utilisés.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, des définitions, méthodologies et modèles sont présentés. Le but est d'introduire une nouvelle définition du temps productif et non-productif et de développer un modèle basé sur cette définition, dans le but d'améliorer la productivité et les facteurs humains.

Premièrement, la définition de la productivité dans la littérature est obsolète. Il ne suffit plus de prendre en compte uniquement la performance industrielle via le nombre de pièces fabriquées ou le profit réalisé. Grâce aux progrès technologiques et l'amélioration des conditions de travail, il est possible, même nécessaire de prendre en

compte plus que ces indicateurs de performances. Aux fins de cette directive, ce chapitre a permis d'identifier les paramètres à prendre en compte pour mesurer la performance d'un système de production dans sa globalité (performance industrielle, humaine, etc.) dans le but de suggérer des actions d'aide à la décision. Une nouvelle définition des temps est introduite. Cette définition différencie 4 classes de temps identifiables dans un système de production en partant du plus productif jusqu'au moins productif. Cette nouvelle définition se base sur une définition améliorée de la valeur telle que définie par le Lean tout en abandonnant certains principes du Lean qui rigidifient le système de production. L'avantage de cette définition est de différencier les niveaux de productivités, qui jusque-là étaient uniquement binaires. Une amélioration serait donc de définir plusieurs niveaux de productivités dans le but d'identifier les activités les plus prioritaires et les plus influentes sur la performance du système de production. Enfin, un plan d'action est développé pour chaque temps identifié. Il indique les sources des pertes de performance, comment les mesurer et les façons de les traiter.

Deuxièmement, une méthodologie et un modèle sont présentés. Le but de la méthodologie est d'offrir une aide à la décision grâce au modèle développé. Ce modèle se base sur la définition des temps et la prise en compte des facteurs humains est étudié via la simulation. Contrairement aux études des systèmes de production trouvés dans la littérature, qui généralement isolent un seul aspect du système pour l'étudier, le modèle développé dans ce chapitre utilise une multitude de paramètres et de sous-modèles pour étudier le système dans sa globalité. En effet, les interactions entre les différents acteurs et paramètres du système sont aussi importantes que les acteurs et paramètres eux-mêmes. Pour cette raison, des sous-modèles d'opérateurs et de machines sont développés en utilisant les diagrammes d'état pour définir la logique du système de production en définissant la logique de ses éléments élémentaires. Cette approche de modélisation ascendante (bottom-up, en anglais) permet de modéliser des systèmes complexes en partant des éléments élémentaires. L'approche de modélisation ascendante ne doit pas être confondue avec le raisonnement ou la méthodologie de la thèse qui elle est descendante ou déductive (top-down), car elle part de la théorie, puis les hypothèses et enfin les cas d'étude pour confirmer ou rejeter le modèle. Dans le cas des diagrammes d'état, les éléments élémentaires sont les états et les transitions. Grâce à ces deux éléments, les sous-modèles des acteurs sont réalisés ainsi que le modèle global. Ensuite, le paradigme multi-agents permet de dupliquer les sous-modèles des acteurs autant de fois que nécessaire pour recréer n'importe quel système de production. Il permet aussi d'offrir une autonomie à chaque agent, ce qui rend le modèle plus proche de la réalité. Un avantage de ces méthodologie, modèles et approche est leur flexibilité ce qui ouvre la porte à un vaste nombre de possibilités et ainsi offre une aide à la décision adaptée à chaque situation.

Finalement, un outil adéquat au modèle est choisi et le modèle y est implémenté. Dans un premier temps, trois types d'outils sont comparés et la simulation a été choisie en adéquation avec la problématique. Ensuite, un outil de simulation est choisi parmi deux

candidats : Simio et AnyLogic. Une comparaison entre les deux par rapport à la problématique a permis d'identifier l'outil à choisir. En effet, AnyLogic est plus approprié pour implémenter le modèle dû aux paradigmes qu'il peut traiter comme la simulation continue, à événements discrets et multi-agents. Dû aux paradigmes que l'outil utilise, il a été nécessaire de réaliser certains changements par rapport au modèle développé, notamment au niveau des diagrammes d'état, les fonctions et les algorithmes.

Ce chapitre étant le plus important de la thèse, car il traite comment et pourquoi certains choix ont été pris, a permis de démontrer que l'utilisation d'un modèle complexe est plus intéressante que d'isoler un seul aspect du système et de l'étudier, si le but est l'aide à la décision. Il a aussi permis de montrer qu'une nouvelle définition de la valeur et ainsi des temps est nécessaire, puis, cette définition a été présentée. Enfin, le modèle a été réalisé et implémenté dans un outil de simulation. Cependant, l'utilité de ces méthodologies, approches, modèles, sous-modèles et définitions reste incertaine dû à la nature théorique de ces travaux. D'où la nécessité du chapitre suivant qui va évaluer le modèle développé et démontrer l'utilité de ces outils dans le monde réel via 2 cas d'étude réalisés en collaboration avec des industriels partenaires.

Chapitre 3 : Cas d'étude

Résumé

Pour évaluer la validité du modèle et de l'outil développés, des cas d'étude sont réalisés. Deux industries différentes sont choisies pour évaluer la flexibilité du modèle et de l'outil. De même, divers scénarii sont pris en comptes pour évaluer l'aptitude de l'outil à gérer l'aspect de reconfigurabilité. Les méthodologies utilisées pour étudier ces cas d'étude sont définies de telle sorte à évaluer tous les aspects présentés lors des chapitres précédents. Enfin, une étude de robustesse est réalisée pour évaluer la validité de la solution dans un milieu incertain et variable.

I. Introduction

En plus de traiter le système de production dans sa globalité pour offrir une aide à la décision plus compréhensive, ce qui différencie cette étude c'est aussi son application à des cas réels et la comparaison avec les résultats d'un vrai système de production. Cette approche permet de valider le modèle et la solution outillée. Certes deux cas d'étude ne sont pas suffisamment nombreux pour entièrement valider la solution proposée, cependant, c'est un bon compromis entre la théorie et la pratique.

Les deux cas d'étude sont présentés selon la forme suivante :

- Introduction et identification du cas d'étude
- Présentation des données collectées
- Identification des TnP via la simulation du scénario initial
- Définition des scénarii à simuler grâce à l'identification des points d'amélioration
- Résultats de la simulation des scénarii définis
- Conclusion du cas d'étude sous forme d'aide à la décision (voire de prise de décision)

En raison de la confidentialité de ces études, certaines informations seront masquées ou anonymisées dans la présentation des cas d'étude.

II. 1^{er} cas d'étude :

1. Introduction

Le premier cas d'étude représente un cas de l'industrie automobile. Le système de production étudié se compose de 15 machines. Les machines sont complètement automatiques, donc l'opérateur gère le chargement des pièces dans la machine ainsi que la maintenance lorsque celle-ci tombe en panne.

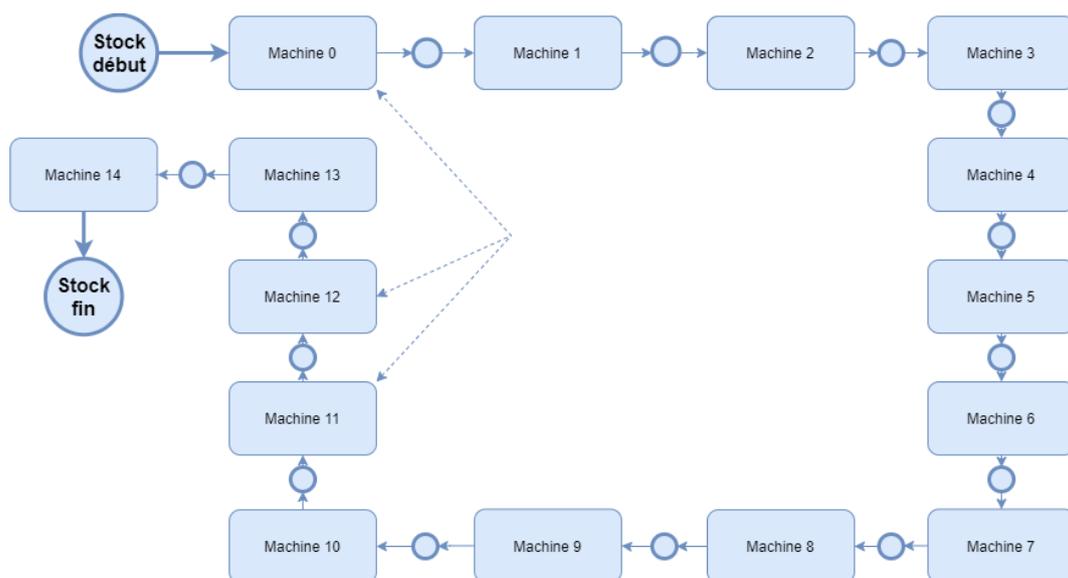


Figure 37. Agencement des machines – 1^{er} cas d'étude

Ce cas d'étude se distingue par les grandes distances que l'opérateur parcourt pendant sa journée de travail. En effet, l'agencement spécifique des machines (voir Figure 37) et la taille de l'usine jouent un rôle important sur ces distances. De plus, l'opérateur peut se déplacer uniquement entre les machines à proximité ou selon les flèches entre les machines 0, 11 et 12. C'est pour cette raison que l'objectif de ce cas d'étude est d'améliorer la performance industrielle, ainsi que les facteurs humains par la réduction de la fatigue et des distances totales parcourues.

2. Données

La collaboration avec le partenaire industriel a permis d'alimenter le modèle avec des données de production, de défaillance et de mouvements réelles. Ces données permettent de modéliser le scénario initial tel qu'il existe dans la réalité et ainsi prouver la faisabilité et l'utilité du modèle et du simulateur. Les données collectées sont :

- Nombre d'opérateurs : 15
- Nombre de machines : 15
- Agencement des machines ou distances entre les machines : Calculés à partir du graphe et de l'échelle donnée
- Temps de cycle de chaque machine (voir Tableau 12)
- Takt Time : 68s
- MTBF : 300 min (en moyenne et selon une loi exponentielle)
- Durée de défaillance : 12 min (en moyenne, selon la disponibilité de l'opérateur et la durée de déplacement)
- Durée de travail : 8h00 (pauses comprises)
- Paramètres de fatigue :
 - Durée des pauses : 3 pauses : 10 min – 60 min – 10 min
 - Indice de fatigue : $\lambda = 0,01$ (moyen)
 - Indice de récupération : $\mu = 0,01$ (moyen)
 - Seuil de fatigue maximale : 0,95 (élevé)
- Paramètres d'apprentissage :
 - Indice d'apprentissage : $b = 0,322$ (moyen)
 - Indice d'oubli : f (faible, calculé à partir de D)
 - Temps d'oubli maximal : $D = 1$ an (long)
- Vitesse de marche : 1,34 m/s (moyen)

Tableau 12. Temps de cycle des machines (en secondes)

Machine n°	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Temps de cycle (s)	11	11	10	10	10	9	11	11	11	13	13	9	9	13	9

3. Scénario initial et points d'amélioration

Grâce aux données précédentes, un scénario initial est implémenté et simulé. La Figure 38 représente un exemple de répartition des temps d'un opérateur et d'une machine.

On remarque que les machines sont plutôt équilibrées avec un ratio de production et de non-production de 83% à 17%, alors que la répartition de temps de l'opérateur est largement dominée par le TnP d'attente à 72%, et seulement 9% de temps productif (de chargement, dans ce cas), le reste du temps est divisé entre le reste des TnP comme les défauts et les changements de série. Les pauses, si elles sont bien réparties, peuvent ne pas être considérées comme des TnP car elles aident à réduire la fatigue, améliorer l'apprentissage et réduire les probabilités d'erreur.

On remarque aussi que la stratégie utilisée dans ce scénario initial où un opérateur est alloué à une seule machine a pour effet que les opérateurs ne se déplacent pas. Ce scénario initial permet d'identifier les points d'améliorations possibles, dans ce cas, on remarque que les TnP d'attente sont prédominants sur les temps de l'opérateur, et que les opérateurs ne se déplacent quasiment pas (TnP de mouvement moyen par opérateur est de 28.88s, 15.56s pour l'opérateur sur la Figure 38). Il est donc intéressant de se focaliser sur l'amélioration de ces deux TnPs.

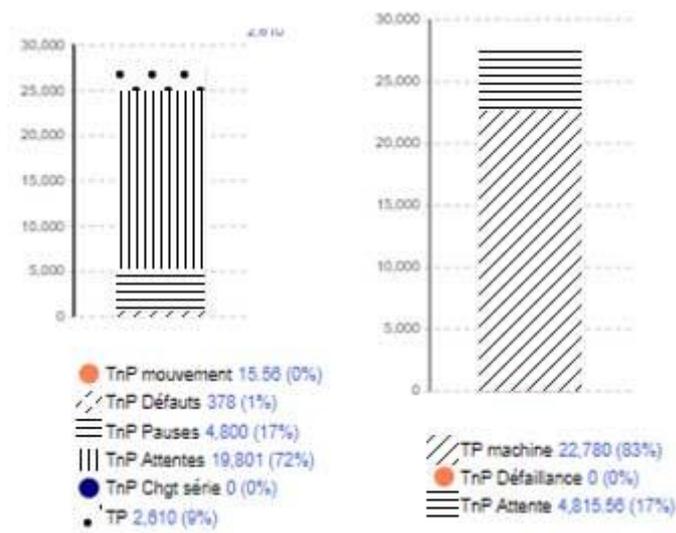


Figure 38. Répartitions des temps pour un opérateur (à gauche) et une machine (à droite) – Scénario initial

4. Définition et simulation des scénarii

Les résultats du scénario initial ont permis d'identifier des points à améliorer au niveau du système de production, ce qui a permis de concevoir des stratégies et scénarii qui peuvent potentiellement améliorer les points identifiés. Certaines stratégies proposent de modifier uniquement le nombre d'opérateurs dans le système, alors que d'autres introduisent de nouvelles logiques comme la rotation et la fabrication en îlots, voire même une nouvelle allocation de pauses.

Dans le cas de cette étude, 3 stratégies sont identifiées à partir des plans d'actions développés précédemment dans le 2^{ème} chapitre :

- Stratégie #1 : agencement flexible (rotation libre des opérateurs)
 - Version 1 : 5 opérateurs et une distance maximale de rotation de 80m
 - Version 2 : 5 opérateurs et une distance maximale de rotation de 60m
 - Version 3 : 6 opérateurs et une distance maximale de rotation de 80m
- Stratégie #2 : agencement semi-rigide (îlots, rotation uniquement à l'intérieur de l'îlot alloué)
- Stratégie #3 : la meilleure stratégie entre la 1 et la 2 + 6 pauses allouées différemment et la durée totale reste inchangée

5. Résultats

Le Tableau 13 regroupe les résultats du scénario initial et des scénarii proposés pour améliorer les points faibles du système de production initial.

Tableau 13. Résultats des scénarii

Scénario	Chargement/opé	Chargement total	Fatigue moyenne / opé	HEP moyenne / opé	TnP défauts (s)	TnP attente (s)	TnP Mouvement (s)
Initial	318,5	4777	66,50%	1,820%	226,8	9514,6	28,88
Stratégie #1 v1	400,6	2003	66,50%	1,824%	263,7	6759,5	2197,8
Stratégie #1 v2	301	1505	66,50%	1,835%	234,9	6511,1	2766
Stratégie #1 v3	394,5	2367	66,50%	1,822%	284,25	7744,9	1194,4
Stratégie #2	678,4	3392	66,60%	1,832%	431,1	4173,3	2900
Stratégie #3	590,8	2954	65,10%	1,525%	314,1	4610,9	2519,4

On remarque que certaines stratégies améliorent énormément la performance individuelle de chaque opérateur (visible via le nombre de chargement par opérateur) sans pour autant détériorer sa fatigue. Cependant, la performance totale baisse de manière considérable. Ceci est dû au nombre d'opérateurs dans le système de production qui passe de 15 opérateurs dans le scénario initial à 6 dans la stratégie #1 et 5 dans les stratégies #2 et #3. La stratégie la plus performante en termes de productivité est celle en îlots, aussi appelée semi-rigide (Stratégie #2). Elle permet d'augmenter la productivité par opérateur et de réduire les TnP d'attente de manière considérable. Cependant, elle augmente légèrement la fatigue et donc les erreurs aussi, qui restent toutefois négligeables face aux gains de temps et de performance réalisés. Cette stratégie demande le plus de mouvement de l'opérateur entre les machines, qui se distingue par une augmentation du TnP de mouvement. Cependant, cette augmentation est suffisamment absorbée par la réduction du TnP d'attente (voir Figure 39). On peut supposer alors qu'il existe une dynamique entre l'attente et le mouvement et qu'il existe un certain point où la réduction de l'un ou de l'autre résulte en l'augmentation de l'autre TnP. Cette hypothèse est apparente au niveau de la stratégie #2 et #3 où la somme des TnP d'attente et de mouvement ne change pas, même si leurs valeurs individuelles sont différentes.

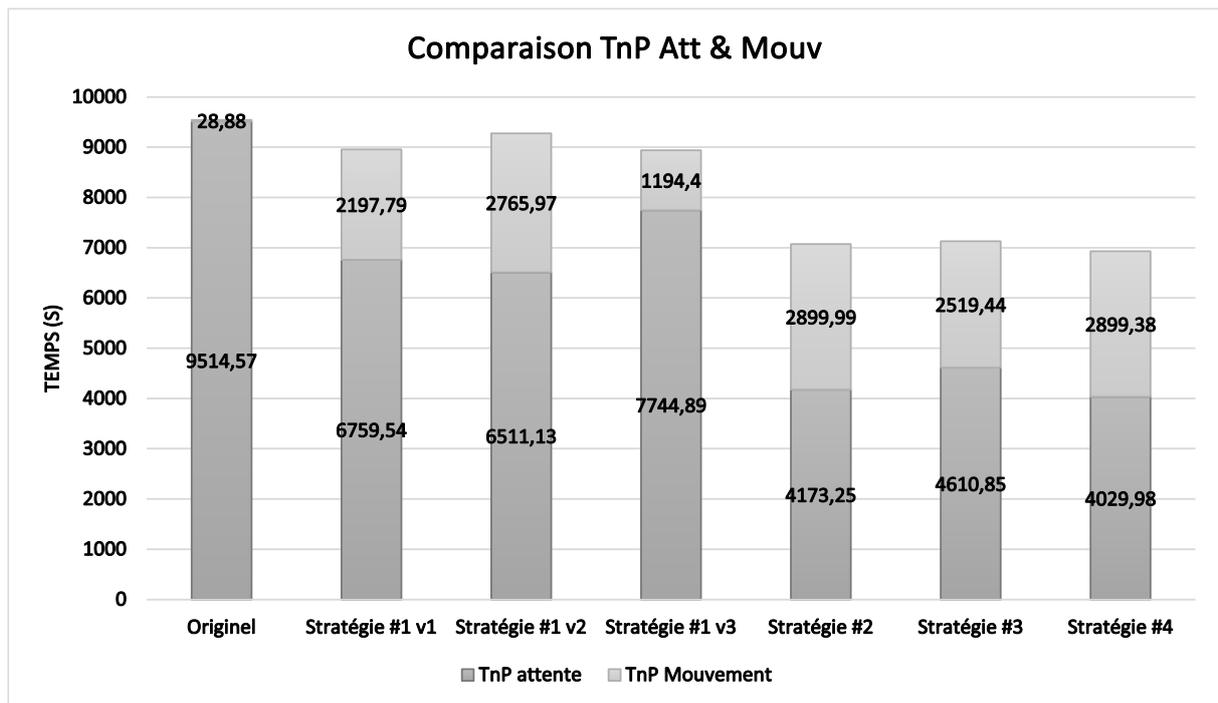


Figure 39. La relation cachée entre les TnP d'attente et de mouvement

Un autre point important que les stratégies ont dévoilé est l'évolution de l'apprentissage pendant la période de travail selon la stratégie choisie. La Figure 40 représente l'évolution du temps de production par rapport au nombre de pièces produites. L'apprentissage est représenté ici par la réduction de la durée nécessaire pour produire une pièce. Le graphe est normalisé entre 0 et 1 pour convenir aux temps de cycle différents. On remarque que pour l'opérateur (a), qui gère une seule machine, l'apprentissage évolue d'une manière lisse et continue. Cependant, pour les opérateurs (b) et (c) qui gèrent respectivement 2 et 3 machines, l'évolution de l'apprentissage est beaucoup plus oscillante à cause du changement fréquent de machines. Le nombre de machines auxquelles l'opérateur est alloué est aussi important : lorsque l'opérateur gère 2 machines seulement, il a plus de temps pour apprendre et donc réduire plus le temps nécessaire de production. En effet, l'opérateur (b) peut produire une pièce en 0,56 fois le temps original et peut atteindre des valeurs aussi basses que 0,48 (c'est-à-dire presque la moitié du temps original), alors que l'opérateur (c) reste en moyenne sur 60% du temps initial et des minimums de 0,55. Ceci suggère qu'il existe un maximum au nombre de machines qu'un seul et unique opérateur peut gérer simultanément, si le but est de maximiser l'apprentissage (qui va ensuite améliorer la productivité et réduire les erreurs).

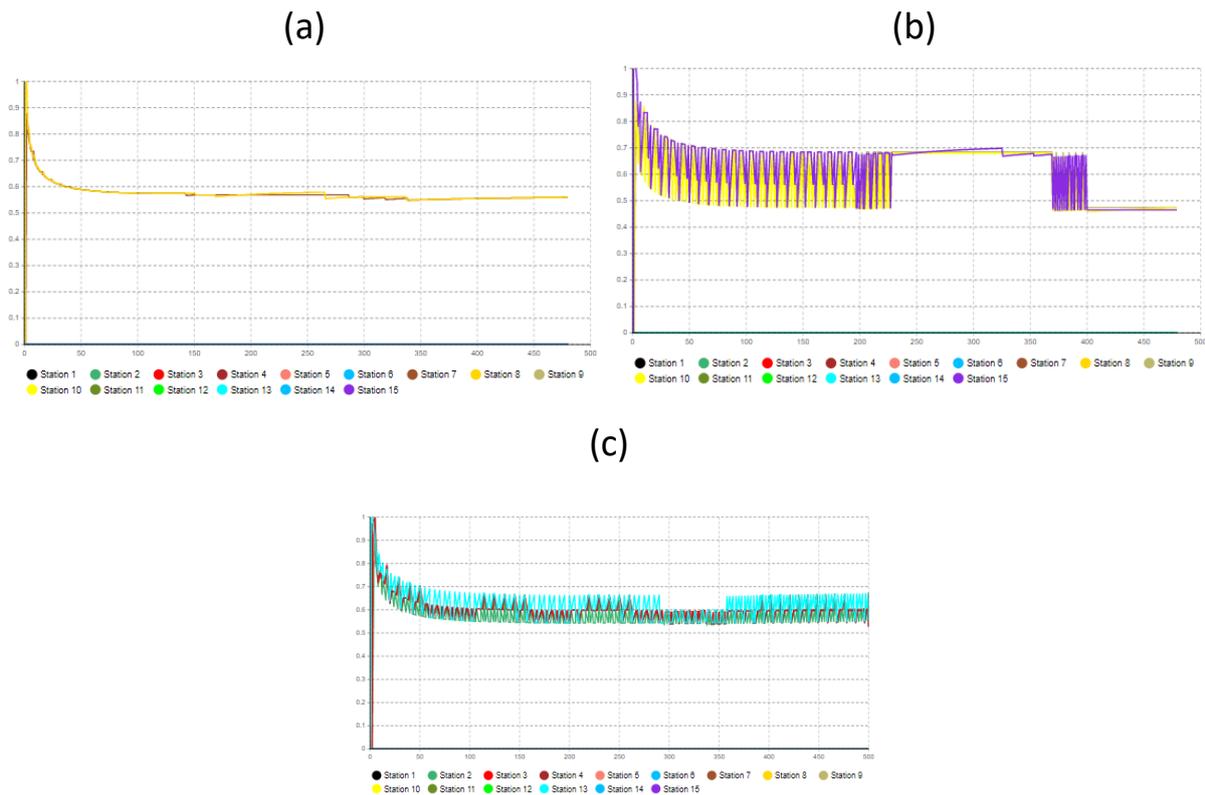


Figure 40. Evolution du temps de production dans le cas où l'opérateur gère (a) 1 machine (b) 2 machines, et (c) 3 machines

6. Conclusion du 1^{er} cas d'étude

Le modèle et la simulation ont permis d'identifier le problème de TnP d'attente conséquent que ce cas d'étude rencontrait. Les plans d'actions identifiés lors du chapitre 2 et les sources des TnP (voir la taxonomie des TnP en Figure 24) ont permis de réaliser des suggestions des scénarii qui avaient un potentiel d'amélioration des points identifiés.

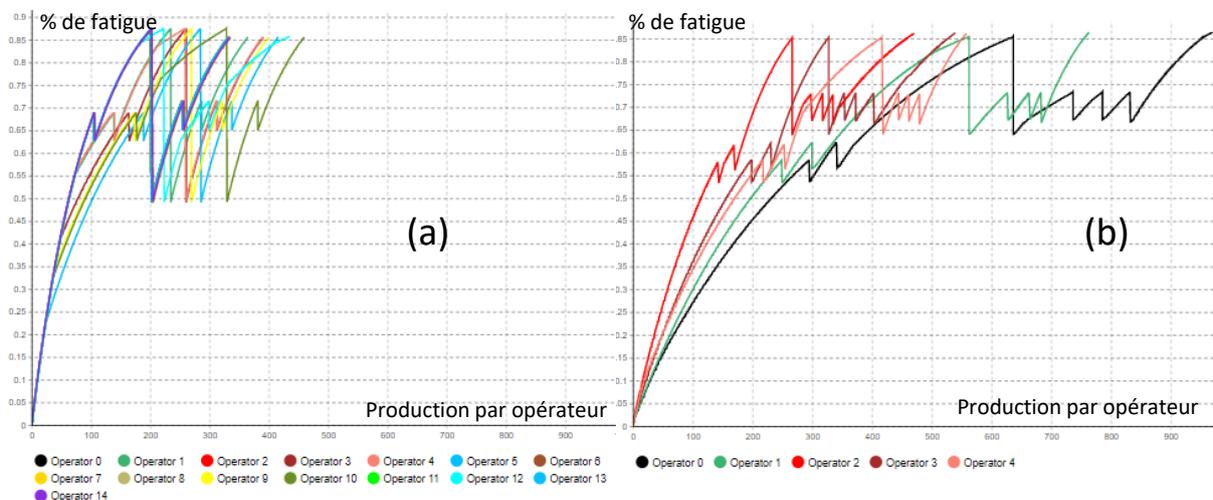


Figure 41. Fatigue des opérateurs selon la stratégie choisie. (a) initiale (b) allocation des pauses différentes

Les résultats ont dévoilé certaines dynamiques notamment entre les TnP d'attente et de mouvement où leur somme baisse jusqu'à un certain point puis elle commence à augmenter. La performance est alors sujette aux changements de stratégies. En effet, une stratégie classique où un opérateur gère une machine est, certes, plus simple à implémenter. Cependant, elle n'est pas forcément optimale. Des stratégies flexibles comme la rotation ou des stratégies semi-rigides comme les îlots permettent d'améliorer certains aspects de la production. Toutefois, si les changements physiques ne sont pas possibles, d'autres changements organisationnels sont possibles comme la stratégie #3 où les pauses sont allouées différemment sans changer leur durée totale. La Figure 41 montre les bénéfices d'une stratégie organisationnelle où les pauses sont organisées différemment sans modifier la durée totale de pause. Dans ce cas, cette simple modification fait baisser la fatigue moyenne de 66.60% à 65.10%, cependant le volume total de fabrication représenté par le nombre de chargement total baisse considérablement de 4777 à 2954, cependant, ceci est dû uniquement au nombre d'opérateur qui est inférieur, car le chargement par opérateur a largement augmenté de 318 à 590 (Tableau 13).

III. 2^{ème} cas d'étude :

1. Introduction

Le deuxième cas d'étude est réalisé en partenariat avec une entreprise spécialisée dans la fabrication de composants mécaniques. Le système de production étudié se compose de 10 machines. La production des machines est complètement automatique, donc, le rôle des opérateurs se focalise essentiellement sur le chargement et déchargement des machines, la réalisation des contrôles visuels, des changements de séries et d'outils et des réglages, en plus des maintenances lorsque la machine est en défaillance.

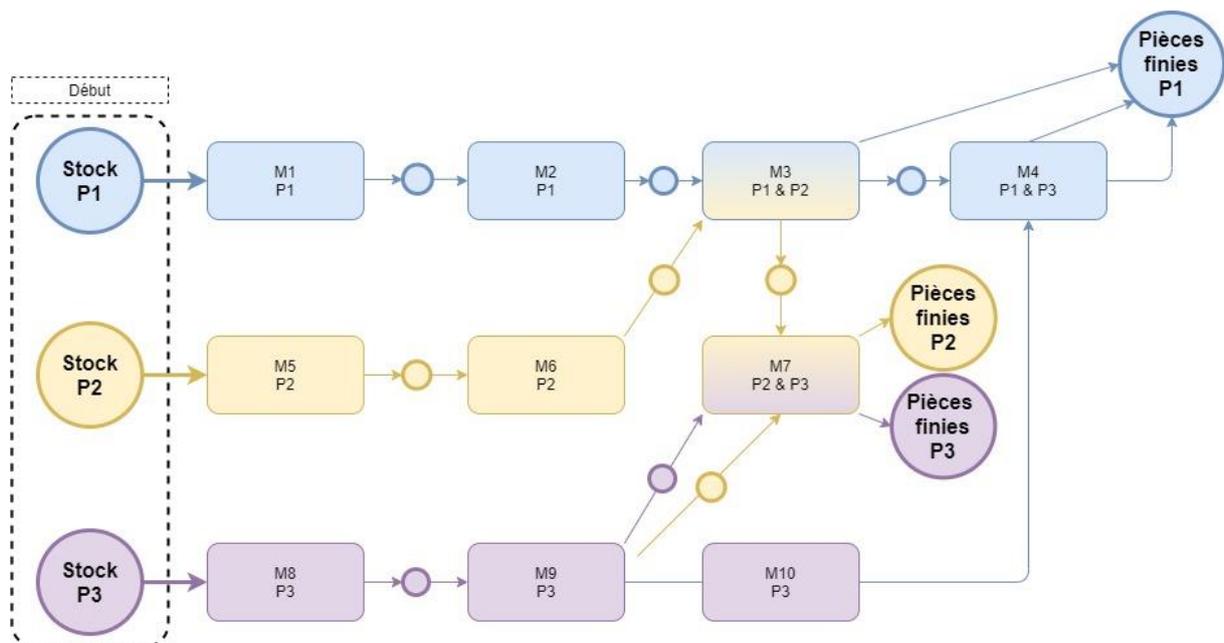


Figure 42. Représentation graphique du système de production

Contrairement au cas d'étude précédent, où le type de produit n'avait aucun impact sur la production, ce cas d'étude se distingue par la présence de 3 types de produits différents, appelés P1, P2 et P3. Une nouvelle dynamique est alors présente dans ce cas d'étude, en effet, le temps de chargement et déchargement pour les opérateurs et les temps de fabrication pour les machines sont variables selon le type de produit. Par ailleurs, un ou plusieurs stocks différents sont présents en amont des machines concernées. En effet, les machines sont spécialisées dans un ou deux types de produits, et donc possèdent des stocks dédiés (voir Figure 42). En bleu, beige et violet sont respectivement les stocks, machines et chemins des pièces de types P1, P2 et P3. On remarque que certaines machines, notamment les machines 5, 6 et 8 contiennent plus d'une seule couleur. Ces machines peuvent fabriquer 2 types de pièces différents. Finalement, en plus des stocks en amont, les machines contiennent un espace prédéterminé pour les zones de chargement (voir Figure 43). En effet, certaines machines ont un seul espace de chargement alors que d'autres disposent de 2 ou 4, leurs temps de chargement et de déchargement, les durées nécessaires pour réaliser un contrôle visuel ou changer de série ou d'outils sont aussi différents selon la machine mais pas selon le type de produit (seuls les temps de production sont variables selon la machine et le type de produit).

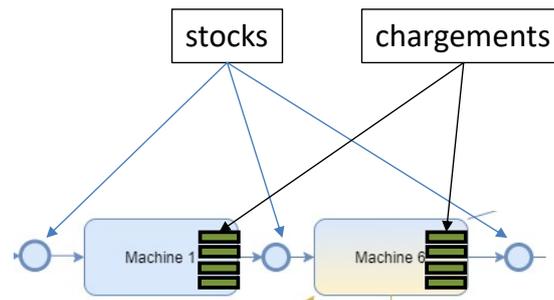


Figure 43. Représentation graphique de la machine, son stock et ses zones de chargement

2. Données

Les données de ce deuxième cas d'étude concernent l'historique mensuel de chacune des machines. Un traitement des données en amont est donc nécessaire avant de pouvoir les implémenter dans le simulateur. La moyenne des mois pour chaque machine est considérée. Certes, cette manipulation crée de nouvelles données inexistantes dans la réalité. Le choix du dernier mois comme donnée d'entrée pour l'implémentation est une autre possibilité. Cependant, les variations entre les mois étant notables, cette possibilité n'est que localement correcte. Enfin, une dernière possibilité de prédiction du mois suivant selon l'historique des mois précédents est envisagée. Cependant, le manque de données historiques ne le permet pas. En effet, les données sont réparties sur six mois, de plus, les données de certains mois sont manquantes.

Le résumé des données collectées et utilisées pour ce cas d'étude est comme suit :

- Nombre d'opérateurs : 10
- Nombre de machines : 10

- Agencement des machines ou distances entre les machines : Calculés à partir du graphe et de l'échelle donnée
- Temps de cycle / de production de chaque machine (différent selon le binôme machine-produit)
- MTBF (différent selon la machine et selon la loi Weibull)
- Durée de défaillance (différent selon la machine)
- Durée du temps de travail : 8h00 (pauses comprises)
- Durée des changements de série par machine (différent selon la machine)
- Durée des changements d'outils par machine (différent selon la machine)
- Durée des réglages de chaque machine (différent selon la machine)
- Durée de chauffe par machine (différent selon la machine)
- Les temps de fermeture et d'ouverture des machines (différent selon la machine)
- L'allocation opérateur-machine selon la stratégie choisie
- L'ordre de fabrication par type de pièce et par machine (la gamme de fabrication)
- Matrice des stocks en amont par type de pièce et par machine (base de données des stocks)
- Paramètres de fatigue :
 - Durée des pauses : 3 pauses : 10 min – 60 min – 10 min
 - Indice de fatigue : $\lambda = 0,01$ (moyen)
 - Indice de récupération : $\mu = 0,01$ (moyen)
 - Seuil de fatigue maximale : 0,95 (élevé)
- Paramètres d'apprentissage :
 - Indice d'apprentissage : $b = 0,322$ (moyen)
 - Indice d'oubli : f (faible, calculé à partir de D)
 - Temps d'oubli maximal : $D = 1$ an (long)
- Vitesse de marche : 1,34 m/s (moyen)

3. Application de l'approche sur la situation actuelle

Tout d'abord, les résultats du scénario initial sont confrontés aux données réelles pour analyser la performance du modèle et la validité du pré-traitement des données d'entrée. Le Tableau 14 représente l'écart entre les résultats de la simulation et les données réelles. Cet écart est compris entre -3,22% et +17,04%, avec une moyenne d'écart de 4,45% et une moyenne absolue de 5,78%. Ceci implique que le modèle et la simulation permettent d'atteindre des résultats assez proches de la réalité sans ajuster le modèle à la réalité, mais uniquement en implémentant les blocs élémentaires qui créent une logique globale complexe. Les résultats des scénarii et stratégies proposés dans la partie suivante en tant qu'aide à la décision sont alors plus intéressants car ils sont soutenus par des données réelles et ne sont pas que des solutions théoriques. Enfin, ces différences sont dues aux différents aspects aléatoires du modèle tels que les défaillances.

Tableau 14. Confrontation des résultats de la simulation aux données réelles

Machine	Ecart entre la simulation et la réalité
---------	-----------------------------------------

Machine 1	-0.33%
Machine 2	11.32%
Machine 3	11.63%
Machine 4	17.04%
Machine 5	6.53%
Machine 6	-1.05%
Machine 7	4.48%
Machine 8	0.14%
Machine 9	-2.04%
Machine 10	-3.22%
Moyenne des écarts	4.45%
Moyenne des écarts absolus	5.78%

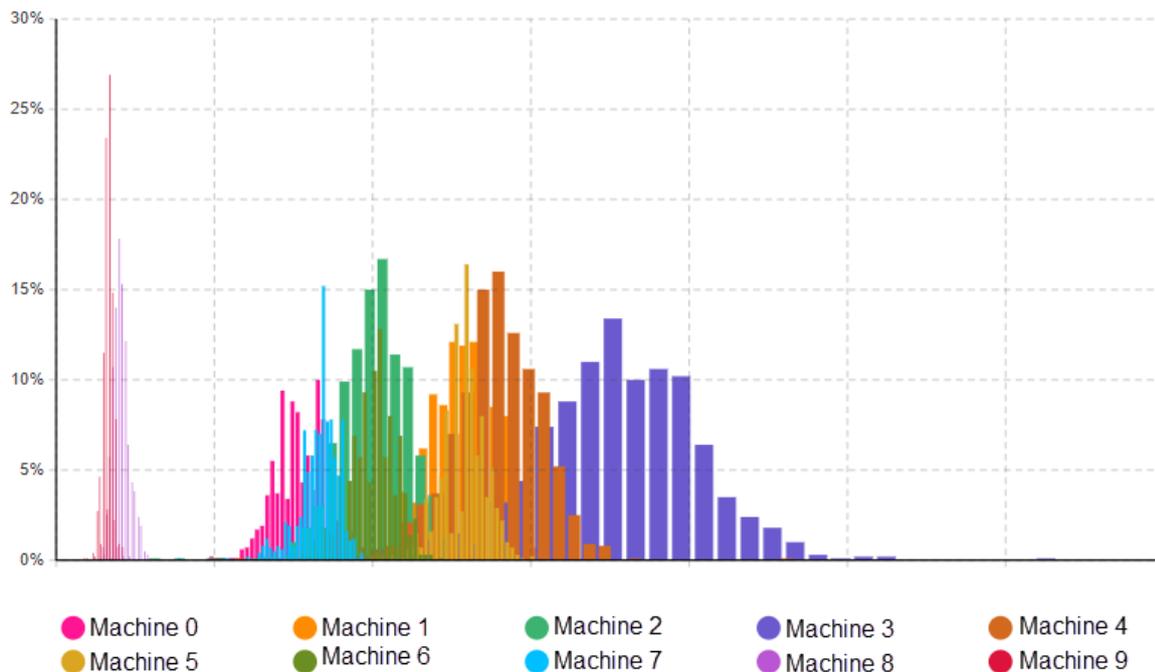
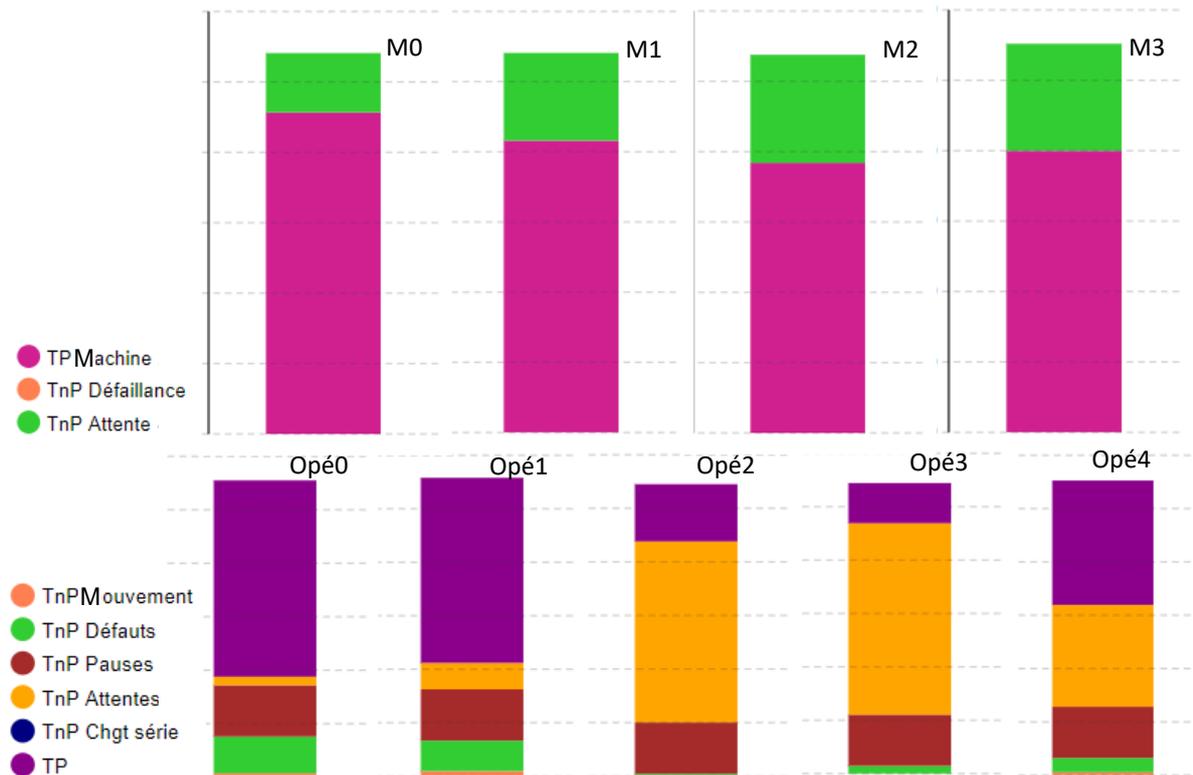


Figure 44. Histogrammes de production par machine (données agrégées de 2000 répliques)

Ce scénario permet aussi d'identifier les machines goulots. En effet, la Figure 44 donne le nombre de pièces fabriquées par chaque machine (les valeurs exactes sont confidentielles et donc masquées). Cette donnée seule ne permet pas d'identifier la machine goulot, c'est pour cette raison qu'elle est utilisée en appui avec la représentation du système de production (en Figure 42) dans le but d'identifier les machines goulots. Dans ce scénario initial, le goulot est identifié selon une expérimentation en deux étapes : (1) simulation du système avec des stocks initialement pleins, puis (2) la même simulation avec des stocks vides. Cela permet de comparer le changement de production par machine et de déduire les machines goulots. En effet, la production individuelle des machines qui suivent les goulots chute de manière

considérable lors de la deuxième étape. Cette méthode permet d'identifier les machines M₁ et M₄ comme étant des machines goulots.

Enfin, les résultats du scénario initial sont regroupés sur la Figure 45. On aperçoit l'existence d'une ligne de production non équilibrée, car certains opérateurs sont plus chargés que d'autres. Les grandes variations entre les opérateurs est un indicateur de ce déséquilibre.



4. Définition et simulation des scénarii

Le scénario initial a permis de démontrer que la ligne de production n'est pas équilibrée surtout au niveau des opérateurs, ainsi que la présence de machines goulots. En effet, certains opérateurs n'ont pas assez de temps libre et ont donc des marges de manœuvre limitées, alors que d'autres ont des temps d'attente disproportionnés et ainsi une perte de performance considérable (voir Figure 45). Suite à cette première observation, une stratégie de production en îlots est identifiée et peut potentiellement être une stratégie améliorant les facteurs humains pour les opérateurs surchargés et augmentant les performances des opérateurs sous-chargés.

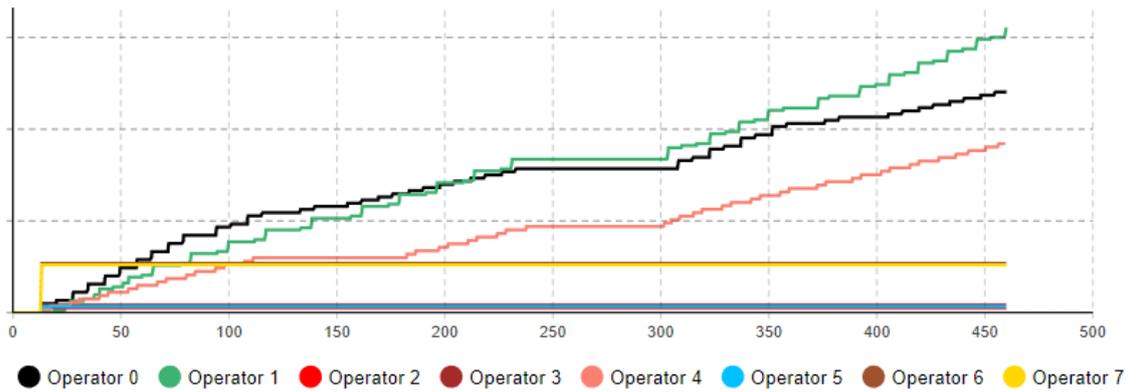


Figure 46. Distance parcourue par chaque opérateur – Scénario initial

Selon les résultats du scénario initial, plusieurs stratégies sont suggérées. Une stratégie de rotation est aussi suggérée due aux courtes distances entre les machines, car en plus des tâches manuelles, les déplacements influencent aussi la fatigue de l'opérateur. En effet, les opérateurs parcourent des distances faibles lors de leurs périodes de travail (voir Figure 46). Il est donc possible de mettre en place une stratégie de rotation. Le but étant d'améliorer les performances et les facteurs humains en accordant une liberté et une autonomie à l'opérateur pour se déplacer entre les machines lorsque les conditions le permettent.

Finalement, une stratégie que souhaite tester le partenaire industriel est d'automatiser les chargements et déchargements de certaines machines, les rendant ainsi complètement automatiques. Ces machines auront toujours besoin des opérateurs pour les opérations de maintenance, de changement de série, d'outils de contrôle et de réglages. Ils ont aussi jugé utile de ne pas prendre en compte les machine 8 et 10 dans le reste des scénarii simulés. La suite de l'étude se fait alors selon ce nouvel agencement.

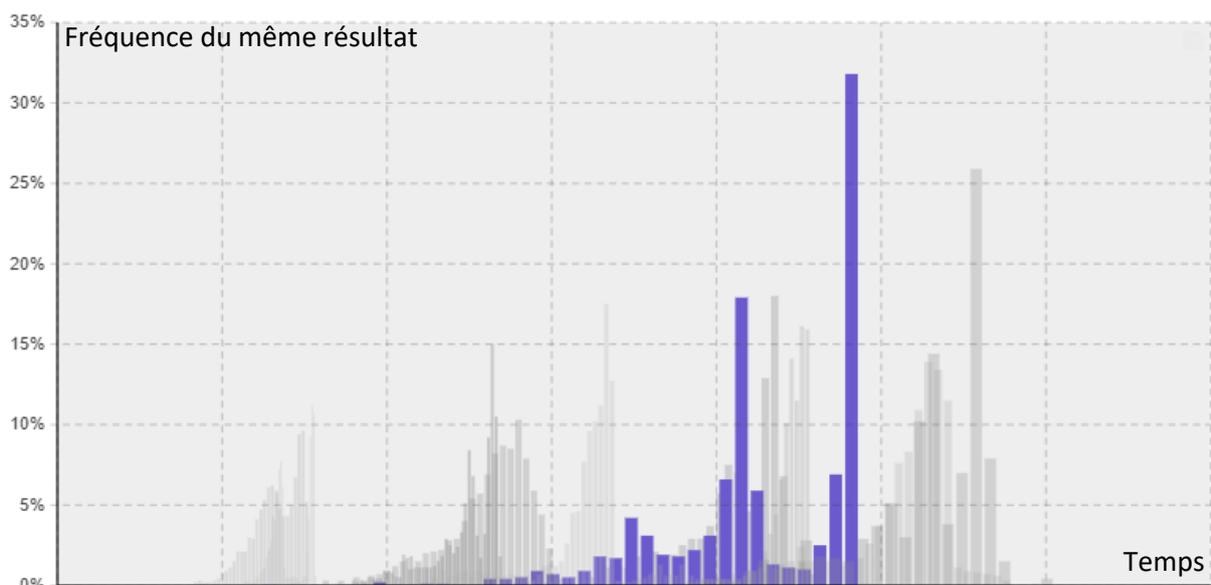


Figure 47. Histogrammes de distribution du temps productif de la machine 3

Dans le cas de cette étude, 2 stratégies sont développées :

- Stratégie #1 : agencement semi-rigide divisé en plusieurs scénarii (îlots, rotation uniquement à l'intérieur de l'îlot alloué)
- Stratégie #2 : automatisation des machines goulots (identifiées au niveau du scénario initial)

Ces stratégies sont ensuite raffinées en d'avantage de scénarii. En effet, la stratégie #2 se base sur les îlots de fabrication où un opérateur gère plusieurs machines. Il est donc nécessaire d'expérimenter avec plusieurs allocations différentes car plusieurs combinaisons de machines peuvent être considérées pour créer des îlots.

Enfin, une étude de variabilité est réalisée sur les résultats trouvés. Pour cela, chaque simulation est réalisée 2000 fois (dû à des limites logicielles et matérielles), et les résultats sont regroupés sous formes de moyennes et d'écart-types en plus d'être tracés sous forme d'histogrammes pour déterminer la dispersion des résultats dues aux effets aléatoires. Cette étude permet d'identifier l'existence des effets aléatoires dans la simulation et d'évaluer leur intensité. Par exemple, une grande variabilité des résultats d'une machine au niveau de la production peut indiquer un problème tel que la présence d'un goulot ou une perte de performance au niveau de l'opérateur et donc inciter une prise d'une décision par rapport à cette machine. La Figure 47 représente la répartition ou la distribution des temps productifs de la machine 3 en bleu (le reste des machines sont grisées en arrière-plan). Ces données sont collectées après avoir simulé le même modèle 2000 fois. La figure montre que même sous les mêmes conditions et avec les mêmes données d'entrée, les résultats de la simulation varient. Ces différences sont dues aux aspects aléatoires et variables du modèle et de la simulation comme la fréquence des défaillances, leurs durées, les mouvements des opérateurs, etc. Donc le manque de stabilité de la machine 3 n'est pas forcément un problème intrinsèque à la machine, cependant, il reste très utile à savoir car il pointe vers la bonne direction et identifie l'existence d'un problème avec cette machine.

5. Résultats

La première stratégie semi-rigide aussi dite en îlots présente des résultats intéressants. Cependant, elle est aussi compliquée car il y a de nombreuses possibilités d'agencement des machines en îlots et d'allocation des opérateurs dans ces îlots. La Figure 48 représente les résultats d'un agencement en îlots. Les îlots simulés sont : (1) M₁ & M₂, (2) M₃ & M₄, (3) M₅ & M₇. Les machines M₆, M₀ et M₈ sont traitées de manière classique, c'est-à-dire un seul opérateur par machine. On remarque alors que cette allocation améliore légèrement la productivité des machines et améliore grandement les marges de manœuvre (en accordant plus de temps d'attente aux opérateurs). Cependant, le temps d'attente trop important peut être optimisé. Il faut alors trouver un agencement des îlots et une allocation des opérateurs différents pour améliorer les KPIs souhaités. Ceci est l'une des limitations de cette méthode. En effet, elle se base sur l'essai de plusieurs scénarii, puis leur analyse, et donc est sujette à des fausses pistes et résultats non-concluants. Par exemple, pour ce cas d'étude, 4 scénarii sont

identifiés : le scénario initial qui se compose de 9 opérateurs, puis les scénarios 2, 3 et 4 avec respectivement 8, 7 et 6 opérateurs, ensuite le scénario 5 qui robotise le chargement des machines goulots. Pour ces différents scénarii, un total de 61 allocations opérateurs-îlots est possible. Cependant, comme les tâches de chargement et déchargement sont interchangeables, et aucune notion de compétences spéciales n'est nécessaire pour le bon fonctionnement du système de production, plusieurs allocations en doublons sont éliminées. Ainsi, les 61 allocations des îlots sont réduites à 28 (voir le Tableau 15). Les scénarii sont notés sous la forme suivante : « Xo oYmZ+A ». Cette notation représente le scénario avec X opérateurs au total, où l'opérateur Y gère l'îlot qui contient les machines Z et A.



Figure 48. Résultats d'un agencement en îlots – Scénario 4 (6o 0oM1+2 01M3+4 04M5+7)

Tableau 15. Scénarii identifiés

Scénario	Opérateurs	Machines
Scénario Initial (1 opérateur par machine)	-	-
Scénario 2 (8o 02M2+3 & 03M8)	2 & 3	2, 3 & 8
Scénario 2 (8o 06M6+7)	6	6 & 7
Scénario 2 (8o 04M4+7)	4	4 & 7
Scénario 2 (8o 01M1+7)	1	1 & 7
Scénario 2 (8o 00M0+7)	0	0 & 7
Scénario 2 (8o 05M5+7)	5	5 & 7
Scénario 2 (8o 03M3+4)	3	3 & 4
Scénario 2 (8o 00M0+5)	0	0 & 5
Scénario 2 (8o 00M0+6)	0	0 & 6
Scénario 2 (8o 01M1+6)	1	1 & 6
Scénario 2 (8o 01M1+2)	1	1 & 2
Scénario 2 (8o 01M1+4)	1	1 & 4
Scénario 3 (7o 01M1+4 02M2+3)	1 & 2	1, 4, 2 & 3
Scénario 3 (7o 06M6+7 02M2+3)	6 & 2	6, 7, 2 & 3
Scénario 3 (7o 04M4+7 02M2+3)	4 & 2	4, 7, 2 & 3

Scénario 3 (70 00m0+7 03m3+4)	0 & 3	0, 7, 3 & 4
Scénario 4 (60 00m0+6+7 02m2+3)	0 & 2	0, 6, 7, 2 & 3
Scénario 4 (60 00m0+6+7 03m3+4)	0 & 3	0, 6, 7, 3 & 4
Scénario 4 (60 00m0+7 03m3+4 05m5+6)	0, 3 & 5	0, 7, 3, 4,5 & 6
Scénario 4 (60 00m0+7 01m1+2 04m3+4)	0, 1 & 4	0, 7, 1, 2, 3 & 4
Scénario 4 (60 00m0+7+1 02m2+4)	0 & 2	0, 7, 1, 2 & 4
Scénario 4 (60 00m0+7+1 02m2+3)	0 & 2	0, 7, 1, 2 & 3
Scénario 4 (60 00m1+2 01m3+4 04m5+7)	0, 1 & 4	1, 2, 3, 4, 5 & 7
Scénario 5 (60 00m0+7+1 02m2+3) + robot	0 & 2	0, 7, 1, 2 & 3
Scénario 5 (60 00m0+7+1 02m2+4) + robot	0 & 2	0, 7, 1, 2 & 4
Scénario 5 (60 00m0+7 03m3+4 05m5+6) + robot	0, 3 & 5	0, 7, 3, 4, 5 & 6
Scénario 5 (70 06m6+7 02m2+3) + robot	6 & 2	6, 7, 2 & 3
Scénario 5 (80 00m0+7) + robot	0	0 & 7

Les allocations de la première stratégie qui sont considérées intéressantes sont étudiées une seconde fois avec un détail supplémentaire : la robotisation des machines M2 et M3. L'effet de ces changements peut être observé dans la Figure 49. Les résultats montrent que la robotisation de ces machines permet de rendre le système de production plus stable et moins sensible aux variabilités. Cette stabilité est observée par l'augmentation de la fréquence des résultats (40% de répétitions, contre 20%) et via la dispersion / écart-type plus étroite des histogrammes. On remarque aussi que la robotisation des machines M2 et M3 n'affecte pas seulement les machines considérées, mais aussi les machines voisines, comme la M1 et la M4. Ceci suggère une amélioration du flux grâce à la robotisation des machines qui s'arrête à la machine suivante (M+1). Cette dynamique n'est pas transférée à la machine M+2, visible sur la figure par l'immutabilité des histogrammes des autres machines (Figure 49).

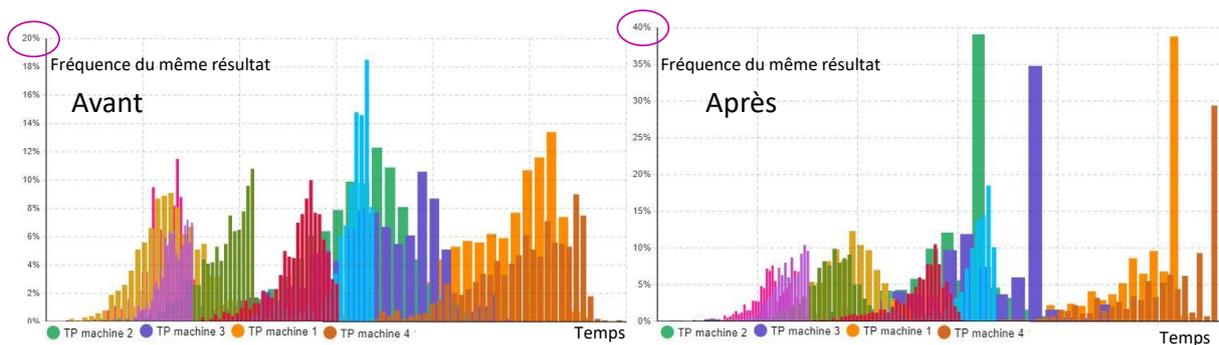


Figure 49. Effet de la robotisation sur le système de production

Le Tableau 16 regroupe les résultats des scénarii simulés. Les résultats sont moyennés selon les agents et selon les itérations, pour les données détaillées par agent, voir l'Annexe 4. Les résultats sont aussi normalisés et comparés par rapport au scénario initial. Les changements sont représentés par un pourcentage et un code couleur. Le scénario initial est alors considéré comme référentiel (d'où les valeurs à 0%). L'utilisation du code couleur est importante car l'amélioration de performance de

certaines paramètres comme le TnP attente est représentée par une réduction, alors qu'elle est représentée par une augmentation pour d'autres paramètres comme pour le TP machine. Un défaut de l'utilisation du code couleur est la perte de contexte. En effet, comme le code couleur compare les valeurs entre elles, si par exemple toutes les valeurs sont médiocres, la valeur la moins médiocre est affichée en vert, donnant ainsi l'impression que c'est un bon résultat alors qu'en réalité il ne l'est pas. C'est pour cette raison que les résultats d'aide à la décision en forme de barres sont présentés dans l'Annexe 5.

Tableau 16. Résultats des scénarii simulés

	TP machine	TnP Attente machine	TP opérateurs	TnP Attente opérateurs	TnP Manque Ressources	Production par opérateur	Production par machine	TnP Contrôle	Production finale		
									P1	P2	P3
Scénario Initial (1op=1machine)	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Scénario 2 (8o o2m2+3 & o3m8)	-1,93%	4,72%	6,54%	-0,08%	91,77%	17,89%	-10,45%	12,90%	-15,94%	-13,26%	-13,26%
Scénario 2 (8o o6m6+7)	-3,54%	5,41%	-8,26%	-0,50%	764,15%	0,15%	-6,00%	17,39%	-2,90%	-13,26%	-13,26%
Scénario 2 (8o o4m4+7)	-0,37%	11,17%	6,59%	-1,55%	435,97%	24,99%	6,91%	15,88%	7,25%	1,66%	1,66%
Scénario 2 (8o o1m1+7)	-1,13%	3,91%	-3,37%	-0,59%	256,32%	19,43%	-0,96%	10,31%	-4,35%	-4,97%	-4,97%
Scénario 2 (8o o5m5+7)	2,62%	8,88%	-7,04%	-0,36%	40,41%	28,77%	-5,09%	8,62%	-4,35%	-14,36%	-14,36%
Scénario 2 (8o o3m3+4)	-3,72%	6,66%	2,83%	-0,98%	364,08%	22,45%	3,61%	12,23%	10,14%	-4,97%	-4,97%
Scénario 2 (8o o0m0+5)	2,60%	2,80%	7,37%	0,16%	22,35%	15,09%	-7,79%	16,12%	-5,80%	-14,36%	-14,36%
Scénario 2 (8o o0m0+6)	-2,45%	7,48%	31,87%	-1,49%	253,85%	38,75%	1,58%	7,33%	2,90%	-3,11%	-3,11%
Scénario 2 (8o o0m0+7)	-0,78%	13,67%	55,73%	-0,46%	33,21%	119,22%	-4,16%	12,64%	-5,53%	-11,11%	-11,11%
Scénario 2 (8o o1m1+6)	-2,77%	2,82%	18,36%	-1,15%	514,24%	48,54%	-1,91%	4,88%	-8,15%	-4,83%	-4,83%
Scénario 2 (8o o1m1+2)	-0,50%	6,37%	12,98%	-1,26%	410,59%	31,21%	1,10%	7,61%	4,14%	-2,62%	-2,62%
Scénario 2 (8o o1m1+4)	-1,02%	6,86%	14,18%	-1,51%	229,61%	22,22%	2,15%	6,64%	2,64%	0,27%	0,27%
Scénario 3 (7o o1m1+4 o2m2+3)	-2,75%	16,59%	20,31%	-2,04%	332,80%	50,32%	1,58%	19,39%	7,70%	-6,75%	-6,75%
Scénario 3 (7o o6m6+7 o2m2+3)	-0,56%	13,46%	6,79%	-0,97%	293,91%	23,76%	-9,09%	30,93%	-13,13%	-11,35%	-11,35%
Scénario 3 (7o o4m4+7 o2m2+3)	-1,78%	16,75%	15,26%	-1,22%	232,87%	45,70%	-2,81%	28,34%	-10,41%	-8,32%	-8,32%
Scénario 3 (7o o0m0+7 o3m3+4)	-2,93%	24,26%	30,13%	-2,21%	223,96%	73,70%	9,97%	25,15%	14,14%	0,28%	0,28%
Scénario 4 (6o o0m0+6+7 o2m2+3)	-6,66%	40,33%	95,94%	-4,99%	334,03%	240,62%	-3,71%	47,44%	-9,54%	-9,17%	-9,17%
Scénario 4 (6o o0m0+6+7 o3m3+4)	-6,45%	33,30%	77,97%	-4,57%	860,20%	217,92%	-6,43%	36,67%	-5,52%	-15,26%	-15,26%
Scénario 4 (6o o0m0+7 o3m3+4 o5m5+6)	-2,15%	22,93%	37,48%	-5,49%	103,90%	125,81%	-2,48%	32,35%	3,20%	-9,38%	-9,38%
Scénario 4 (6o o0m0+7 o1m1+2 o4m3+4)	-3,88%	19,18%	70,83%	-4,32%	134,96%	209,95%	-2,79%	28,53%	-5,21%	-8,98%	-8,98%
Scénario 4 (6o o0m0+7+1 o2m2+4)	-3,08%	30,38%	70,62%	-4,41%	50,65%	151,17%	-7,99%	46,21%	-6,79%	-9,54%	-9,54%
Scénario 4 (6o o0m0+7+1 o2m2+3)	-3,32%	31,18%	78,47%	-4,38%	193,59%	183,43%	-5,30%	45,23%	-3,29%	-10,72%	-10,72%
Scénario 5 (6o o0m0+7+1 o2m2+4) + robo	-8,13%	6,65%	27,54%	-5,18%	595,35%	128,61%	-14,25%	32,82%	-19,69%	-13,74%	-13,74%
Scénario 4 (6o o0m0+7+1 o2m2+4) + robo	-11,43%	5,99%	29,35%	-8,84%	841,49%	115,90%	-8,40%	33,00%	-15,30%	-1,82%	-1,82%
Scénario 4 (6o o0m0+7 o3m3+4 o5m5+6) + robo	-16,97%	-3,91%	1,09%	-9,44%	1930,07%	84,85%	-7,41%	26,37%	-13,71%	-0,15%	-0,15%
Scénario 3 (7o o6m6+7 o2m2+3) + robo	-13,50%	-8,32%	-20,13%	-2,34%	2183,54%	2,88%	-7,66%	18,25%	-19,01%	-1,13%	-1,13%
Scénario 2 (8o o0m0+7) + robo	-10,23%	-7,16%	-31,97%	-10,21%	1174,83%	3,94%	4,27%	-4,51%	-12,50%	26,03%	26,03%
Scénario 6 o0m1+2+3+4 + robo 2+3	-4,05%	12,38%	39,93%	-2,22%	56,84%	96,78%	-18,47%	37,46%	-6,52%	-13,90%	-13,90%
Scénario 6 (6o o0m1+2+3+4 + robo 2+3)	-8,26%	3,30%	24,50%	-1,22%	481,55%	73,50%	-18,95%	17,14%	-6,51%	-14,13%	-14,13%

En analysant le tableau, une remarque importante peut être réalisée, il n'existe pas de solution parfaite qui améliore tous les indicateurs de performance. Les scénarii simulés améliorent certains indicateurs et en détériorent d'autres. Il est donc important de bien comprendre le système de production et de viser un objectif précis bien défini auparavant. Par exemple, si l'objectif de l'entreprise est d'améliorer la production finale, il est donc plus intéressant de choisir le « scénario 3 (7o o0m0+7 o2m2+3) » car il augmente la production moyenne de 9,97%, répartie en une augmentation de 14,14%, 0,28% et 0,28% sur les produits de type P1, P2 et P3, respectivement. On s'aperçoit alors que ce scénario améliore surtout la production des produits de type P1. Si on souhaite améliorer la production des deux autres types de produits (+26,03% et +26,03%), le « scénario 2 8o o0m0+7 + robot » est beaucoup plus adéquat, cependant, il faut garder en tête le fait qu'il détériore la production des produits de type P1 (-12,50%). Le tableau résultant de la simulation des différents scénarii représente l'outil adéquat de l'aide à la prise de décision. En effet, il contient tous les indicateurs de performance pris en compte par le modèle et le simulateur, et offre une vue objective des données. Les décideurs sont alors amenés à étudier le tableau et à prendre une décision selon l'objectif souhaité. La prise de décision peut être statique ou dynamique. Grâce à cette dernière, la prise de décision peut être réalisée selon les changements de la demande. Dans ce cas-là, l'allocation des opérateurs est dynamique et s'adapte aux demandes du marché selon les résultats des simulations réalisées.

Une étude de variabilité est réalisée sur certains des scénarii. Le but est d'étudier la faisabilité des solutions dans la réalité en étudiant leurs stabilités dans la simulation. La Figure 50 regroupe plusieurs exemples des scénarii et de leurs variantes (allocations). Pour le scénario initial, on remarque que l'écart-type des résultats est assez faible, visible notamment par la forme étroite de la cloche (mais aussi par les valeurs d'écart-types calculées sur les 2000 réplifications). En ce qui concerne les autres scénarii, on remarque l'augmentation de la dispersion des résultats de plusieurs les machines. Pour le scénario (b), seulement quelques machines ont perdu leur répétabilité, notamment la machine 7. De même pour le scénario (d). Toutefois, le scénario (c) est le moins stable car la distribution des résultats est trop dispersée ce qui cause des problèmes de fluctuation, et montre alors la présence d'une instabilité au niveau du système de production.

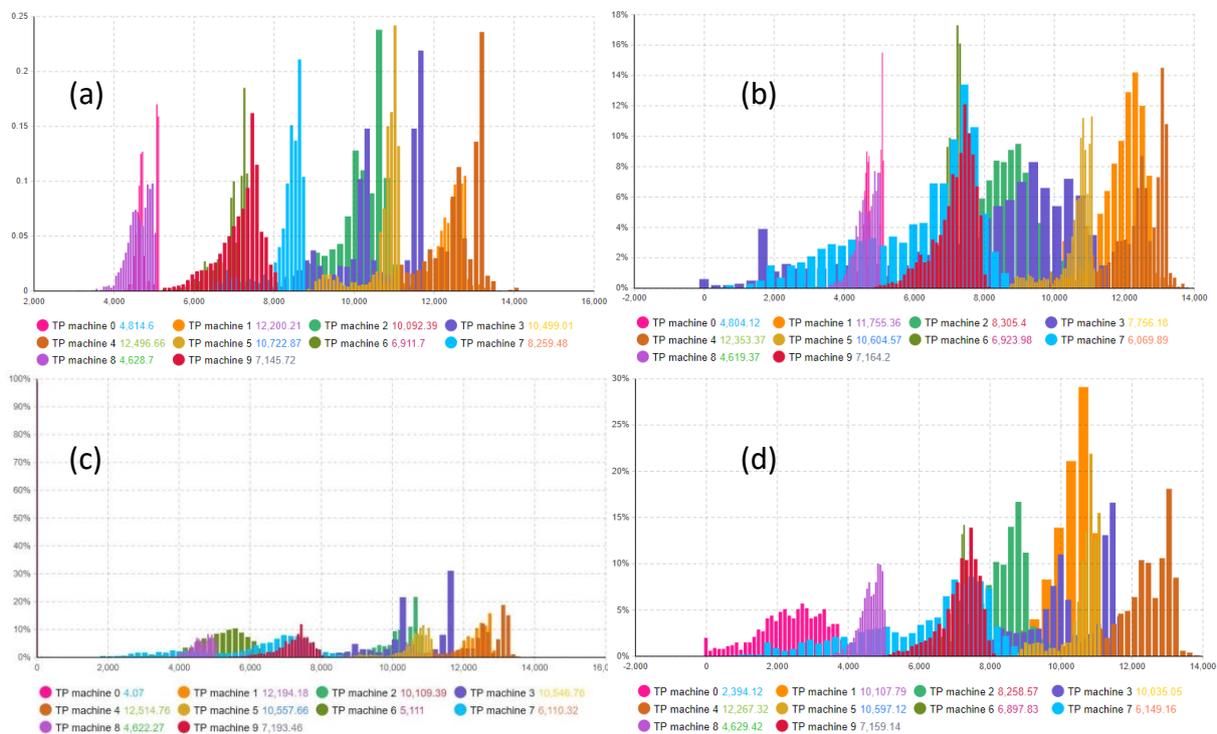


Figure 50. Etude de variabilité des scénarios. (a) scénario initial (b) scénario 3 allocation 1 (c) scénario 3 allocation 2 et (d) scénario 4 allocation 1.

6. Conclusion du 2^{ème} cas d'étude

Pour conclure, le modèle et la simulation ont permis de créer un jumeau numérique de ce deuxième cas d'étude. Une confrontation des résultats de la simulation et des données réelles a permis de valider ce dernier. Cette validation du scénario initial confère une crédibilité aux résultats obtenus pour les scénarii théoriques développés par la suite.

La simulation du cas initial a permis d'identifier certains problèmes que la ligne de production rencontrait tels que la présence de déséquilibres au niveau des temps productifs et non-productifs entre les machines, mais surtout entre les opérateurs. En effet, certains opérateurs se retrouvaient avec des marges de manœuvre très minces,

alors que d'autres avaient des TnP d'attente très importants et donc une performance faible. Enfin, des machines goulots ont été identifiées selon une méthode à deux étapes.

Ces problèmes ont donné lieu à deux stratégies d'amélioration comptant chacune plusieurs allocations différentes. Un total de 21 allocations sont identifiées et simulées, et leurs résultats présentés de façon à faciliter la prise de décision selon l'objectif souhaité. Dû à la nature contradictoire des KPIs, les résultats montrent l'inexistence d'une allocation parfaite qui améliore tous les paramètres recherchés, d'où l'importance de cet outil. En effet, l'absence d'une solution « miracle » donne lieu à plusieurs possibilités chacune avec des points forts et des points faibles. L'outil aide alors les décideurs à simuler plusieurs stratégies et à présenter leurs résultats les aidant ainsi à la prise de décision pour répondre aux besoins et objectifs souhaités. Cette méthode a donné lieu à une stratégie de robotisation de certaines machines pour répondre à des besoins spécifiques du partenaire industriel. L'outil a alors permis d'étudier l'impact de ce changement sur le système de production avant son implémentation dans la vraie vie. La robotisation de ces machines s'est avérée très impactante de manière positive, car elle améliore la stabilité du système, surtout celle des machines robotisées et celles qui la précèdent. En effet, les résultats de ces machines en termes de TP, production et autres KPIs ont montré une réduction de leur dispersion sans changer les autres aspects du système. Cette réduction de dispersion ne doit toutefois pas être confondue avec la rigidité, le système devient stable tout en restant flexible. La robotisation a donc comme effet de stabiliser la variabilité et l'incertitude du système.

Finalement, dans le même contexte de variabilités, incertitudes et stabilité, une étude a été réalisée. La méthode consiste à répliquer la même simulation avec les mêmes données un grand nombre de fois pour analyser la robustesse du scénario simulé. Dû à des contraintes matérielles et logicielles, cette étude est réalisée 2000 fois pour chaque scénario simulé et la robustesse est analysée via la dispersion des résultats du même scénario se composant des mêmes données d'entrée et conditions initiales. Les résultats montrent que certains scénarii sont plus stables que d'autres, ce qui suggère que la prise de décision doit également prendre en compte cet aspect de robustesse et de stabilité des scénarios.

IV. Conclusion du chapitre 3 : cas d'étude

Les cas d'étude sont une étape importante dans la réalisation de cette thèse car ils permettent d'étudier, analyser, améliorer et enfin confronter le modèle, la méthodologie et l'outil développés aux réalités industrielles. Dans notre cas, les cas d'étude ont aussi permis de confronter les résultats obtenus grâce à l'outil aux données réelles, offrant ainsi plus de crédibilité à l'outil, au modèle et à cette étude. De plus, les deux cas d'études visent deux problématiques différentes et proviennent d'industries différentes, ce qui souligne la flexibilité du modèle et de l'outil développés. En effet, ils peuvent s'adapter à une multitude de systèmes de production.

La principale utilité de l'outil se trouve dans sa possibilité de créer des jumeaux numériques similaires aux systèmes réels pour ensuite les utiliser pour simuler des cas non-existants avec une bonne certitude des résultats obtenus. De plus la prise en compte des temps non-productifs (TnP), des facteurs humains (FH) et des marges de manœuvre (MM) directement dans le modèle et l'outil est une nouvelle approche qui permet de prendre en compte plusieurs aspects qui sont généralement étudiés séparément. Cette nouvelle approche permet de découvrir de nouvelles dynamiques, qui parfois, ne sont pas attendues. En effet, l'utilité de l'outil est constatée lors de la simulation du scénario initial des deux systèmes de production. Cette première étape permet de découvrir des problématiques qui sont certes la plupart du temps connues des partenaires industriels, mais parfois qui leur sont cachés. La découverte des problématiques cachées est d'autant plus accentuée lors de la simulation des scénarii théoriques. Ces découvertes permettent de leur épargner des efforts et de réaliser des économies sur des stratégies qui auraient pu échouer si implémentées sans d'abord être analysées par l'outil. En effet, le scénario choisi grâce à l'outil a une grande chance de répliquer les mêmes résultats dans la réalité avec un écart moyen de 4,45%.

Ce chapitre a aussi permis d'étudier deux attentes différentes prouvant ainsi sa flexibilité. En effet, le premier cas d'étude se concentre sur l'amélioration de la performance tout en prenant en compte les facteurs humains. Alors que le second cas d'étude vise à améliorer la performance industrielle via de nouvelles allocations et la robotisation. Pour les deux cas d'étude, une aide à la décision simple est suggérée sous forme de plusieurs scénarii et stratégies avec leurs résultats présentés selon différents KPIs. De plus, pour le deuxième cas d'étude, une étude de robustesse, stabilité ou variabilité est réalisée pour analyser la dispersion des résultats due aux aspects aléatoires du système.

Le premier cas d'étude analyse l'impact de la fatigue et de l'apprentissage sur le système de production dans sa globalité. Les résultats soulignent la relation contradictoire entre ces deux facteurs humains et comment ils influencent de manière opposée plusieurs résultats comme le temps de production, la probabilité d'erreur humaine ou la production totale. Une explication de cette interaction est plus l'opérateur travaille plus il se fatigue et augmente son expérience simultanément. La fatigue est ainsi le coût à payer pour gagner de l'expérience. De plus, les résultats soulignent plusieurs dynamiques régissant le comportement de l'opérateur et ainsi du système, parmi ces dynamiques : (1) la différence entre la vitesse d'apprentissage et de fatigue, (2) la rétention de l'expérience acquise comparée à la rétention de la fatigue (aussi appelée la fatigue résiduelle) et (3) l'accumulation de plusieurs instructions simples pour produire un système complexe. Ces dynamiques régissent le comportement du système et donc des résultats aussi. Ce cas d'étude a permis de montrer que la complexité du système génère des résultats parfois inattendus, d'où l'importance de l'outil car il ne faut pas se fier à l'intuition mais tester les stratégies via l'outil. Par exemple, le cas d'étude montre parfaitement l'effet de la fatigue et de l'expérience du court au long terme. En effet, dans le court terme, l'opérateur se fatigue plus qu'il n'apprend, et donc

au cours d'une période de travail il perd légèrement et progressivement en performance. Cependant, grâce à la rétention de l'expérience plus longue que celle de la fatigue, l'opérateur réussit à gagner en performance de manière progressive sur le long terme. Autrement dit, une légère perte de performance sur le court terme est le prix à payer pour une augmentation progressive de la performance sur le moyen et long terme.

Le deuxième cas d'étude quant à lui analyse l'impact des allocations et de la robotisation sur la performance de la ligne de production. Les résultats montrent que l'utilisation des TnP, FH et MM propose une nouvelle approche pour étudier le système offrant ainsi une vue innovante sur le problème. L'outil permet alors d'identifier des scénarii intéressants pour améliorer les KPIs visés. Ces scénarii sont ensuite simulés une nouvelle fois avant et après robotisation pour comprendre l'impact de cette dernière. Ceci a montré que l'un des impacts les plus importants de la robotisation est l'amélioration de la stabilité du système, en particulier les machines robotisées et celles qui la précèdent directement. Cette stabilité est démontrée grâce à la réduction de la dispersion des résultats. Finalement, des études de variabilités sont également réalisées sur les scénarii pour étudier l'impact de la variation des données d'entrée de manière individuelle sur les KPIs du système de production. Les résultats suggèrent que certains scénarii sont plus stables que d'autres en termes de variabilité et qu'il faut prendre en compte cet aspect lors de la prise de décision.

Pour conclure, la réalisation des cas d'étude a permis de confronter le modèle et l'outil développés aux réalités industrielles. Les résultats obtenus grâce à eux sont confrontés aux données réelles. L'utilité de l'outil est prouvée selon ces cas d'étude en termes d'améliorations des performances industrielles et des conditions de travail. Cette utilité est aussi constatée dans les possibilités diverses qu'il octroie sous forme de scénarii et stratégies actuelles ou potentielles.

Conclusions, limitations et perspectives

Il est important, avant de clôturer cette thèse, de dresser un bilan des contributions réalisées tout en exprimant les limitations de ces propositions pour enfin s'ouvrir sur de potentielles perspectives.

I. Conclusions

Pour rappel, cette thèse traite la problématique de définition des temps non productifs et leur identification et proposition de corrections dans le but d'augmenter les performances des systèmes de production. La problématique peut être résumée en :

Comment implémenter les paramètres du système de production et les facteurs humains pour identifier, réduire et exploiter les temps non productifs dans le but d'anticiper les variabilités du système pour améliorer la productivité, la reconfigurabilité et les conditions de travail ?

Le but de la thèse est, en effet, de développer une méthodologie, un modèle et un outil basé, entre autres, sur les paramètres du système de production et de certains facteurs humains dans le but d'identifier les temps non productifs, de les réduire et les exploiter. Ensuite, grâce à l'implémentation des scénarii et stratégies, l'outil permet d'anticiper les incertitudes et les variations. Pour arriver à ce but, les travaux de cette thèse ont permis d'identifier et de définir les temps non productifs (TnP) en se basant sur la matrice d'Eisenhower et les principes du Lean sans complètement en dépendre, car comme démontré, l'application actuelle du Lean pousse à la rigidité du système de production, ce qui est en confrontation des objectifs de cette thèse. Une méthodologie a ensuite été conçue dans le but de développer un modèle de systèmes de production comprenant les facteurs humains (FH), les temps non productifs (TnP) et les marges de manœuvre (MM). Ce modèle est ensuite implémenté dans un outil développé sur AnyLogic pour faciliter l'interface Homme-machine. L'outil permet alors de simuler des scénarii, réels ou fictifs. L'anticipation des incertitudes et variations est accomplie surtout via la réalisation de scénarios en utilisant la simulation. Les résultats de ces simulations sont présentés sous forme d'aide à la décision simple à appréhender, dans le but d'assurer la validité et l'utilité de l'outil au niveau industriel.

Cette conclusion générale est décomposée en 3 parties selon les contributions principales :

1. L'identification et la définition des temps non productifs (TnP)

2. Le développement du modèle de simulation et de l'outil
3. La validation du modèle et de l'outil via deux cas d'études industriels

1. L'identification et la définition des temps non productifs (TnP)

La première contribution de ces travaux de thèse peut être résumée par l'identification de quatre types de temps : les temps productifs (TP), les temps peu productifs (TpP), les temps mal productifs (TmP) et les temps non productifs (TnP) ; ainsi que leurs définitions. Chacun de ces temps est défini selon des caractères distincts, selon leur impact sur la qualité et la cadence. En effet, la qualité est catégorisée en deux : bonne qualité et mauvaise qualité, alors que la cadence est catégorisée en trois : cadence nominale, mauvaise cadence et arrêt total. Ces catégories sont ensuite croisées pour définir les types de temps de l'activité concernée. Cette définition est basée sur la valeur, qui est l'une des innovations de ce sujet. Grâce à ça, de nouvelles définitions des temps, des métriques de mesures et des plans d'actions sont alors proposés.

En se basant sur la littérature Lean et la littérature industrielle, plusieurs activités ont ensuite été catégorisées selon les 4 temps définis. Puis, des métriques de mesure quantitatives (ou qualitatives, le cas échéant) sont proposées, ainsi que des plans d'actions pour les améliorer. Ces définitions, métriques et plans d'actions sont ensuite utilisés dans le développement du modèle. En effet, les définitions ont servi pour modéliser les différentes relations du modèle, les métriques régissent les lois, algorithmes et fonctions du modèle et les plans d'actions sont utilisés pour suggérer les stratégies d'amélioration.

2. Le développement du modèle et de l'outil

Dans le but de rendre modulaire la ligne de production, les facteurs humains, les temps non productifs et l'implémentation outil, le modèle est composé de trois sous-modèles : (1) le premier gère toute la partie ligne de production avec les données et paramètres qui lui sont associés, (2) le second gère les piliers présentés : les TnP et les FH et (3) le troisième gère la mise en relation entre les 2 premiers sous-modèle puis leur implémentation dans le simulateur.

Le modèle et l'outil se basent sur le principe d'utilisation de parties élémentaires pour construire un ensemble complexe (démarche ascendante, bottom-up). Avant d'implémenter le modèle, la logique de fonctionnement des sous-modèles entre eux est définie en utilisant les diagrammes d'état / transitions. En se basant sur la théorie des graphes avec les nœuds et les arêtes, plusieurs diagrammes d'état permettent de développer des logiques de fonctionnement en utilisant les états et les transitions. Chaque diagramme d'état permet de définir le fonctionnement d'un des acteurs du modèle. C'est à ce niveau-là que les métriques de mesures des temps et des facteurs humains ainsi que celles du système de production sont implémentées. Elles permettent alors l'évolution du système, ce qui est utilisé au niveau des transitions et donc la prise de décision.

Le choix de l'outil est réalisé en accord avec les besoins du modèle développé. La présence d'acteurs différents, autonomes et individuels guide ce choix vers les simulations multi-agents, et l'importance du temps et de sa mesure le guide vers la simulation à événements discrets. D'autres paramètres ainsi que des limitations sont pris en compte dans ce choix. Finalement, l'outil choisi pour implémenter le modèle est AnyLogic.

Cette approche de développement a prouvé être d'une grande flexibilité. En effet, la modularisation des sous-modèle permet de changer de systèmes de production, d'allocations ou de stratégies sans avoir à changer le reste du modèle, et vice-versa.

3. La confrontation du modèle et de l'outil à la réalité via des cas d'étude

Pour valider le modèle et l'outil développés, des cas d'étude sont réalisés en collaboration avec des partenaires industriels. Dans un premier temps, ces cas d'étude permettent d'affiner le modèle. Puis, ils permettent aussi de tester et vérifier le modèle via la confrontation du réel et du simulé. Cette confrontation étant positive, elle ouvre la voie aux scénarii et stratégies théoriques dont les résultats sont plus plausibles.

De plus, l'outil permet de découvrir certaines dynamiques entre les différents acteurs ou paramètres du système de production. La modification facile et rapide des différents paramètres du système ouvre lieu à plusieurs possibilités. Il est donc simple et rapide d'expérimenter au niveau des allocations et autres paramètres du système dans le but d'améliorer un ou plusieurs KPIs visés.

L'utilité de l'outil est démontrée sous la forme de deux cas d'étude. Sa flexibilité montre le grand nombre de possibilités réalisables à simuler sous formes de scénarii, d'allocations et de stratégies. L'étude et l'analyse des résultats présentés de manière simple joue le rôle d'outil d'aide à la décision facile d'utilisation. Une des limitations de la version actuelle de l'outil est la nécessité de réaliser certaines modifications pour parvenir à cette flexibilité. L'une des perspectives est de rendre l'outil complètement flexible et plus simple d'usage.

4. Conclusion générale

La définition, la modélisation et l'implémentation sont utilisées de manières complémentaires dans le but d'améliorer les performances industrielles, les conditions de travail et d'anticiper les variations des systèmes de production. En effet, cette thèse montre que, certes, il est important d'étudier des concepts de manière individuelle dans le but de les comprendre en profondeur, cependant, il est tout aussi important, voire plus important, d'étudier ces concepts-là de manière collective ce qui fait apparaître des dynamiques cachées, non-apparents lors des études individuelles. Cette conclusion est d'autant plus évidente lors des cas d'étude.

Cette recherche appliquée a donné lieu à une méthodologie, un modèle et un outil d'amélioration des performances industrielles et/ou des conditions de travail via la définition des temps non productifs et l'implémentation de concepts innovants tels que les facteurs humains et les marges de manœuvre. De plus, l'anticipation des

incertitudes et variations du système de production est obtenue via la simulation des scénarii et stratégies obtenus grâce aux plans d'actions des TP, TpP, TmP et TnP.

Pour conclure, les trois contributions principales (et leurs différentes sous-contributions) répondent à la problématique proposée au début de cette thèse. Une nouvelle définition des temps est proposée avec les différentes métriques pour les mesurer ainsi que des plans d'action pour les améliorer. Une méthodologie, un modèle et un outil sont développés dans le but d'étudier des systèmes de production d'une manière flexible dans le but d'aider à la décision et d'anticiper les variations du système, améliorer les performances industrielles et les conditions au travail.

II. Limitations

Comme toute thèse, il existe des limitations à cette étude. Le but de cette partie est de citer les limitations rencontrées lors de cette recherche scientifique dans le but d'informer les recherches à venir de ces limitations. Des perspectives seront présentées dans la partie suivante dans le but de répondre à ces limitations.

La première limitation et peut-être la plus importante est l'utilisation de modèles théoriques de facteurs humains. Le modèle développé et les résultats sont largement basés sur ces modèles. Certes, ces modèles sont basés sur des études entièrement théoriques. Cependant, due à la nature de la thèse et les résultats attendus, ce choix est considéré raisonnable en comparant les avantages et les inconvénients de ces modèles. De plus, les cas d'étude ont permis de confronter ces modèles aux réalités industrielles. Par ailleurs, la littérature prouve l'existence d'un manque considérable quand il s'agit de modèles de facteurs humains et leurs différentes facettes. Ceci est dû, en partie, à la nature qualitative de ces facteurs. De plus, les modèles choisis dans cette étude permettent de calculer uniquement les facteurs humains physiques liés à la fabrication. Ils sont alors incapables de calculer les facteurs humains cognitifs par exemple.

La deuxième limitation est l'utilisation de la simulation. La littérature montre que l'utilisation de la simulation résulte en des solutions locales. Il est impossible de s'assurer que les solutions trouvées avec la méthodologie développée basée sur la simulation sont des solutions globales. Autrement dit, il n'est pas possible de savoir si la solution choisie peut être améliorée encore plus. Cette limitation est, toutefois, possible à résoudre en combinant la simulation avec l'optimisation (plus d'informations dans la partie perspectives).

Malgré le but de cette étude d'être exhaustive et d'étudier des systèmes de production selon plusieurs aspects (performance industrielle, conditions de travail, qualité, cadence, etc.), d'autres aspects n'ont pas pu être inclus dans cette étude, notamment l'aspect financier. Le modèle développé ne prend pas en compte cet aspect du système de production qui étudierait la présence d'une corrélation entre l'amélioration de la performance industrielle et l'amélioration des revenus et des coûts.

Finalement, l'utilisation de l'outil n'est pas entièrement automatisée. Cette limitation réduit l'utilité de l'outil et devrait être considérée.

III. Perspectives

Pour répondre à la première limitation, il n'existe qu'une seule piste possible : Il est primordial de répondre au manque de modèles de facteurs humains dans la littérature en développant des modèles validés expérimentalement basés sur des mesures quantitatives. La même piste doit être suivie pour développer des modèles de facteurs humains étudiant la partie cognitive. La nature qualitative des facteurs humains rend cette piste difficile à suivre. Cependant, certains modèles de facteurs humains basés sur des mesures quantitatives existent. (Patton et al., 1991) étudie uniquement le mouvement de l'Homme selon plusieurs modes et en portant différents poids. L'étude se base principalement sur la consommation en énergie du corps calculée à partir de la respiration par minute, le volume respiratoire par minute, le rapport d'échange respiratoire (CO_2/O_2) ou même le battement par minute. (Liu, 2007) étudie exactement les mêmes aspects que l'étude précédente mais selon la consommation maximale d'oxygène (VO_2max). Ces deux études se basent sur des métriques quantitatives. Toutefois, elles étudient uniquement le mouvement de l'Homme. D'autres aspects peuvent être pris en compte tels que la fabrication, le chargement et déchargement voire même des aspects cognitifs.

La deuxième limitation, quant à elle, peut être résolue via deux façons différentes : (1) l'utilisation d'une autre méthode comme l'optimisation (comme discuté lors du chapitre du choix d'outil), ou (2) l'utilisation de la simulation en série avec un outil d'optimisation. (Petronijevic et al., 2019) a utilisé une méthodologie similaire en commençant d'abord par l'optimisation puis la simulation. Cette perspective suggère de développer une méthodologie inverse où les résultats de la simulation permettront de trouver des résultats locaux adéquats aux attentes du cas étudié. Ces résultats serviront ensuite de contraintes pour l'optimisation globale dans le but de vérifier si cette solution est la meilleure.

Une troisième perspective serait d'ajouter l'aspect financier dans le modèle en prenant en compte les coûts et les revenus du système de production pour étudier la performance industrielle sous un nouvel angle.

Une piste intéressante, qui a été poursuivie puis abandonnée pour cause de manque de ressources et de temps, est d'enrichir le modèle par un VSM amélioré. En effet, comme le modèle et les TnP sont basés principalement sur la valeur, cette piste est cohérente avec la direction de la thèse. En plus des indices classiques utilisés dans le VSM, d'autres KPIs obtenus grâce à l'outil peuvent être introduits pour enrichir le VSM, surtout au niveau des temps (voir Figure 51). Dans une VSM classique, l'échelle de temps différencie uniquement entre la production et la non-production. Le VSM enrichi peut utiliser les définitions de TnP et les résultats de l'outil pour enrichir cette échelle

avec des TP, TnP et autres KPIs pour dévoiler la performance réelle en prenant compte des défaillances et des TnP de marche, par exemple.

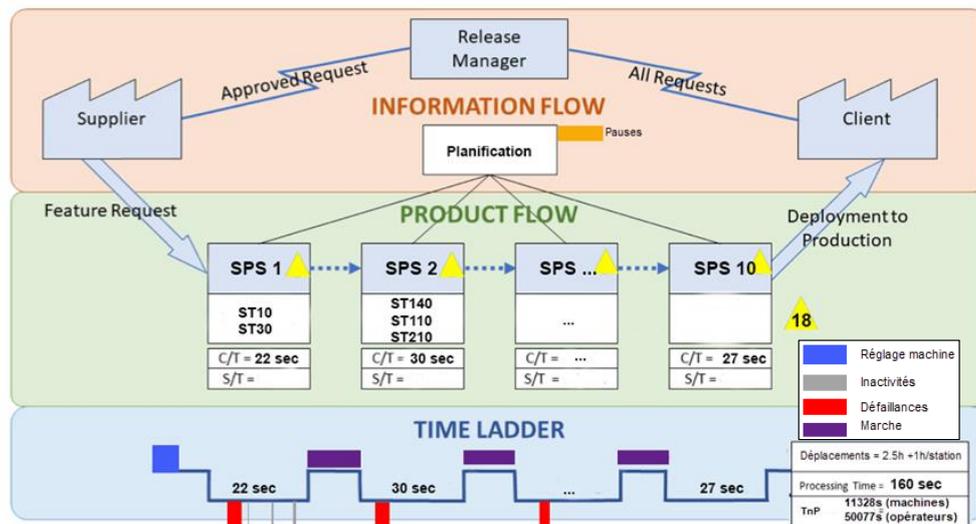


Figure 51. Exemple de VSM amélioré / enrichi

Enfin, le modèle et l'outil peuvent être améliorés en améliorant l'interface et le rendant complètement automatisé et simple d'utilisation sans connaissances préalables, permettant alors son utilisation par une plus grande tranche de personnels.

Références

- Al-Zuheri, A., Luong, L., & Xing, K. (2013). Prediction and analysis impact of operational design of a manual assembly system with walking workers on performance. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 26(6), 540–560. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2012.749525>
- Alain-Gabriel, V. (2021). *Covid-19? Comment le N° 1 mondial Toyota se joue de la crise*. https://www.challenges.fr/automobile/actu-auto/covid-19-comment-le-n-1-mondial-toyota-se-joue-de-la-crise_764404
- AnyLogic Help. (2021). *Weibull Distribution*. <https://anylogic.help/advanced/functions/weibull.html>
- Azadeh, A., Anvari, M., Ziaei, B., & Sadeghi, K. (2010). An integrated fuzzy DEA-fuzzy C-means-simulation for optimization of operator allocation in cellular manufacturing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(1–4), 361–375. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2088-6>
- Badiger, A. S., & Gandhinathan, R. (2008). A proposal : evaluation of OEE and impact of six big losses on equipment earning capacity. *International Journal of Process Management and Benchmarking*, 2(3), 234–248.
- Battini, D., Delorme, X., Dolgui, A., & Sgarbossa, F. (2015). Assembly line balancing with ergonomics paradigms: Two alternative methods. *IFAC-PapersOnLine*, 28(3), 586–591. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.145>
- Bi, Z. (2011). *Revisiting System Paradigms from the Viewpoint of Manufacturing Sustainability*. 1323–1340. <https://doi.org/10.3390/su3091323>
- Botti, L., Mora, C., & Regattieri, A. (2017). Integrating ergonomics and lean manufacturing principles in a hybrid assembly line. *Computers and Industrial Engineering*, 111, 481–491. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.05.011>
- Calzavara, M., & Grosse, E. H. (2018). The effects of human fatigue on learning in order picking: an explorative experimental investigation. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 832–837. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.442>
- Canetta, L., Redaelli, C., & Flores, M. (2014). *Digital Factory for human-oriented production systems* (L. Canetta, C. Redaelli, & M. Flores (eds.); 1st ed.). Springer, London. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-1-84996-172-1>
- Cheng, Y., Sun, F., Zhang, Y., & Tao, F. (2018). Task allocation in manufacturing: A review. *Journal of Industrial Information Integration*. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2018.08.001>
- Cicirelli, F., Furfaro, A., & Nigro, L. (2011). Modelling and simulation of complex manufacturing systems using statechart-based actors. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(2), 685–703. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2010.10.010>
- Cortes, H., Daaboul, J., Le Duigou, J., & Eynard, B. (2016). Strategic Lean Management: Integration of operational Performance Indicators for strategic Lean management. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 65–70. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.551>

- Coutarel, F. (2004). *La prévention des troubles musculo-squelettiques en conception : quelles marges de manœuvre pour le déploiement de l'activité ?* [Université Victor Segalen - Bordeaux II]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00821248>
- Coutarel, F., Daniellou, F., Dugué, B., Coutarel, F., Daniellou, F., & Dugué, B. (2013). *La prévention des troubles musculo-squelettiques : quelques enjeux épistémologiques*
To cite this version : HAL Id : halshs-00763361.
- Dantan, J.-Y., El Mouayni, I., Sadeghi, L., Siadat, A., & Etienne, A. (2019). Human factors integration in manufacturing systems design using function-behavior-structure framework and behaviour simulations. *CIRP Annals*, 68(1), 125-128. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.04.040>
- Dantan, J.-Y., Etienne, A., Petronijevic, J., & Siadat, A. (2020). Tolerance & Time margin. *Procedia CIRP*, 92, 51-56. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.139>
- Dekker, S., & Hollnagel, E. (2004). Human factors and folk models. *Cognition, Technology & Work*, 6(2), 79-86. <https://doi.org/10.1007/s10111-003-0136-9>
- Digiesi, S., Kock, A. A. A., Mummolo, G., & Rooda, J. E. (2006). the Effect of Dynamic Worker Behavior on Flowline Performance. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(3), 341-346. <https://doi.org/10.3182/20060517-3-FR-2903.00184>
- Doll, W. J., & Vonderembse, M. A. (1991). The Evolution of Manufacturing Systems : Towards the Post-Industrial Enterprise. *Omega The International Journal of Management Science*, 19(5), 401-411.
- Durand, M., Vézina, N., Baril, R., Loisel, P., Richard, M., & Ngomo, S. (2008). *La marge de manœuvre de travailleurs pendant et après un programme de retour progressif au travail.*
- El Maraghy, H. A. (2006). Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 17(4 SPECIAL ISSUE), 261-276. <https://doi.org/10.1007/s10696-006-9028-7>
- El Mouayni, I., Demesure, G., Bril-El Haouzi, H., Charpentier, P., & Siadat, A. (2019). Jobs scheduling withing Industry 4.0 with consideration of worker's fatigue and reliability using Greedy Randomized Adaptive Search Procedure. *IFAC-PapersOnLine*, 52(4), 395-400. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.08.242>
- El Mouayni, I., Etienne, A., Dantan, J., & Lux, A. (2018). *Développement d'une méthode outillée pour l'amélioration des aspects santé-sécurité dès les premières phases de la conception des systèmes de production par la prise en compte des marges de manœuvre temporelles.* Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM.
- El Mouayni, I., Etienne, A., Lux, A., Siadat, A., & Dantan, J. (2020). A simulation-based approach for time allowances assessment during production system design with consideration of worker's fatigue , learning and reliability. *Computers & Industrial Engineering*, 139(January 2019), 105650. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.024>
- El Mouayni, I., Etienne, A., Siadat, A., Dantan, J., & Lux, A. (2016). A simulation-based approach for enhancing health aspects in production systems by integrating work margins. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1697-1702. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.826>
- Elmaraghy, W. H., Nada, O. A., & Elmaraghy, H. A. (2008). Quality prediction for reconfigurable manufacturing systems via human error modelling. *International*

Journal of Computer Integrated Manufacturing, 21(5), 584–598.
<https://doi.org/10.1080/09511920701233464>

- Foulloy, L., Clivillé, V., & Berrah, L. (2019). A fuzzy temporal approach to the Overall Equipment Effectiveness measurement. *Computers & Industrial Engineering*, 127(November 2018), 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.043>
- Fruggiero, F., Riemma, S., Ouazene, Y., Macchiaroli, R., & Guglielmi, V. (2016). Incorporating the Human Factor within Manufacturing Dynamics. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12), 1691–1696. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.825>
- Garre, P., Nikhil Bharadwaj, V. V. S., Shiva Shashank, P., Harish, M., & Sai Dheeraj, M. (2017). Applying lean in aerospace manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8439–8446. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.189>
- Gaudart, C., & Weill-Fassina, A. (1999). L'évolution des compétences au cours de la vie professionnelle : Une approche ergonomique. *Formation Emploi*, 67(1), 47–62. <https://doi.org/10.3406/forem.1999.2361>
- Geneste, L. (1995). *Outils d'aide à la décision pour le pilotage d'atelier*. Toulouse 3.
- Givi, Z. S., Jaber, M. Y., & Neumann, W. P. (2015). Modelling worker reliability with learning and fatigue. *Applied Mathematical Modelling*, 39(17), 5186–5199. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.03.038>
- Glover, F. W., & Kochenberger, G. A. (2006). *Handbook of metaheuristics* (Vol. 57). Springer Science & Business Media.
- Gopinath, S., & Freiheit, T. I. (2012). A waste relationship model and center point tracking metric for lean manufacturing systems. *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 44(2), 136–154. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2011.593609>
- Grosse, E. H., Calzavara, M., Glock, C. H., & Sgarbossa, F. (2017). Incorporating human factors into decision support models for production and logistics: current state of research. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 6900–6905. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.1214>
- Gupta, S., & Jain, S. K. (2013). A literature review of lean manufacturing. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 8(4), 241–249. <https://doi.org/10.1080/17509653.2013.825074>
- Heijden, B. I. J. M. Van Der, Peeters, M. C. W., Le, P. M., & Breukelen, J. W. M. Van. (2018). Job characteristics and experience as predictors of occupational turnover intention and occupational turnover in the European nursing sector. *Journal of Vocational Behavior*, 108(June), 108–120. <https://doi.org/10.1016/j.jvb.2018.06.008>
- Jaber, M. Y., Givi, Z. S., & Neumann, W. P. (2013). Incorporating human fatigue and recovery into the learning-forgetting process. *Applied Mathematical Modelling*, 37(12–13), 7287–7299. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.02.028>
- Kara, S., & Kayis, B. (2004). Manufacturing flexibility and variability: An overview. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 15(6), 466–478. <https://doi.org/10.1108/17410380410547870>
- Karlsson, C., & Åhlström, P. (1996). Assessing changes towards lean production. *International Journal of Operations & Production Management*, 16(2), 24–41. <https://doi.org/10.1108/01443579610109820>

- Kasperski, A., Kurpisz, A., & Zieliński, P. (2012). Approximating a two-machine flow shop scheduling under discrete scenario uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 217(1), 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.08.029>
- Khezri, A., Haddou Benderbal, H., Benyoucef, L., & Dolgui, A. (2020). Diagnosis on energy and sustainability of reconfigurable manufacturing system (RMS) design: A bi-level decomposition approach. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2020-Decem, 141–145. <https://doi.org/10.1109/IEEM45057.2020.9309742>
- Kolus, A., Wells, R., & Neumann, P. (2018). Production quality and human factors engineering: A systematic review and theoretical framework. *Applied Ergonomics*, 73(October 2017), 55–89. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2018.05.010>
- Koren, Y. (2010). *The global manufacturing revolution: product-process-business integration and reconfigurable systems* (Vol. 80). John Wiley & Sons.
- Kumar, A. A., Antoine, J. F., & Abba, G. (2020). Control of an underactuated 4 cable-driven parallel robot using modified input-output feedback linearization. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 8777–8782. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1380>
- Kumar, A. A., Antoine, J. F., & Abba, G. (2019). Input-Output Feedback Linearization for the Control of a 4 Cable-Driven Parallel Robot. *9th IFAC Conference MIM 2019*, 52(13), 707–712.
- Kumar, S. A., & Suresh, N. (2008). *Production and Operations Management* (Second). New Age International.
- Lanfranchi, J. B., & Duveau, A. (2008). Explicative models of musculoskeletal disorders (MSD): From biomechanical and psychosocial factors to clinical analysis of ergonomics. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée*, 58(4), 201–213. <https://doi.org/10.1016/j.erap.2008.09.004>
- Laperche, B., & Uzunidis, D. (2011). Responsabilité sociale et profit. *La Revue Des Sciences de Gestion*, 247–248(1), 111–120.
- Lehyani, F. (2020). *Impact de la gestion des connaissances et de la gestion de la qualité totale sur l'efficacité du personnel et sur la performance des chaînes logistiques* Fatma Lehyani To cite this version : HAL Id : tel-02887098 Préparée dans le cadre d'une cotutelle .
- Lehyani, F., Zouari, A., Ghorbel, A., & Tollenaere, M. (2021). Defining and Measuring Supply Chain Performance: A Systematic Literature Review. *EMJ - Engineering Management Journal*, 33(4), 283–313. <https://doi.org/10.1080/10429247.2020.1834309>
- Li, S. G., & Rong, Y. L. (2009). The reliable design of one-piece flow production system using fuzzy ant colony optimization. *Computers and Operations Research*, 36(5), 1656–1663. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2008.03.010>
- Liker, J. K. (2008). *Le modèle Toyota: 14 principes qui feront la réussite de votre entreprise*. Pearson Education France.
- Liu, B. S. (2007). Backpack load positioning and walking surface slope effects on physiological responses in infantry soldiers. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 37(9–10), 754–760. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2007.06.001>

- Low, S.-N., Chong, S.-H., Sim, H.-Y., Razalli, S., & Kamaruddin, S. (2014). Measurement of Overall Performance Effectiveness in Setup Improvement. *Journal of Industrial Engineering*, 2014, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2014/264980>
- Lu, Z., Cui, W., & Han, X. (2015). Integrated production and preventive maintenance scheduling for a single machine with failure uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 80, 236–244. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.12.017>
- Manotas Duque, D. F., & Cadavid, L. R. (2007). Lean Manufacturing Measurement: The Relationship Between Lean Activities and Lean Metrics. *Estudios Gerenciales*, 23(105), 69–83. [https://doi.org/10.1016/S0123-5923\(07\)70026-8](https://doi.org/10.1016/S0123-5923(07)70026-8)
- Martin, P., Baudouin, C., Daille-lefevre, B., Godot, X., Etienne, A., Siadat, A., & Marsot, J. (2012). *Prise en compte de la sécurité dès la conception du produit, expérience pédagogique*.
- Mirzapour Al-E-Hashem, S. M. J., Malekly, H., & Aryanezhad, M. B. (2011). A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 134(1), 28–42. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.01.027>
- Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., & Barbaray, R. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 56(3), 1118–1136. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1372647>
- Murray, S. L., & Thimgan, M. S. (2016). Chapter 6: Fatigue and human performance. In *Human Fatigue Risk Management: Improving Safety in the Chemical Processing Industry* (pp. 115–128). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802412-6/00006-6>
- Oswald, A. J., Proto, E., & Sgroi, D. (2012). Happiness and Productivity. *Journal of Labor Economics*, 33(4), 789–822. <https://doi.org/10.1086/681096>
- P., T., & F., K. (2013). The effectiveness of lean manufacturing audits in measuring operational performance improvements. *South African Journal of Industrial Engineering*, 24(August), 140–154. http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-78902013000200014&lang=pt
- Pakdil, F., & Leonard, K. M. (2014). Criteria for a lean organisation: Development of a lean assessment tool. *International Journal of Production Research*, 52(15), 4587–4607. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.879614>
- Patton, J. F., Kaszuba, J., Mello, R. P., & Reynolds, K. L. (1991). Physiological responses to prolonged treadmill walking with external loads. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 63(2), 89–93. <https://doi.org/10.1007/BF00235175>
- Petronijevic, J., Etienne, A., & Dantan, J. Y. (2019). Human factors under uncertainty: A manufacturing systems design using simulation-optimisation approach. *Computers and Industrial Engineering*, 127(June 2018), 665–676. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.001>
- Plenert, G. (2010). *Reinventing lean: introducing lean management into the supply chain*. Elsevier.
- Prasad, D., & Jayswal, S. C. (2018). Scheduling in reconfigurable manufacturing system

- for uncertainty in decision variables. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 18451–18458. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.186>
- Range, T. M., Kozlowski, D., & Petersen, N. C. (2019). Dynamic job assignment: A column generation approach with an application to surgery allocation. *European Journal of Operational Research*, 272(1), 78–93. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.06.014>
- Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., & Pellerin, R. (2020). Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1644–1661. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1672902>
- Sahinidis, N. V. (2004). Optimization under uncertainty: State-of-the-art and opportunities. *Computers and Chemical Engineering*, 28(6–7), 971–983. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.09.017>
- Salvendy, G. (2012). Handbook of Human Factors and Ergonomics: Fourth Edition. In G. Salvendy (Ed.), *Handbook of Human Factors and Ergonomics: Fourth Edition* (Fourth Edi). John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118131350>
- Series, L. N. (2012). *Global versus Local Search in Constrained Optimization of Computer Models Author (s): Matthias Schonlau , William J . Welch and Donald R . Jones Reviewed work (s): Source : Lecture Notes-Monograph Series , Vol . 34 , New Developments and Applications . 34(1998)*, 11–25.
- Singh, R., Shah, D. B., Gohil, A. M., & Shah, M. H. (2013). Overall Equipment Effectiveness (OEE) Calculation - Automation through Hardware & Software Development. *Procedia Engineering*, 51, 579–584. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.082>
- Stamatis, D. H. (2010). *The OEE Primer: Understanding Overall Equipment Effectiveness, Reliability, and Maintainability*.
- Stern, H., & Becker, T. (2017). Development of a Model for the Integration of Human Factors in Cyber-physical Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 9, 151–158. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.030>
- Stief, P., Dantan, J.-Y., Etienne, A., Siadat, A., & Burgat, G. (2020). Product design improvement by a new similarity-index-based approach in the context of reconfigurable assembly processes. *Journal of Engineering Design*, 31(6), 349–377. <https://doi.org/10.1080/09544828.2020.1748181>
- Taleb, I., Etienne, A., & Siadat, A. (2021). Production systems simulation considering non-productive times and human factors. In T. Masrour, A. Cherrafi, & I. El Hassani (Eds.), *Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 1193, pp. 161–172). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51186-9_11
- Taris, T. W., & Schreurs, P. J. G. (2009). Well-being and organizational performance: An organizational-level test of the happy-productive worker hypothesis. *Work & Stress*, 23(2), 120–136. <https://doi.org/10.1080/02678370903072555>
- Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). *Lean Thinking BANISH WASTE AND CREATE WEALTH IN YOUR CORPORATION*. 1, 67–90. <https://doi.org/10.1080/14767330701233988>
- Wood, J. C., & Wood, M. C. (2003). *Henry Ford: critical evaluations in business and*

management (Vol. 2). Taylor & Francis.

Wu, Z., Sun, S., & Xiao, S. (2018). Risk measure of job shop scheduling with random machine breakdowns. *Computers and Operations Research*, 99, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.05.022>

Xu, Z., Ko, J., Cochran, D. J., & Jung, M. C. (2012). Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models. *Computers and Industrial Engineering*, 62(2), 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.10.008>

II. Annexe 2

Modèles Définition-Mesure-Plan d'action pour les activités dans la taxonomie

Tableau 17. Pannes

Définition	Mesure	Plan d'actions
<p>Toute perte qui résulte d'une déperdition fonctionnelle ou la réduction de fonction d'une machine, demandant ainsi, une intervention de maintenance (corrective). Les pannes sont des conséquences des défaillances qui atteignent les machines et outillages.</p> <p>[adapté de (Stamatis, D. H. 2010)]</p>	<p>Le Lean offre un moyen de calculer les durées des pannes: MTTR (Mean Time to Recovery).</p> $MTTR = \frac{\sum Pannes(mins)}{\# de pannes}$ <p>Le temps moyen de récupération représente le temps moyen nécessaire pour réparer un composant ou une machine défaillants du moment de la panne jusqu'à sa mise en marche. Le MTTR se compose de plusieurs temps:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. De l'événement de panne à la notification 2. Temps de diagnostique 3. Temps de réparation 4. Temps de test 5. Temps de retour à la cadence normale 	<ul style="list-style-type: none"> • Réaliser des maintenances correctives • Mettre en place des rotations: l'opérateur i passe à une tâche dont la durée est supérieure à MTTR de la machine j • Mettre en place un stock de sécurité pour absorber cette nouvelle variation de cadence (et autres événements imprévus) (János K. et al. 2017) • Trouver le volume tampon idéal pour minimiser les coûts tout en gardant un stock de sécurité pour gérer les aléas et variations de production (Rossmeissl T. et al. 2019)

Tableau 18. Reconfigurations / Préparations / Réglages / Changements de série

Définition	Mesure	Plan d'actions
<p>Les réglages, reconfigurations, préparations et changements de séries sont des activités qui requiert l'arrêt total de la machine pour modifier ou ajuster des composants ou la machine, dans le but d'éviter les défauts et les pertes de rendement. Ces activités sont généralement effectuées par un opérateur, d'où l'intérêt de l'étude des temps non productifs (Stamatis, D. H. 2010).</p>	<ul style="list-style-type: none"> Chronométrer les durées des reconfigurations, préparations, réglages et changements de séries. Extrapolation / estimation des durées manquantes (ou futures) en se basant sur les données disponibles. 	<ul style="list-style-type: none"> Réaliser une méthode KAIZEN Catégoriser les activités intrinsèques et extrinsèques <ul style="list-style-type: none"> ➤ Activités intrinsèques: peuvent être réalisées seulement quand la machine est arrêtée ➤ Activités extrinsèques: peuvent être réalisées même lorsque la machine fonctionne Convertir les activités intrinsèques en activités extrinsèques (réduire le nombre de pièces à changer) Optimiser les activités intrinsèques (standardiser le process, par exemple) Documenter la procédure de changement de série

Tableau 19. Mouvements & Transport Inutiles

Définition	Mesure	Plan d'actions
<p>Le transport en lui-même n'ajoute pas de valeur au produit, et donc le temps passé à transporter les matières premières, travail en cours, produits entre les différentes tâches, ... compte en tant que temps non productifs (TnP) [adapté de (Stamatis, D. H. 2010)]</p>	<ul style="list-style-type: none"> Calculer les différents temps passés à transporter les produits t_i Calculer la moyenne des temps de transport: $\bar{T} = \frac{\sum t_i}{N}$ <p>Mesure du mouvement selon (Cortes H. et al. 2016):</p> $\bar{T} = \frac{T_m}{T}$ <p>Mesure des transports selon (Cortes H. et al. 2016):</p> $\bar{T} = \frac{F \times T_{tr}}{T}$ <p>Où: t_i est le temps de transport N est le nombre de transports effectué T_m Temps de transport total T Temps de travail total F fréquence d'utilisation des moyens de transport T_{tr} Durée du transport</p>	<ul style="list-style-type: none"> Installer des AGVs Améliorer l'agencement spatial de telle sorte à réduire les distances et ainsi réduire les durées Réaliser les tâches de mouvements & transports inutiles en temps masqués, lorsqu'une activité productive est en cours de réalisation

Tableau 20. Erreurs humaines

Définition	Mesure	Plan d'actions
<p>Selon la définition de l'erreur humaine utilisée dans l'ISO 14224: L'erreur humaine est toute contradiction entre l'action prise (ou omise) par l'humain et celle prévue.</p> <p>Selon (Wiegmann S.A. & Shappell S.A. 2000), les erreurs sont divisées sous 3 catégories: les erreurs liées à la décision, les erreurs liées à la compétence et les erreurs liées à la perception.</p>	<p>Mesurer l'erreur humaine n'est pas chose facile, il existe deux façons de mesurer l'erreur humaine:</p> <p>Premièrement, en mesurant l'écart du produit final par rapport aux standards mis en place. Cette méthode étant exigeante, des échantillons sont souvent utilisés en parallèle avec des modèles statistiques.</p> <p>Deuxièmement, en mesurant la fréquence de ces erreurs. Ceci peut être utilisé pour prédire les chances de commettre des erreurs dans le futur.</p> <p>(Givi et al., 2015) ont conçu un modèle pour prédire les probabilités de commettre une erreur humaine en fonction de la fatigue (modélisée par le nombre de pièces fabriquées):</p> $HEP = 10^{\log(0.5 \left(\frac{T_{ni}}{T_1} + \frac{F(t_i)}{0.99} \right))}$	<p>(Stamatis, D.H. 2010) stipule que des dysfonctionnement du systèmes sont à la base des erreurs humaines. Il faut ainsi utiliser une analyse de cause racine pour trouver ces problèmes.</p> <p>Implémenter des Poka-Yoké est un moyen simple d'éviter les erreurs humaines dues à l'inattention (Saurin T. et al. 2012).</p>

Tableau 21. Absentéisme

Définition	Mesure	Plan d'actions
<p>L'absentéisme est le terme utilisé pour décrire l'absence chronique ou habituel dans les lieux de travail. Il est souvent non planifié d'où sa sévérité. Il peut ainsi être la source de plusieurs problèmes de productivité du système de production. L'absentéisme est généralement groupé en deux catégories: l'absence excusée et l'absence non-excusee.</p>	<p>La formule pour mesurer l'absentéisme est simple: Le taux d'absentéisme est égale au nombre d'heures d'absence sur le nombre d'heures théoriques de travail.</p> <p>Pour prédire l'absence, il existe des modèles qui utilisent la régression de Poisson ou la méthode des moindres carrés. (Sturman M.C. 1996) a trouvé que cette dernière est plus précise et retourne moins de faux positifs que la première méthode.</p>	<p>(Stamatis D. 2010) a trouvé que la loi de Pareto s'applique au phénomène d'absentéisme: un pourcentage inférieur à 20% des opérateurs est la cause de 80% des absences.</p> <p>L'amélioration des conditions de travail, le sens d'appartenance et de communauté, ainsi que les opportunités de croissance et de développement réduisent les chances d'absentéisme.</p>

Tableau 22. Attentes

Définition	Mesure	Plan d'actions
<p>(Stamatis D. 2010) catégorise les attentes selon deux logiques complémentaires:</p> <p>1) Selon la disponibilité de l'opérateur ou la machine: si l'un des deux est indisponible, alors une attente est obligatoire.</p> <p>2) Selon le flux d'information et de matière dans le système de production: dans ce cas l'attente est un résultat soit d'un blocage de flux (en aval), ou bien d'une coupure (en amont).</p> <p>Pendant ce temps d'attente, le produit est en train de gagner en coût et perdre en valeur (Stamatis D. 2010).</p> <p>Selon le même auteur, ce temps d'attente ne peut être amélioré qu'en traitant la ligne de production en entier.</p>	<p>(Cortes H. et al. 2016) identifient 4 types d'attentes et les façons de les mesurer:</p> <ul style="list-style-type: none"> Attente client : $W_c = \frac{T_w}{T}$ Attente en cours : $W_{WIP} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N WQ_i}$ Attente machine : $W_m = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n T_{Ri}}{nT}$ Attente opérateur : $W_o = 1 - \left(\frac{T_w + T_m}{T}\right)$ <p>Où: T_w Temps d'inactivité T Temps total N Nombre de produits dans la file WQ_i temps d'attente du ième produit dans la file T_{Ri} Temps opératoire du ième process n Nombre de machines, de tampons ou d'opérateurs T_m Temps passé en mouvement</p>	<p>Le but de la thèse est de mettre en place des actions pour réduire et exploiter les Temps non Productifs (attentes incluses) en se basant sur les variations de cadence, les facteurs humains et autres paramètres du système de production.</p>

Tableau 23. Maintenances Préventives

Définition	Mesure	Plan d'actions
<p>Les maintenances préventives sont des maintenances planifiées de façon régulière (en fonction du temps), conditionnelle (en fonction de capteurs) ou prévisionnelle (en fonction de prévisions statistiques).</p> <p>Les maintenances préventives sont beaucoup moins coûteuses que les maintenances correctives, pour plusieurs raisons, entre autres : elles sont souvent programmées pour être effectuées en dehors des horaires de fonctionnement du système de production et elles permettent d'améliorer la productivité en anticipant les pannes et les fixer avant qu'elles se déclenchent (Stamatis D. 2010).</p>	<p>Chronométrer les durées des maintenances préventives.</p> <p>Extrapoler / estimer les durées manquantes (ou futures) en se basant sur les données disponibles.</p>	<p>Les maintenances préventives peuvent être coûteuses, le but est de les balancer avec le risque de pannes. La fréquence des maintenances préventives et la probabilité de tomber en panne peut être balancées pour minimiser les coûts de fabrication (Salvendy G. 2012)</p>

Tableau 24. Pauses planifiées

Définition	Mesure	Plan d'actions
<p>Les pauses sont des moments de courte à moyenne durée, placées de manière stratégique à des moments où l'opérateur a besoin de se reposer à cause d'une fatigue qui excède le seuil maximal.</p> <p>Selon (Kroemer K.H.E. & Grandjean E. 1997), il existe 4 types de pauses:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Pauses spontanées • Pauses programmées • Pauses déguisées / masquées (rotations) 	<p>Les pauses spontanées sont prises au fur et à mesure du travail par l'opérateur. Une limite supérieure peut être calculée.</p> <p>Les pauses programmées sont calculées en fonction du type de travail.</p> <p>Les rotations peuvent être mises en place après étude des différents travaux de la ligne de production (ou de l'usine en entier).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • A l'aide de l'outil développé, réaliser plusieurs scénarii avec plusieurs stratégies de pauses différentes pour comparer l'évolution des conditions de travail (des facteurs humains) ainsi que les performances industrielles. • Un minimum de pauses programmées doit être présent. • Un minimum d'indépendance doit être offert via la possibilité des pauses spontanées • Pour améliorer la productivité, privilégier les pauses masquées.

Tableau 25. Formations & Réunions

Définition	Mesure	Plan d'actions
<p>Les formations permettent aux opérateurs d'améliorer leurs performances et leur productivité, mais peuvent être coûteuses en terme d'argent et de temps.</p> <p>Dans la littérature, les formations de type « cross-training » prouvent être les meilleures en termes d'amélioration des compétences de manière flexible, ainsi améliorer la productivité (surtout dans les agencements de type cellulaire).</p> <p>Le « cross-training », qui permet de former les opérateurs sur plusieurs types de travail, peut être complété par les rotations, permettant ainsi à l'opérateur d'être plus flexible.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Durée de formations. • Ratio: formation / gain de productivité (nombre de pièces, par exemple). • Compétences acquises par l'opérateur (test de compétences) 	<p>Les formations de types « cross-training » permettent de réaliser des rotations de postes (en fonction de la demande, charge, ...etc.)</p> <p>Elles permettent aussi d'avoir plus de flexibilité pour les opérateurs dans les différents postes de la ligne de production.</p> <p>L'auto-apprentissage facilite d'avantage l'amélioration des compétences existantes, et l'acquisition de nouvelles (Eija K. et al. 2019).</p> <p>Les mêmes auteurs suggèrent des formations modulaires. Des formations de courtes durées (vidéos, par exemple) qui sont remises aux opérateurs selon leur niveau de compétence. L'opérateur peut ainsi utiliser sa subjectivité pour décider de quand et où s'entraîner avec ces modules. Le partage de connaissances peut aussi être encouragé. En effet, les opérateurs peuvent participer à la création de ces modules de formation pour ensuite les partager avec les opérateurs qui en ont besoin.</p>

Tableau 26. Cadence : Micro-arrêts / Sous-charge / Surtraitement / Surproduction

Définition	Mesure	Plan d'actions
<p>Une baisse de cadence est toute différence (négative) entre le temps de cycle idéal/théorique et le temps de cycle réel, et il peut être identifié par (Stamatis D. 2010):</p> <ul style="list-style-type: none"> Le surtraitement, selon le Lean, se définit par la réalisation de processus de production (fabrication, assemblage, ...) en utilisant des méthodes, des outils ou des techniques non appropriés, surdimensionnés ou inefficaces (Papetti A. et al. 2019). La surproduction peut se traduire selon 2 logiques, surproduction en terme de volume ou en terme de cadence. Les micro-arrêts et les sous-charges peuvent être comparés à des pauses non planifiées de très petites durées (en secondes). 	<p>La surproduction peut se mesurer en inventaire: Le taux de produits en stock pendant une durée supérieure à X. Le taux de produits obsolètes / détériorés / périmés.</p> <p>Le surtraitement peut être mesuré en mesurant les processus de fabrication et en éliminant les étapes inutiles.</p> <p>Surproduction (Cortes H. et al. 2016):</p> $\frac{1}{T} \int_0^T IF dt$ <p>Avec: IF Inventaire des produits finis T Temps total de travail</p>	<p>En ce qui concerne le surtraitement, un choix plus judicieux de machines, méthodes et techniques permet, selon (Papetti A. et al. 2019), de réduire les gaspillages et les TnP causés par le surtraitement. Une mise à jour des équipements obsolètes et la mise en place de dispositifs Poka-Yoké permet d'améliorer les performances.</p> <p>Pour la surproduction, les mêmes auteurs suggèrent d'améliorer la planification de la production ainsi que de mettre en place un système de production à flux tiré (kanban) pour produire selon la demande.</p>

Tableau 27. Organisation : Agencement atelier

Définition	Mesure	Plan d'actions
<p>L'agencement de l'atelier désigne la répartition spatiale des machines au sein du milieu de travail. Selon cette répartition, la productivité peut être accrue ou ralentie (Besbes M. et al. 2017).</p> <p>L'agencement de l'atelier est la façon dont est arrangé tout ce qui est nécessaire à la production ou à la prestation de services (Besbes M. et al. 2017).</p> <p><small>R_L est le taux de production T_W est la durée de production (production + maintenance + transportation) T_T est le temps total de travail</small></p>	<p>Distances parcourues (par opérateur / par jour).</p> <p>Distances entre les postes.</p> <p>Densité des opérateurs par m².</p> <p>(Garbie et al. 2008) utilisent les moyens d'évaluation suivants pour déterminer la qualité de l'agencement de l'atelier :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Niveau d'agilité de l'opérateur / flexibilité du système de production -Niveau d'accessibilité : Manutention & chemin. -Taux d'utilisation de la zone de production $R_L = \frac{T_W}{T_T} * 100\%$ <ul style="list-style-type: none"> -Taux d'utilisation de la zone de stockage -Considération de l'aspect sécurité 	<p>Éviter les mouvements inutiles (standardiser les processus).</p> <p>5S.</p> <p>Contrôles visuels réguliers pour identifier, réparer et éviter les TnP suites aux gaspillages.</p> <p>(Besbes M. et al. 2017) utilisent une méthode de hiérarchie multicritère ainsi qu'une TOPSIS (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) pour trouver l'agencement idéal selon plusieurs critères.</p>

Tableau 28. Organisation : Pratiques & éthique de travail (Partage d'outils, ...)

Définition	Mesure	Plan d'actions
<p>L'éthique de travail est définie en tant qu'un ensemble de convictions et attitudes envers la valeur fondamentale du travail (Meriac J.P. et al. 2015). Les différentes pratiques des opérateurs dans un milieu de travail influence leur productivité (Forquesato P. 2016). Parmi les méthodes d'éthique de travail considérés, le partage d'outils a été identifié en cohérence avec le sujet étudié.</p>	<p>Nombre d'outils par opérateur Nombre de doublons d'outils par opérateur Nombre de pauses spontanées prises Durée de pauses spontanées prises</p>	<p>Le 5S est une méthodologie souvent utilisée pour organiser l'espace de travail (partagé). Selon (Stamatis D. 2010), une matrice/un étau de serrage améliore la cadence, car il élimine la prise de décision lors du choix d'outils. L'auteur a aussi trouvé qu'avoir une multitude d'outils similaires pour chaque opérateur améliore la cadence de production.</p>

Tableau 29. Organisation : Potentiel non exploité

Définition	Mesure	Plan d'actions
<p>Selon (Andrés-lópez E. et al. 2015) le potentiel non exploité fait partie de la catégorie des ressources sous-utilisées. Un potentiel non exploité, est ainsi tout gaspillage de talents, compétences et connaissances de l'opérateur, soit au niveau pratique ou au niveau créatif (de connaissances). L'inadéquation des compétences (Skills mismatch) est définie par l'écart entre les compétences individuelles de l'opérateur pour un travail donné et la demande du marché par rapport à ce même travail (Wolbers H. 2003). Il existe plusieurs catégories d'études des potentiels non exploités:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Niveau supérieur ou inférieur relatif au travail. • Domaine d'étude différent relativement à la demande. 	<p>Nombre d'idées d'amélioration partagées par les opérateurs. % de ces idées qui parvient à monter. % de ces idées qui parvient à être implémenté.</p>	<p>Avoir une meilleure vision des opérateurs en termes de leurs compétences, talents et connaissances: Ce qui permet de mieux placer les opérateurs au sein de l'entreprise, et d'éviter les postes surqualifiés ou sous-qualifiés. Permettre aux opérateurs d'avoir plus de responsabilités, plus de flexibilité et plus de marges de manœuvres.</p>

Tableau 30. Facteurs humains : Fatigue-Repos / Oubli-Apprentissage / Erreur humaine

Définition	Mesure	Plan d'actions
<p>À la base, les facteurs humains étaient utilisés dans le domaine de l'ergonomie pour étudier les manières de maximiser la sûreté et la sécurité au travail en étudiant la conception et l'ergonomie des machines, l'utilisation des outils, ...etc.</p> <p>Pendant les dernières années, les facteurs humains sont utilisés pour étudier les relations homme-système, dans le but d'améliorer les conditions de travail des opérateurs, les performances du système et ainsi la rentabilité de la production (Kolus A. et al. 2017).</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fatigue (Jaber et al., 2013): $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ • Repos (Jaber et al., 2013): $R(\tau_i) = F(t)e^{-\mu\tau_i}$ • Apprentissage/Expérience & Oubli (Jaber et al., 2013): $T_{n_i} = T_1(u_i + n_i)^{-b}$ • Erreur humaine (Givi et al., 2015): $HEP = 10^{\log(0.5(\frac{T_{n_i} + F(t_i)}{T_1 + 0.99}))}$ 	<p>(Neumann P. et al. 2016) ont trouvé que la fatigue est liée à 46% des facteurs de risque qui touchent la qualité.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Limiter la fatigue avec un seuil maximal (Salvendy G. 2012). • À vérifier: Diviser la fatigue suivant chaque membre du corps & physique / cognitive. • Permettre à l'opérateur d'utiliser des marges de manœuvres pour se reposer de manière spontanée (El Mouayni I. et al. 2018). • Trouver le volume tampon idéal pour minimiser les coûts tout en gardant un stock de sécurité pour gérer les aléas et variations de production (Rossmeissl T. et al. 2019)

Tableau 31. Qualité : Rebuts & Retouches

Définition	Mesure	Plan d'actions
<p>Les rebuts et les retouches sont des sources de grandes pertes de productivité. Chaque produit qui contient un ou plusieurs défauts devient automatiquement un rebut ou a besoin de retouches pour être remis dans le marché (Gupta V. et al. 2018).</p> <p>Si le produit est rebuté, tout le temps passé à le produire est alors sans valeur ajoutée. Cependant, si le produit est retouché, il regagne sa valeur. Le temps passé à le produire est alors mal Productif (TmP), car il est supérieure au temps nominal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de rebuts T_{rb} $T_{rb} = \sum_{\forall process} \frac{S_i}{P}$ • Taux de retouches T_{rt} $T_{rt} = \sum_{\forall process} \frac{R_i}{P}$ • Échantillonnages 	<p>(Papetti A. et al. 2019) suggèrent de mettre en place un programme TQM avec des systèmes Poka-Yoké pour éviter les erreurs qui conduisent aux rebuts et retouches. Mettre en place une méthode 6 sigma pour mieux gérer la qualité. Et enfin, ajouter des indicateurs de gestion visuels tels que l'Andon.</p>

III. Annexe 3

Menu / interface utilisateur : choix des scénarii, stratégies et données d'entrée

Choix de situation
 Avant toute simulation: Vérifier la répartition opérateurs-machines

- Situation originale (nombre d'opérateurs = nombre de machines)
- Stratégie #1: opé < st & flexible & critère de distance
- Stratégie #2: rigide en îlots + changement de série
- Stratégie #3: 6 pauses
- Stratégie #4: 2 produits + changement de série

	min	value	max
Nombre d'opérateurs	----- -----		-----
Nombre de machines	----- -----		-----
Takt Time (s)	----- -----		-----
MTBF (min)	----- -----		-----
Durée de défaillance (sec)	----- -----		-----
Distance maxi par déplacement (m)	----- -----		-----
Durée 1ère pause (matin)	----- -----		-----
Durée 2ème pause (midi)	----- -----		-----
Durée 3ème pause (après-midi)	----- -----		-----
Taux de fatigue λ	----- -----		-----
Taux de récupération μ	----- -----		-----
Sueil de fatigue maximale	----- -----		-----
Taux d'apprentissage b	----- -----		-----
Temps d'oubli total D (mois)	----- -----		-----
Vitesse de marche	----- -----		-----
Durée de changement de série (min)	----- -----		-----
Stock 1ères machines	----- -----		-----
Stock autres machines	----- -----		-----

Durées de pause additionnelles (Stratégie #3)

Durée pause additionnelle 1	----- -----
Durée pause additionnelle 2	----- -----
Durée pause additionnelle 3	----- -----

V. Annexe 5

Présentation en barres pour les résultats du 2^{ème} cas d'étude

Scénario	TP machine		TNP Attente machine		TP opérateurs		TNP Attente opérateurs		TNP Manque Ressources		Production par opérateur		Production par machine		TNP Contrôle P1		Production finale	
	0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		P2	P3
Scénario Initial (1op=1machine)	0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%	
Scénario 2 (6o o2m2+3 & o3m8)	-1,93%	6,54%	4,72%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	91,77%	17,89%	10,45%	12,90%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-13,26%	0,00%
Scénario 2 (6o o6m6+7)	-3,58%	5,41%	5,41%	-8,26%	-0,50%	-0,50%	-0,50%	-0,50%	764,15%	0,15%	-6,00%	17,39%	17,39%	17,39%	17,39%	17,39%	-13,26%	13,26%
Scénario 2 (8o o4m4+7)	-0,37%	11,17%	6,59%	6,59%	-1,55%	-1,55%	-1,55%	-1,55%	435,97%	24,99%	6,91%	15,88%	15,88%	15,88%	15,88%	15,88%	1,66%	1,66%
Scénario 2 (8o o1m1+7)	-1,13%	3,91%	3,91%	-3,37%	-0,59%	-0,59%	-0,59%	-0,59%	256,32%	19,43%	-0,96%	10,31%	10,31%	10,31%	10,31%	10,31%	4,97%	4,97%
Scénario 2 (8o o0m0+7)	2,62%	8,88%	8,88%	-7,04%	-0,36%	-0,36%	-0,36%	-0,36%	404,14%	28,77%	-5,09%	8,62%	8,62%	8,62%	8,62%	8,62%	14,36%	14,36%
Scénario 2 (8o o5m5+7)	-3,72%	2,80%	2,80%	2,83%	0,16%	0,16%	0,16%	0,16%	364,08%	22,45%	3,61%	12,23%	12,23%	12,23%	12,23%	12,23%	-4,97%	-4,97%
Scénario 2 (8o o3m3+4)	2,60%	7,48%	7,48%	7,37%	0,16%	0,16%	0,16%	0,16%	22,35%	15,09%	-7,79%	16,12%	16,12%	16,12%	16,12%	16,12%	-14,36%	-14,36%
Scénario 2 (8o o0m0+5)	-2,45%	13,67%	13,67%	13,87%	0,20%	0,20%	0,20%	0,20%	253,85%	38,75%	1,58%	7,33%	7,33%	7,33%	7,33%	7,33%	3,31%	3,31%
Scénario 2 (8o o0m0+6)	-0,78%	18,36%	18,36%	18,36%	-0,45%	-0,45%	-0,45%	-0,45%	332,11%	113,22%	-4,16%	12,64%	12,64%	12,64%	12,64%	12,64%	-11,11%	-11,11%
Scénario 2 (8o o1m1+6)	-2,72%	2,82%	2,82%	12,98%	-1,15%	-1,15%	-1,15%	-1,15%	514,24%	48,64%	-1,91%	4,88%	4,88%	4,88%	4,88%	4,88%	1,41%	1,41%
Scénario 2 (8o o1m1+2)	-0,51%	6,37%	6,37%	12,98%	-1,26%	-1,26%	-1,26%	-1,26%	410,59%	31,21%	1,10%	7,61%	7,61%	7,61%	7,61%	7,61%	-2,62%	-2,62%
Scénario 2 (8o o1m1+4)	-1,02%	6,86%	6,86%	14,18%	-1,51%	-1,51%	-1,51%	-1,51%	229,61%	22,22%	2,15%	6,64%	6,64%	6,64%	6,64%	6,64%	0,27%	0,27%
Scénario 3 (7o o1m1+4 o2m2+3)	-2,75%	16,59%	16,59%	20,31%	-2,04%	-2,04%	-2,04%	-2,04%	332,80%	50,32%	1,58%	19,39%	19,39%	19,39%	19,39%	19,39%	-6,75%	-6,75%
Scénario 3 (7o o6m6+7 o2m2+3)	-0,54%	13,46%	13,46%	6,79%	-0,97%	-0,97%	-0,97%	-0,97%	293,91%	23,76%	-9,09%	30,93%	30,93%	30,93%	30,93%	30,93%	-11,35%	-11,35%
Scénario 3 (7o o6m6+7 o2m2+3)	-1,78%	16,75%	16,75%	15,26%	-1,22%	-1,22%	-1,22%	-1,22%	232,87%	45,70%	-2,81%	28,34%	28,34%	28,34%	28,34%	28,34%	8,32%	8,32%
Scénario 3 (7o o0m0+7 o3m3+4)	-2,93%	24,26%	24,26%	30,13%	-2,20%	-2,20%	-2,20%	-2,20%	223,96%	73,70%	9,97%	25,15%	25,15%	25,15%	25,15%	25,15%	0,28%	0,28%
Scénario 4 (6o o0m0+6+7 o2m2+3)	-6,68%	40,33%	40,33%	95,94%	-4,99%	-4,99%	-4,99%	-4,99%	860,20%	240,62%	-3,71%	47,44%	47,44%	47,44%	47,44%	47,44%	-9,17%	-9,17%
Scénario 4 (6o o0m0+6+7 o3m3+4)	-6,45%	33,30%	33,30%	77,97%	-5,7%	-5,7%	-5,7%	-5,7%	334,03%	217,97%	-6,43%	36,67%	36,67%	36,67%	36,67%	36,67%	-15,26%	-15,26%
Scénario 4 (6o o0m0+7 o3m3+4 o5m5+6)	-2,15%	22,93%	22,93%	37,48%	-5,46%	-5,46%	-5,46%	-5,46%	103,90%	125,81%	-2,48%	32,35%	32,35%	32,35%	32,35%	32,35%	-9,38%	-9,38%
Scénario 4 (6o o0m0+7 o1m1+2 o4m3+4)	-3,03%	19,18%	19,18%	70,83%	-4,32%	-4,32%	-4,32%	-4,32%	134,96%	209,95%	-7,99%	28,53%	28,53%	28,53%	28,53%	28,53%	-8,98%	-8,98%
Scénario 4 (6o o0m0+7+1 o2m2+4)	-3,03%	30,38%	30,38%	70,62%	-4,41%	-4,41%	-4,41%	-4,41%	50,65%	151,17%	-2,79%	46,21%	46,21%	46,21%	46,21%	46,21%	-9,54%	-9,54%
Scénario 4 (6o o0m0+7+1 o2m2+3)	-3,03%	31,18%	31,18%	78,47%	-4,38%	-4,38%	-4,38%	-4,38%	193,59%	188,43%	-5,30%	45,23%	45,23%	45,23%	45,23%	45,23%	10,72%	10,72%
Scénario 5 (6o o0m0+7+1 o2m2+3) + robo	-8,13%	6,65%	6,65%	27,54%	-5,18%	-5,18%	-5,18%	-5,18%	595,35%	128,61%	-14,25%	32,82%	32,82%	32,82%	32,82%	32,82%	-13,74%	-13,74%
Scénario 4 (6o o0m0+7+1 o2m2+4) + robo	-11,43%	5,99%	5,99%	29,35%	-8,84%	-8,84%	-8,84%	-8,84%	841,49%	115,90%	-8,40%	33,00%	33,00%	33,00%	33,00%	33,00%	-1,82%	-1,82%
Scénario 4 (6o o0m0+7 o3m3+4 o5m5+6) + robo	-16,92%	3,91%	3,91%	1,09%	-9,44%	-9,44%	-9,44%	-9,44%	1980,07%	84,85%	-7,41%	26,37%	26,37%	26,37%	26,37%	26,37%	-0,15%	-0,15%
Scénario 3 (7o o6m6+7 o2m2+3) + robo	-19,50%	-8,32%	-8,32%	-20,13%	-2,34%	-2,34%	-2,34%	-2,34%	2183,59%	2,88%	-7,66%	18,25%	18,25%	18,25%	18,25%	18,25%	-1,13%	-1,13%
Scénario 2 (8o o0m0+7) + robo	-10,23%	-7,16%	-7,16%	-31,97%	-10,23%	-10,23%	-10,23%	-10,23%	1174,83%	3,94%	4,27%	-4,51%	-4,51%	-4,51%	-4,51%	-4,51%	26,03%	26,03%
Scénario 6 o0m1+2+3+4 + robo 2+3	-4,03%	12,38%	12,38%	39,93%	-2,22%	-2,22%	-2,22%	-2,22%	-56,84%	96,78%	-18,47%	37,46%	37,46%	37,46%	37,46%	37,46%	-13,90%	-13,90%
Scénario 6 (6o o0m1+2+3+4 + robo 2+3)	-8,28%	3,30%	3,30%	24,50%	-1,22%	-1,22%	-1,22%	-1,22%	481,55%	75,50%	-18,95%	17,14%	17,14%	17,14%	17,14%	17,14%	-14,13%	-14,13%



Ismail TALEB



Identification et évaluation des temps non productifs par la simulation de systèmes de production pour améliorer la productivité et les conditions de travail



Résumé

Pendant des décennies, l'objectif principal des industries est de maximiser les profits. Dernièrement, les industries s'intéressent également aux conditions de travail des opérateurs. De nouvelles approches ont émergé dans le but d'offrir des meilleures conditions de travail aux opérateurs pour maximiser les profits. En effet, ces approches stipulent qu'un travailleur épanoui est beaucoup plus productif, ce qui génère une situation « gagnant-gagnant ». Cependant, l'adoption de ces approches rencontre des obstacles. C'est pour cette raison qu'une approche en simulation est suggérée. Grâce à la simulation, un jumeau numérique peut être modélisé pour étudier l'impact de l'implémentation de ces approches sur le système de production avant de l'implémenter dans le système réel. Le modèle développé prend en compte la productivité et les conditions de travail en plus de différents paramètres du système de production. L'une des contributions de cette thèse est la représentation de la productivité. En effet, une nouvelle définition des temps non productifs est suggérée, elle prend en compte des aspects du Lean ainsi que des paramètres de systèmes de production. Les conditions de travail sont représentées par les facteurs humains qui sont répartis selon 3 catégories principales : la fatigue et le repos, l'apprentissage et l'oubli et l'erreur humaine. Un outil numérique est ensuite développé en utilisant ce modèle dans le but de simplifier l'utilisation pour l'industriel et suggérer une aide à la décision. L'outil permet de générer des résultats selon les données d'entrée du système de production et des opérateurs. L'aide à la décision prend la forme de plusieurs scénarii et la robustesse de ces solutions est étudiée. Enfin, l'outil est évalué dans des cas d'étude réels réalisés avec des partenaires industriels.

Résumé en anglais

For decades, the main objective of industries have been to maximize profits. Lately, industries are also concerned with the working conditions of operators. New approaches have emerged to provide better working conditions for operators to maximize profits. Indeed, these approaches stipulate that a fulfilled worker is much more productive than an unfulfilled one, which generates a "win-win" situation for the worker and the company. However, there are obstacles to adopting these approaches. For this reason, a simulation approach is suggested. Through simulation, a digital twin can be modeled to study the impact of the implementation of these approaches on the production system before implementing it in the real system. The developed model takes into account productivity and working conditions in addition to different parameters of the production system. One of the contributions of this thesis is the representation of productivity. Indeed, a new definition of non-productive times is suggested, it takes into account aspects of Lean as well as parameters of production systems. The working conditions are represented by human factors which are divided into 3 main categories: fatigue and rest, learning and forgetting and human error. A numerical tool is then developed using this model in order to simplify the use for the industrial partner and to support his decision making. The tool allows to generate results according to the input data of the production system and the operators. The decision aid takes the form of several scenarios, and the robustness of these solutions is studied. Finally, the tool is evaluated in real study cases which are carried out with industrial partners.