



Prise en Compte de la Fatigue des Opérateurs dans la Modélisation et la Simulation des Systèmes de Production

Aicha Ferjani

► To cite this version:

Aicha Ferjani. Prise en Compte de la Fatigue des Opérateurs dans la Modélisation et la Simulation des Systèmes de Production. Modélisation et simulation. Université Clermont Auvergne; Université de Sfax (Tunisie), 2019. Français. NNT : . tel-02075961

HAL Id: tel-02075961

<https://hal.science/tel-02075961>

Submitted on 21 Mar 2019

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.

**UNIVERSITÉ CLERMONT
AUVERGNE
ECOLE DOCTORALE
SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE
CLERMONT-FERRAND**

ET

**UNIVERSITÉ DE SFAX
ECOLE DOCTORALE
SCIENCES ECONOMIQUES,
GESTION ET INFORMATIQUE
DE SFAX**

THÈSE EN COTUTELLE

Présentée par

Aicha FERJANI

En vue de l'obtention du grade de

Docteur d'Université

Spécialité :

**INFORMATIQUE
ET
SCIENCES DE GESTION-LOGISTIQUE ET PRODUCTION**

Prise en Compte de la Fatigue des Opérateurs dans la Modélisation et la Simulation des Systèmes de Production

Soutenue publiquement le 22 février 2019 devant le jury :

Président :

Rapporteurs :

**M. Abdelaziz BOURAS
M. Nasser MEBARKI**

**Professeur à l'Université du Qatar, Qatar
Maître de conférences HDR à l'IUT de Nantes,
France**

Examineurs :

**M. Denis GIEN
Mme. Gülgün ALPAN**

**Professeur à SIGMA Clermont, France
Maître de conférences HDR à l'Université de
Grenoble, France**

Invité :

M. Fabien COUTAREL

**Maître de conférences à l'Université Clermont
Auvergne, France**

**Directeurs de
thèse :**

M. Ahmed FRIKHA

Professeur à l'ISGI de Sfax, Tunisie

M. Henri PIERREVAL

Professeur à SIGMA Clermont, France

Résumé

Le développement rapide des technologies de l'information dans l'usine du futur nécessite de repenser l'organisation des systèmes de production. Si l'importance des opérateurs est bien reconnue dans l'industrie 4.0, les facteurs humains restent cependant insuffisamment pris en considération dans les méthodes d'organisation. La simulation est parmi les méthodes largement utilisées pour étudier les systèmes de production et évaluer leurs performances. Toutefois, les approches de simulation existantes et les logiciels disponibles sont centrés sur les dimensions techniques de ces systèmes (machines, transport, règles de priorité, etc.). Malheureusement, les facteurs humains, particulièrement la fatigue des opérateurs, semble être très insuffisamment pris en compte dans les modèles de simulation.

Dans ce contexte, la présente thèse vise à étudier dans quelle mesure la fatigue pourrait être intégrée dans les modèles de simulation des ateliers de production. Un cadre conceptuel combinant différents paradigmes de modélisation est ainsi proposé pour aider à concevoir de tels modèles. Le paradigme de simulation à événements discrets est utilisé pour décrire la dynamique de fonctionnement des ateliers. Le paradigme d'agent intelligent est utilisé pour modéliser les opérateurs et intégrer leur comportement de fatigue que nous avons modélisé en utilisant la simulation continue. Nous avons également utilisé la logique floue pour caractériser les facteurs de pénibilité, connus de façon imprécise, et leur impact sur l'évolution de la fatigue. Nous avons montré comment le cadre conceptuel proposé peut être mis en œuvre de façon assez générique avec le logiciel Anylogic.

L'approche proposée a ensuite été utilisée pour aborder deux différents problèmes de production : le premier concerne l'affectation dynamique des opérateurs sur les machines et le deuxième est relatif à l'agencement de machines lors de la phase de conception des ateliers. Ceci nous a permis d'illustrer l'utilité de l'approche proposée et montrer sa pertinence. L'analyse des résultats de simulation permet d'apporter des connaissances à la fois sur les performances des systèmes et sur les tendances d'évolution de la fatigue des opérateurs durant le travail. De tels résultats aident à réfléchir sur la façon dont laquelle nous pourrions améliorer les méthodes d'organisation et de gestion des ateliers pour contribuer à l'amélioration de leurs performances et au bien-être de leurs opérateurs.

Mots-clés : Simulation combinée, Modélisation, Systèmes de production, Fatigue des opérateurs, Bien-être au travail, Cadre conceptuel, Agent intelligent, Pénibilité, Logique floue, Affectation des opérateurs, Implantation des machines.

Abstract

The quick development of information technology in the factory of the future requires rethinking about the organization of production systems. Although the importance of the workers in the industry 4.0, human factors are still insufficiently taken into consideration in the organizational methods. Simulation is among the methods widely used to study production systems and evaluate their performances. However, the existing simulation approaches and the available softwares mainly focus on technical dimensions of these systems (machines, transport, priority rules etc.). Unfortunately, human factors, particularly workers' fatigue, seem to be very insufficiently taken into account in the simulation models.

In this context, this thesis aims to study how the workers' fatigue could be integrated into the simulation models of workshops. A framework combining different modelling paradigms is proposed to help in designing such models. Discrete event simulation is used to describe the dynamic of the working process in workshops. The paradigm of intelligent agent is used to model operators and integrate their behavior of fatigue, which has been modeled using continuous simulation paradigms. We have also used fuzzy logic in order to characterize the arduousness's factors, known imprecisely, and impacts on the evolution of the workers' fatigue. We have shown how the proposed framework can be implemented can be implemented generically enough with the software ANYLOGIC.

The proposed approach has been then used to address two different production problems : the first one concerns the dynamic assignment of workers to machines

and the second is related to the machines layout in the design stage of the system. This illustrated the utility of the proposed approach and showed its relevance. The analysis of the simulation results yields some knowledge on both the performance of the systems and on trends of the evolution the operators' fatigue during the work. Such results help to think on how to improve the methods of organization and management of the workshops so to contribute to the improvement of their performances and the well-being of their operators.

Keywords : Combined Simulation, Modelling, Production systems, Workers' fatigue, Well-being at work, Framework, Intelligent agent, Arduousness, Fuzzy logic, Assignment of workers, Machines layout.

Remerciements

Ce manuscrit est l'aboutissement des années de travail et n'aurait pas pu être réalisé sans l'aide de plusieurs personnes (il est impossible de les citer toutes!). Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation.

Avant tout, je remercie vivement Monsieur Henri Pierreval, Professeur à SIGMA Clermont, pour avoir encadré mon travail et m'avoir bien accueilli dans son équipe. Ses précieux conseils ainsi que ses remarques constructives ont été un atout majeur. Qu'il trouve ici l'expression de toute ma gratitude pour le temps considérable qu'il a consacré pour discuter sur notre sujet.

Je tiens également à remercier Monsieur Ahmed Frikha, Professeur à l'Institut Supérieure de Gestion Industrielle de Sfax, pour son soutien, son écoute et ses remarques pertinentes qui ont contribué à améliorer ce manuscrit.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude, mes remerciements et mon respect à tous les membres du jury pour l'attention consacrée à l'égard de mon travail. Je remercie ainsi Monsieur Abdelaziz Bouras, Professeur à l'université de Qatar, et Monsieur Nasser Mebarki, Maître de conférences HDR au département QLIO Qualité, Logistique industrielle et Organisation de l'IUT de Nantes, pour avoir accepté de lire et d'évaluer mon travail de thèse ainsi que pour leurs remarques constructives qui ont contribué à améliorer la qualité de ce manuscrit.

Mes remerciements vont aussi à Madame Gülgün Alpan, Maître de conférences HDR à l'université de Grenoble, pour avoir accepté d'évaluer mon travail de thèse et d'assister à ma soutenance.

Je remercie également Monsieur Denis Gien, Professeur à SIGMA Clermont, qui m'a fait l'honneur de participer à ce jury, pour l'intérêt porté à mon travail, pour ses remarques constructives et ses interventions à plusieurs reprises pour améliorer ce travail.

Merci à Monsieur Fabien Coutarel, Maître de conférences à l'Université Clermont Auvergne et détenteur du titre d'ergonome Européen, pour avoir accepté de participer à ma soutenance.

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet Franco-Tunisien intitulé "CMCU-UTIQUE 14G 1412". Je tiens donc à adresser mes remerciements à ce projet pour le soutien financier qui a permis le démarrage de cette thèse.

Je souhaite remercier tout particulièrement SIGMA Clermont pour le soutien financier durant ces trois dernières années. Ce soutien a assuré la continuité de la thèse et m'a énormément aidé pour travailler dans les meilleures conditions.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur Vladimir Koltchanov, le directeur d'ANYLOGIC EUROPE, pour son aide précieuse et ses interventions pour rendre le logiciel disponible.

Je n'oublie pas mon ancien encadrant Monsieur Mahdi Khemakhem, Professeur adjoint à l'université du Prince Sattam bin Abdulaziz de l'Arabie Saoudite, qui m'a encouragé et soutenu pour faire la thèse. C'est lui qui m'a donné le tout premier élan vers la recherche il y a déjà bien des années. J'ajoute également Monsieur Sabeur Elkosantini, Professeur adjoint à l'Institut Supérieur d'Informatique de Mahdia, qui m'a rassurée par ses explications dans des moments difficiles.

Je remercie également tout le personnel de SIGMA Clermont et du Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (LIMOS) que j'ai côtoyé pendant ces années.

Une thèse est un moment particulier dans la vie qui, comme beaucoup le savent, n'est pas toujours facile. Je ne pourrais donc jamais oublier toutes ces personnes qui

ont cru en moi et qui, chacune à sa façon, m'ont permis d'arriver au bout de cette thèse.

Merci à tous mes amis qui ont toujours été là pour me soutenir. Je remercie tout spécialement Nesrine, Mohamed, Bassem et Anissa avec qui j'ai partagé les plus beaux moments à Clermont Ferrand et qui ont su rendre mon séjour en France agréable.

Je tiens également à remercier la famille Cohendy (Mireille et Monique) qui m'a accueilli chaleureusement dans leur maison pendant toutes ces années.

Enfin, je ne peux qu'être infiniment reconnaissante envers mes parents pour leur patience et leurs nombreux sacrifices.

Table des matières

Résumé	2
Abstract	4
Remerciements	6
Table des figures	13
Liste des tableaux	15
Introduction Générale	16
1 Contexte	16
2 Objectifs de la recherche	17
3 Organisation du manuscrit	19
1 Étude de la Fatigue	21
1 Introduction	21
2 La fatigue : Un concept complexe	22
3 Les facteurs d'accumulation de fatigue	25
3.1 Pénibilité au travail	25
3.1.1 Définitions	25
3.1.2 Facteurs de pénibilité	26
3.1.3 Approches d'évaluation de la pénibilité de travail . .	32
3.2 Autres facteurs	36
4 Les facteurs de récupération de fatigue	38

4.1	Pauses	38
4.2	Rotations de postes	39
5	Effets de la fatigue	40
5.1	Dégradation des performances industrielles	41
5.2	Troubles de santé	45
5.3	Risques de sécurité	46
6	Conclusion	46
2	Modélisation, Quantification et Évaluation de la Fatigue et de ses Impacts dans les Systèmes de Production	48
1	Introduction	48
2	Modèles et outils ergonomiques pour la quantification de la fatigue . .	49
2.1	Méthodes basées sur l'observation pour l'analyse de la posture	49
2.2	Méthodes d'auto-évaluation	51
2.3	Estimation de la durée d'endurance maximale (MET)	53
2.4	Indicateurs de fatigue	56
3	Usage de la simulation	60
3.1	Notions générales	60
3.2	Analyse par simulation de la posture de travail	62
3.3	Évaluation de l'impact de la fatigue sur les performances du système	65
3.4	Conclusion	71
3	Approche de Simulation Combinée des Systèmes de Production Intégrant les Opérateurs et leur Fatigue	74
1	Introduction	74
2	Intégration de la dimension fatigue dans la simulation des systèmes manufacturiers	75
2.1	Simulation du fonctionnement des ateliers de production . . .	75

2.2	Intégration des opérateurs et de leur comportement en simulation	76
2.3	Modélisation du comportement de fatigue	78
2.4	Prise en compte de la pénibilité en simulation	80
3	Présentation du cadre conceptuel : Principes de base	81
4	Usage de la Simulation à Évènement Discret pour la modélisation de l'environnement de production	84
5	Représentation des opérateurs : Modélisation par une approche agent	87
5.1	Base de connaissances	88
5.2	Capacités	90
5.3	État	90
5.4	Comportement	92
6	Approche basée sur la Simulation Continue pour la modélisation du comportement de fatigue	93
6.1	Facteurs d'accumulation et de récupération de fatigue	93
6.2	Quantification de la fatigue	94
6.3	Variations du niveau de fatigue	96
7	Prise en considération de la pénibilité au travail	97
7.1	Raisonnement basée sur la logique floue	97
7.2	Détérioration des durées opératoires de tâches	103
8	Interactions entre la composante SED et l'agent	104
9	Implémentation logicielle avec ANYLOGIC	105
10	Conclusion	108
4	Application de l'Approche de Modélisation	110
1	Introduction	110
2	Affectation dynamique des opérateurs dans les systèmes de production	111
2.1	Contexte	111

2.2	Synthèse sur les approches d'affectation dynamiques	112
2.3	Présentation du cas d'étude	114
2.4	Expérimentation	117
2.5	Résultats et discussions	121
2.5.1	Analyse de sensibilité du niveau d'impact de la fa- tigue	121
2.5.2	Analyse des tendances d'évolution de la fatigue des opérateurs	124
3	Agencement de machines dans l'atelier de fabrication	128
3.1	Contexte	128
3.2	Présentation du modèle de simulation	130
3.3	Expérimentation	131
3.4	Résultats et discussions	134
4	Conclusion	139
	Conclusion Générale et Perspectives	141
	Bibliographie	146

Table des figures

1.1	Facteurs de pénibilité au travail définis par le Code du travail français (Zelano (2014)).	26
1.2	Echelle du bruit (Zelano (2014)).	29
1.3	Évaluation des facteurs de risques de MST.	34
1.4	Échelle pour l'évaluation de la pénibilité de la répétition de tâches. .	35
1.5	Échelle pour l'évaluation de la pénibilité du bruit.	35
1.6	Quelques rythmes circadiens.	36
2.1	Liste des modèles de MET dans la revue de la littérature réalisée par Imbeau <i>et al.</i> (2006).	54
2.2	Les modèles d'allocation de repos existants dans la littérature (Imbeau <i>et al.</i> (2009)).	56
2.3	Le comportement du processus d'accumulation et récupération de la fatigue durant le travail.	59
2.4	Une représentation de la construction des modèles de simulation. . . .	61
2.5	Le squelette virtuel du modèle OpenGL (Ma <i>et al.</i> (2011a)).	63
2.6	Présentation de l'approche proposée par Dode <i>et al.</i> (2016).	67
2.7	Approche proposée par Perez <i>et al.</i> (2014) pour l'évaluation des configurations d'atelier de production.	68
2.8	Le modèle de simulation utilisé par Perez <i>et al.</i> (2014).	69

2.9	L'algorithme de simulation de fatigue proposé par El Mouayni <i>et al.</i> (2016).	69
3.1	L'évolution de la fatigue selon Perez <i>et al.</i> (2014).	79
3.2	Description générale du cadre conceptuel proposé.	83
3.3	Le processus d'agrégation d'informations.	84
3.4	La structure typique d'un agent.	88
3.5	Représentation de la base de connaissances de notre agent.	89
3.6	Variables d'état utilisées pour la description de l'état actuel de l'agent-opérateur.	91
3.7	Représentation d'un exemple de diagrammes d'états de l'agent.	93
3.8	Diagramme générique des facteurs affectant la fatigue.	95
3.9	Un intervalle flou de forme trapézoïdale.	98
3.10	Propagation du bruit dans un atelier.	102
3.11	Addition de décibels.	102
4.1	Description du comportement d'affectation de l'agent durant le travail.	117
4.2	Représentation du système de production étudié.	118
4.3	Fluctuation dans le temps des commandes clients.	119
4.4	Évolution de la fatigue des opérateurs durant le travail.	126
4.5	Architecture du système considéré dans l'exemple 2.	131
4.6	Description de l'agencement A.	132
4.7	Description de l'agencement B.	133
4.8	Évolution de la fatigue des opérateurs dans l'agencement A.	136
4.9	Évolution de la fatigue des différents opérateurs dans l'agencement B.	137
4.10	Comparaison de la fatigue de l'opérateur 3 dans les 2 scénarios.	138

Liste des tableaux

4.1	Bruit généré par les machines.	119
4.2	Durées opératoires "théoriques" exprimées en minutes.	120
4.3	Comparaisons entre le règles d'affectation lorsque l'impact de la fatigue est sévère.	122
4.4	Comparaisons entre le règles d'affectation lorsque l'effet de la fatigue est modéré.	123
4.5	Comparaisons entre le règles d'affectation lorsqu'il n'y a pas d'effet de fatigue.	123
4.6	Capacités de récupération considérées dans l'exemple 2.	132
4.7	Résultats de MFT.	135

Introduction générale

1 Contexte

Les ressources humaines jouent un rôle crucial des les systèmes industriels et, d'après Goldman *et al.* (1995), elles représentent le coeur de ces systèmes. C'est souvent les travailleurs qui manipulent les produits et qui se déplacent d'une machine à une autre pour assurer le déroulement du travail, ceci engendre naturellement leur fatigue. Particulièrement dans les ateliers caractérisés par une forte proportion de tâches manuelles, les opérateurs sont souvent soumis à des conditions de travail pénibles, telles que le transport des charges lourdes et le bruit, ce qui accélère l'accumulation de leur fatigue.

Malheureusement, l'impact de la fatigue est beaucoup trop considérable pour être ignoré. Il a été démontré dans la littérature scientifique que la fatigue au travail peut entraîner une dégradation des performances humaines (opérateurs plus lents et moins productifs) et industrielles (retard, défauts de qualité) et, lorsqu'elle devient chronique, elle peut même entraîner des troubles de santé (notamment les troubles musculo-squelettiques).

Afin de réduire ces effets négatifs, les responsables de production accordent désormais plus d'importance à la fatigue des opérateurs et ils se sont de plus en plus intéressés à des technologies et des stratégies de gestion de ressources et d'organisation d'atelier qui améliorent les performances des systèmes tout en respectant le

bien-être des opérateurs au travail. Par exemple, les questionnaires s’interrogent sur comment ordonnancer les tâches et/ou comment organiser l’atelier afin d’améliorer les performances du système tout en induisant moins de fatigue. Ils ont aussi besoin de savoir comment répartir les pauses et/ou affecter les opérateurs afin d’éviter la fatigue excessive de leurs travailleurs. D’ailleurs, l’industrie 4.0 ou l’usine du futur favorisera des changements importants dans la façon dont les travailleurs industriels accompliront leur travail afin de limiter les effets néfastes de la fatigue (Gorecky *et al.* (2014)).

Dans ce contexte, la simulation peut être une approche intéressante et puissante car elle a été largement utilisée pour évaluer les performances des systèmes de production (Perez *et al.* (2014)). C’est une technique suffisamment générique qui permet d’étudier divers types de systèmes et de tâches. Or, malgré son potentiel, il s’avère que les approches de simulation existantes et les logiciels disponibles ne possèdent pas les concepts adéquats qui permettent de prendre en considération la fatigue des opérateurs dans les modèles de simulation des ateliers de production. Par conséquent, nous avons besoin d’une approche générique et dynamique qui permet d’évaluer les performances de divers types de systèmes industriels tout en prenant en considération la fatigue de leurs opérateurs.

2 Objectifs de la recherche

Notre objectif dans cette thèse est d’étudier dans quelle mesure la fatigue des opérateurs pourrait être prise en considération dans les modèles de simulation des ateliers de production. Pour atteindre cet objectif, nous cherchons donc à voir comment nous pouvons arriver à intégrer la dimension fatigue des opérateurs en simulation. En effet, les approches de simulation existantes se concentrent souvent sur les dimensions techniques dans les systèmes de production (par exemple les machines et

les stocks). Malheureusement, les aspects humains, particulièrement la fatigue des opérateurs, sont insuffisamment pris en considération. Les opérateurs sont souvent représentés dans les modèles utilisés pour simuler et évaluer les systèmes manufacturiers par des ressources avec un taux d'utilisation qui ne reflète pas leur état de fatigue.

En outre, les opérateurs en tant qu'êtres humains présentent des comportements plus complexes qu'une simple ressource en simulation. L'évolution de la fatigue durant le travail représente une caractéristique importante du comportement de l'opérateur qui dépend énormément de ses activités dans l'atelier de production. Par exemple, lorsque l'opérateur traite une opération, il/elle accumule de la fatigue, alors qu'il/elle récupère de la fatigue lorsqu'il/elle prend une pause. L'alternance entre les périodes d'accumulation et de récupération conduit à un comportement dynamique qui nécessite d'être modélisé. Ainsi, nous chercherons à mieux intégrer les opérateurs et leurs comportements dans les modèles de simulation des systèmes de production.

La pénibilité au travail a été distinguée parmi les principaux facteurs qui entraînent la fatigue des opérateurs (Zelano (2014)). Toutefois, la pénibilité est multidimensionnelle et difficile à mesurer. C'est parce qu'elle dépend de plusieurs facteurs tels que le bruit et la manutention des charges lourdes. En outre, nous n'avons pas toujours des données précises et exactes sur comment l'exprimer. Nous chercherons donc à exprimer la pénibilité au travail tout en prenant en compte ses différents facteurs.

Nous chercherons ici à proposer une approche de simulation qui doit être implémentée informatiquement afin de pouvoir étudier les systèmes de production et évaluer leurs performances tout en prenant en considération la fatigue, la pénibilité et le comportement des opérateurs. Il s'agit donc d'une thèse en informatique et pas en ergonomie de travail.

3 Organisation du manuscrit

Afin de répondre aux objectifs de la recherche mentionnées ci-avant, ce travail de thèse a été organisé comme suit : dans un premier temps et selon une démarche méthodologique de thèse, nous avons souhaité mieux comprendre la notion de fatigue, particulièrement dans les systèmes de production. Nous avons ainsi réalisé une étude bibliographique autour de la fatigue dans le Chapitre 1. Cette étude nous a permis d'identifier les principaux facteurs mais aussi les principaux impacts de la fatigue qui peuvent être pris en considération.

Pour prendre en compte la fatigue des opérateurs dans les modèles de simulation des systèmes de production, nous avons besoin d'une méthode qui permet de la quantifier. Nous proposons donc d'exploiter les résultats des ergonomes. Pour ce faire, nous avons réalisé, dans le Chapitre 2, une analyse des travaux de recherche extraites de la littérature ergonomique sur la quantification de la fatigue. Nous avons ensuite analysé les travaux qui prennent en compte la fatigue et qui utilisent la simulation. Cette analyse nous a permis de mieux nous positionner. Nous nous sommes alors intéressée aux approches basées sur la simulation. Nous avons noté qu'il y a un besoin d'un cadre conceptuel pour la simulation et la modélisation des systèmes de production afin de prendre en considération les opérateurs et leur fatigue durant le travail.

Dans le Chapitre 3, nous avons présenté notre cadre conceptuel qui combine différents paradigmes de modélisation : Simulation à Événement Discret, Agent Intelligent et Simulation Continue. Pour exprimer la pénibilité en fonction de ses différents facteurs, nous avons utilisé la Logique Floue. A la fin de ce chapitre, nous avons également proposé une implémentation logicielle avec le simulateur ANYLOGIC pour mettre en oeuvre le cadre conceptuel proposé.

Afin de permettre d'identifier son utilité et sa pertinence (mais aussi ses limites), l'approche proposée a été appliquée pour résoudre des problèmes complexes et très répandus dans les systèmes manufacturiers. Il s'agit des problèmes d'affectation dynamique des opérateurs et d'agencement de machines dans un atelier de production. Ceci a fait l'objet du dernier chapitre.

Nous terminons ce manuscrit par une conclusion générale qui après une synthèse des principaux points abordés dans cette thèse, met en évidence de nombreuses perspectives et des nouvelles voies prometteuses pour les recherches futures.

Chapitre 1

Étude de la Fatigue

1 Introduction

La fatigue est une expérience commune à chacun d'entre nous, ses visages sont multiples, de la lassitude à la fatigue due à la surcharge de travail. Bien que le travail ne comporte plus autant d'efforts physiques intenses qu'autrefois mais la pénibilité au travail n'a pas disparu.

Compte tenu des effets néfastes de la fatigue et dans l'objectif d'améliorer la production et le bien-être au travail, les managers s'intéressent de plus en plus à des stratégies et politiques d'organisation et de gestion de travail qui prennent en compte la fatigue des travailleurs. Toutefois, la conception de telles stratégies n'est pas facile à cause de plusieurs problèmes, souvent liés à la quantification et l'évaluation de la fatigue. Ceci est principalement dû à la relativité de la notion de fatigue qui est multidimensionnelle et varie selon le contexte de travail.

L'objectif de ce chapitre est ainsi de présenter une revue de la littérature sur les différentes définitions existantes pour la fatigue, ses facteurs et ses conséquences sur les systèmes de production et les travailleurs. Nous commencerons d'abord par donner quelques définitions proposées dans la littérature pour la fatigue. Ensuite, nous

citerons quelques principaux facteurs d'accumulation et de récupération, notamment la pénibilité au travail.

L'objectif n'est pas de détailler des concepts largement étudiés par les ergonomes mais d'en fournir les facteurs de base qui puissent être intégrés dans les modèles de simulation des systèmes de production.

La fatigue touche les travailleurs en premier lieu en diminuant leur productivité et leur bien-être, ce qui se traduit par la suite par des coûts supplémentaires sur les systèmes de production (retard, rejet de produits défectueux). Ainsi, étudier les conséquences et l'impact de la fatigue sur les opérateurs et les performances industrielles fera l'objet de la dernière partie de ce chapitre.

2 La fatigue : Un concept complexe

La notion de fatigue est extrêmement complexe parce qu'elle maille le subjectif avec l'objectif, parce que sa perception est variable d'une personne à une autre, parce qu'elle résulte de plusieurs facteurs, parce que les traces qu'elle peut laisser ne sont pas toujours visibles (Zelano (2014)). Il s'agit, ainsi, d'une notion controversée dont la définition est assez fluctuante en fonction du champ dans lequel elle est utilisée.

Dans notre langage courant la fatigue est perçue comme " un état résultant d'un fonctionnement excessif (d'un organe ou d'un organisme) et qui se traduit par une diminution du pouvoir fonctionnel, généralement accompagnée d'une sensation caractéristique (sentiment de légère/grande/ extrême fatigue). Ceci entraîne une lassitude, épuisement, éreintement, exténuation, harcèlement ou même un surmenage"¹.

D'un point de vue médical, il est classique de distinguer trois types de fatigue (Jacob et Natanson (2010)) :

1. Le Robert Dictionnaire culturel en langue française, 2005.

- La fatigue **physiologique (normale)** : c'est la plus fréquente et celle que l'on dit "normale" car la plupart d'entre nous devons y faire face régulièrement. Elle résulte d'un effort physique ou/et mental intense, d'une forte concentration, d'une grande dépense d'énergie ou même d'un stress émotionnel repéré. Ce type de fatigue disparaîtra souvent après une bonne nuit de sommeil.
- La fatigue **pathologique** : elle est symptôme de maladies bien identifiées soit organiques (troubles musculo-squelettiques, maladie neurologique, etc.) soit fonctionnelles d'origine psychique ou psychiatrique (dépression et névrose). Ce type de fatigue entretient un lien étroit avec le stress et l'anxiété (Elkosantini et Gien (2009)). Puisque ce type de fatigue affecte le moral, elle peut provoquer l'apparition d'un état dépressif plus sérieux.
- La fatigue **réactionnelle** : elle se manifeste par un état d'épuisement général qui découle des problèmes et frustrations de notre mode de vie. Cette fatigue découle de facteurs psychologiques (insatisfaction de travail, dans les relations interpersonnelles) qui provoquent des sentiments de rage ou de frustration intérieure. La fatigue devient alors un mécanisme de défense face à l'insatisfaction.

Dans certains travaux de recherches, la fatigue est décrite comme un épuisement et/ou un inconfort corporel associés à une activité prolongée (Jones *et al.* (2015)). La lassitude, le manque d'énergie et l'effort physique (Barker et Nussbaum (2011)) ont été distingués comme des dimensions de la fatigue. Dans le travail de Elkosantini et Gien (2009), les auteurs ont défini la fatigue comme un état de capacité réduite à travailler après une période d'activité. La fatigue est perçue dans (Lodree Jr *et al.* (2009)) comme une perte d'efficacité des travailleurs.

Outre la fatigue physique, nous pouvons également trouver la fatigue mentale qui est un état psychobiologique causé par de longues périodes d'activité cognitive exigeante. Elle peut se traduire par une diminution transitoire de la performance

cognitive et une perte de concentration, comme elle peut nuire aux performances physiques chez les individus (Marcora *et al.* (2009)). Par exemple, dans le travail de Yeow *et al.* (2014), la fatigue mentale implique une dégradation de la performance mentale de l'individu en raison d'une surcharge d'activités à la fois mentales et physiques. Lorsque les effets de la fatigue ne disparaissent pas, même après une bonne période de repos, nous parlons davantage d'une fatigue chronique.

Une revue de la littérature sur les différentes définitions de fatigue a été proposée par Phillips (2015). Les auteurs ont également proposé une nouvelle définition considérée comme générique : *"La fatigue est une condition psychophysiologique sous-optimale causée par l'effort. Le degré et le caractère dimensionnel de cette condition dépendent de la forme, de la dynamique et du contexte de l'effort. Le contexte de l'effort est décrit par la valeur et la signification de la performance à l'individu ; l'historique du repos et de sommeil ; les effets circadiens ; facteurs psychosociaux couvrant le travail et la vie familiale ; traits individuels ; régime ; la santé, la forme physique et d'autres états individuels ; et les conditions environnementales. La fatigue entraîne des changements dans les stratégies ou l'utilisation des ressources, de sorte que les niveaux initiaux de traitement mental ou d'activité physique sont maintenus ou réduits"*.

Comme les opérateurs dans les systèmes manufacturiers doivent souvent traiter des tâches manuelles ce qui peut impliquer par exemple le transport des charges lourdes et des postures de travail inconfortables, c'est souvent la fatigue physiologique, notamment la fatigue musculaire qui est prise en compte en production (Digiesi *et al.* (2009); Dode *et al.* (2016); Jaber *et al.* (2013)).

3 Les facteurs d'accumulation de fatigue

3.1 Pénibilité au travail

3.1.1 Définitions

Dans la littérature scientifique, il existe un nombre important de travaux de recherche qui ont montré que la fatigue dans les systèmes manufacturiers dépend énormément du contexte de production, notamment de la pénibilité au travail. Mais que signifie travailler dans des conditions pénibles (Zelano (2014); Cheikh *et al.* (2016); Dubois et Cornet (2012)) ?

Une définition très large est proposée par le Petit Larousse : *"Tout individu dont l'activité professionnelle se fait parfois avec difficulté, fatigue ou souffrance"*. D'après Zelano (2014), le législateur français a fait le choix d'une définition "objective" de la notion de pénibilité en mettant l'accent sur les situations de travail ayant des effets néfastes sur la santé et sur l'espérance de vie des opérateurs exposés. La pénibilité est maintenant définie dans le Code du travail français (article L. 4121-3-1). Elle est caractérisée par une exposition à un ou plusieurs facteurs de risques professionnels susceptibles de laisser des traces durables, identifiables et irréversibles sur la santé.

Selon Bugand *et al.* (2009), la pénibilité est définie comme le résultat de sollicitations physiques et psychiques d'activités professionnelles qui laissent des traces durables, identifiables et irréversibles sur la santé des salariés. La diversité des définitions avancées par les chercheurs et experts, bien que souvent en réalité assez proches, illustrent aussi bien l'importance d'une définition de la pénibilité que la difficulté à saisir toute les dimensions de celle-ci.

Généralement, la pénibilité au travail résulte de la combinaison de plusieurs facteurs liés aux caractéristiques des individus (tels que le sexe et l'âge) et des situations de travail (type de tâches, secteur d'activité, modes d'organisation du travail, poli-

tiques de gestion de ressources humaine) (Dubois et Cornet (2012)). Les facteurs de pénibilité présentés dans le tableau 1.1, qui sont définis dans **l'article D. 4121-5 du Code du travail français** et également dans l'enquête Sumer 2010 réalisée par la Dares et l'inspection médicale du travail DGT-DGAFP (Coutrot et Sandret (2015)), sont surtout liés à des contraintes physiques marquées (par exemple manutention de charge ou posture inconfortable), à un environnement physique agressif (exp. chaleur ou vibrations) et à certains rythmes de travail (tel que le travail répétitif ou de nuit).

FIGURE 1.1 – Facteurs de pénibilité au travail définis par le Code du travail français (Zelano (2014)).

Contraintes physiques marquées	Environnement physique agressif	Rythmes de travail
• Manutention manuelles de charges (Article R. 4541-2) • Postures pénibles définies comme postures forcées des articulations • Vibrations mécaniques (Article R. 4441-1)	• Agents chimiques dangereux (Articles R. 4412-3 et R. 4412-60) y compris les poussières et les fumées • Activités exercées dans un milieu hyperbare (Article R. 4461-1) • Bruit (Article R. 4431-1) • Température extrême	• Travail de nuit dans certaines conditions (Articles L. 3122-29 et L. 3122-31) • Travail en équipe successives alternantes • Travail répétitif caractérisé par la répétition d'un même geste, à une cadence contrainte, imposé ou non par le déplacement automatique d'une pièce ou par la rémunération à la pièce, avec un temps de cycle défini

3.1.2 Facteurs de pénibilité

Manutention manuelle de charges

La manutention manuelle de charges est définie, dans (Zelano (2014)), par "toute opération de transport ou de soutien d'une charge, dont le levage, la pose, la poussée, la traction, le port ou le déplacement, qui exige l'effort physique d'un ou de plusieurs travailleurs". La fatigue représente alors un effet immédiat, fréquent et inhérent du travail de manutention manuelle.

Les tâches de manutention de charges nécessitent un effort physique important qui consomme beaucoup d'énergie musculaire ce qui induit la fatigue. Compte tenu de la différence de morphologies et de caractéristiques physiques entre l'homme et la femme, la fatigue résultant de la manutention ou le port manuel de charges varie chez les hommes qu'à les femmes. D'ailleurs, dans le travail de Zelano (2014), les auteurs ont indiqué que, habituellement, les travailleurs de sexe masculin ne peuvent pas porter des charges supérieures à 55 kg et dans certains cas cette valeur peut s'élever jusqu'à 105 kg sous autorisation du médecin du travail. Alors que, pour les femmes, elles ne sont pas autorisées à porter des charges supérieures à 25 kg ni à transporter, à l'aide d'une brouette, des charges supérieures à 40 kg (y compris le poids de la brouette).

Postures pénibles

Selon les normes internationales, le terme posture est défini par "tout maintien d'une position pendant une durée qui dépasse 4 secondes". La posture pénible est définie par une "Posture forcée des articulations" (Zelano (2014)), c'est à dire les postures qui comportent principalement des angles extrêmes des articulations. Les postures pénibles sont souvent liées à la durée, la répétition et le type d'activité ainsi que la manutention manuelle. Ainsi, pour analyser une posture prise durant le travail, il faut tenir compte de plusieurs variables qui dépendent des conditions de travail (type d'effort ou d'activité et l'outil utilisé, répétition, etc.), de caractéristiques personnelles du travailleur (sexe, âge, expérience de travail, etc.) et de contraintes environnementales et de production (horaire, espace, etc.).

Le maintien d'une posture du corps peut entraîner progressivement de l'inconfort et de la fatigue. Pour assurer la production, les opérateurs doivent souvent maintenir certaines postures de corps durant le travail ce qui entraîne, par conséquent, leur fatigue. Pour limiter l'influence de ces postures sur la fatigue, les ergonomes ont

mis en place certaines mesures de prévention, tels que la conception des nouveaux postes ergonomiques qui permettent d'éviter les postures pénibles et le changement fréquent de positions de travail (Raina et Dickerson (2009); Li et Buckle (1999)).

Vibrations mécaniques

Les vibrations mécaniques, d'après Zelano (2014), sont les vibrations qui entraînent des risques pour la santé et la sécurité des travailleurs lorsqu'elles sont transmises. Dans le travail, nous pouvons souvent distinguer deux types de vibrations : des vibrations transmises aux mains et aux bras et d'autres transmises à l'ensemble du corps.

Tout comme les postures pénibles, les vibrations mécaniques peuvent progressivement entraîner la fatigue des travailleurs, c'est parce que les vibrations du premier type stimulent les vaisseaux sanguins, les neurones et les muscles du bras, et les vibrations du deuxième type stimulent la colonne vertébrale et peuvent entraîner même des lombalgies.

Pour réduire les effets néfastes des vibrations mécaniques sur les travailleurs durant une journée de 8 heures de travail, des seuils d'expositions journalières ont été établies par les ergonomes : 5 m/s^2 (mètre par seconde au carré) pour les vibrations transmises aux mains et aux bras et 1.15 m/s^2 pour les vibrations transmises à l'ensemble du corps.

Bruit

Nous parlons du bruit lorsqu'un ensemble de sons est perçu comme gênant et agaçant et qui peut même devenir dangereux pour la santé. Dans la thèse de Zelano (2014), un son d'intensité inférieure à 80 dB est considéré comme normal. Comme mentionné dans la figure 1.2 , le son peut entraîner la fatigue et peut même être

pénible lorsque son intensité dépasse 60 dB, alors que, si l'intensité dépasse 80 dB, le son devient dangereux pour l'individu.

Il existe plusieurs secteurs d'activités où le bruit est très répandu dans leurs lieux de travail, nous mentionnons, à titre d'exemple, les industries alimentaires, les imprimeries et la filière bois. L'exposition à des niveaux élevés de bruit entraîne la fatigue auditive de travailleurs, le stress et elle peut même conduire, à long terme, à des troubles de sommeil et de santé. Pour ces raisons, une valeur seuil d'exposition quotidienne au bruit a été limitée à 80 dB. Certaines mesures de prévention peuvent être également mises en place sur le lieu de travail, par exemple, la séparation des sources de bruit pour éviter la propagation du bruit dans tout l'atelier ou la construction de cabines isolées phoniquement.

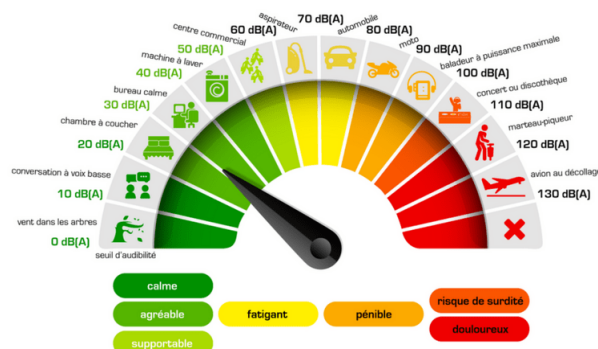


FIGURE 1.2 – Echelle du bruit (Zelano (2014)).

Température extrême

Dans les industries alimentaires, BTP, les fonderies, les aciéries, etc., les travailleurs sont souvent soumis à la température, qui provient de l'environnement de travail ou de la matière manipulée, durant l'activité. Toutefois, il est difficile de déterminer à quelle valeur la température est considérée extrême et devient pénible. En effet, il y a une polémique là-dessus. Nous trouvons, par exemple, qu'il y a quelques ergonomes qui considèrent une température d'air inférieure à 10°C ou supérieure à

30°C est extrême, alors qu'en juin 2016, le code de travail français a fixé le seuil de la température à 5°C ou moins pour le froid et 30°C ou plus pour la chaleur (Zelano (2014)).

Les situations de travail à la chaleur entraînent la transpiration, la faiblesse, la fatigue et même de l'épuisement et peuvent être l'origine de divers troubles de santé (fièvre, crampes, etc.). Le travail en ambiance froide peut entraîner une perte de dextérité qui peut concerner l'ensemble du corps ou seulement les parties exposées au froid, des simples engourdissements jusqu'aux gelures.

Travail de nuit et équipes successives alternantes

Le travail de nuit c'est tout travail ayant lieu entre 21 h et 6 h sauf pour certaines activités de production rédactionnelle et de presse tels que la radio et le cinéma dont la période de travail de nuit est fixée entre 24 h et 7 h. Ce type de travail est souvent répandu dans les secteurs d'activités où il est nécessaire d'assurer la continuité de service ou de la production (transport, hôpitaux, etc.).

Le travail de nuit touche principalement le nombre d'heures de sommeil de travailleurs, sachant que ce nombre varie d'une personne à une autre, mais la plupart des gens dorment en moyenne de 7 à 9 heures/nuit. En effet, selon certaines recherches (Barthe *et al.* (2004)), les travailleurs de nuit dorment de une à trois heures de moins, chaque jour, que les travailleurs de jour. Dormir 6 heures pendant le jour n'est pas la même chose que dormir 6 heures pendant la nuit. Si la personne ne dort pas autant qu'il en a besoin pendant plusieurs jours, il finira par accumuler une "dette" de sommeil. Par exemple, lorsqu'un travailleur perd 2 heures de sommeil/nuit pendant 4 jours, ceci peut engendrer autant de fatigue que perdre une nuit complète de sommeil (Barthe *et al.* (2004)).

Le travail en équipes successives alternantes, appelé aussi travail posté, désigne tout mode d'organisation du travail en équipe selon lequel les travailleurs sont occupés successivement sur les mêmes postes et selon un certain rythme (continu ou discontinu). Il est à noter que le travail posté fait partie des organisations temporelles atypiques et inclut souvent un poste horaire de nuit. La fatigue, les troubles de sommeil et d'humeur sont distingués comme des effets directs de l'exposition aux horaires de travail de nuit.

Travail répétitif

Le travail répétitif, connu aussi par le terme *travail statique*, est caractérisé par la répétition d'un même geste, à une cadence contrainte, imposée ou non par le déplacement automatique d'une pièce ou par la rémunération à la pièce, avec un temps de cycle défini. Ce type de travail est très répandu surtout dans les industries à cause de l'intensification des tâches, que celles-ci soient physiques ou cognitives, et de la demande à une production de plus en plus accrue. Nous mentionnons que le travail répétitif est souvent répandu dans les environnements professionnels monotones où les résultats de production sont surveillés et les opérateurs doivent exercer un effort (physique ou cognitif) important dans un cycle de fabrication qui est souvent court.

Le travail répétitif entraîne la fatigue, des douleurs et des gênes de mouvements durant l'opération ce qui peut empêcher le travailleur d'accomplir sa tâche (Imbeau *et al.* (2006)). Compte tenu de ses effets et grâce au développement scientifique qui a permis d'identifier des relations de corrélation entre la force exercée (effort physique du travailleur) et la capacité de l'individu à la maintenir ou à la répéter (Imbeau *et al.* (2009)), le travail répétitif peut être considéré comme le facteur de pénibilité le plus étudié dans la littérature.

La cadence des tâches durant le travail joue un rôle très important sur l'accumulation de fatigue : lorsque la cadence n'est pas trop rapide, les travailleurs peuvent

avoir du temps pour récupérer entre deux tâches, alors que si elle est trop rapide, elle peut conduire à diminuer le temps qui s'écoule entre deux tâches et, par conséquent, du temps de récupération.

Milieu hyperbare

Un milieu hyperbare est un milieu où la pression est supérieure à la pression de l'atmosphère. Par exemple, sous l'eau où la pression augmente de 1 bar tous les 10 m de profondeur (travaux publics sous-marins) ou dans un local ou une enceinte dont la pression est artificiellement augmentée pour des raisons de production (travaux pétroliers ou dans des tunnels).

Le travail dans un milieu hyperbare peut entraîner une surpression au niveau des poumons, des oreilles, du tube digestif et des sinus ce qui conduit progressivement à la fatigue des opérateurs. Compte tenu des risques sur la santé due à l'exposition prolongée à cette surpression, le législatif français a fixé une valeur seuil de 100 hPa dans le code de travail.

3.1.3 Approches d'évaluation de la pénibilité de travail

Il a été largement démontré dans la littérature scientifique que la pénibilité de travail peut entraîner de graves problèmes de santé et de sécurité au travail (Zelano (2014)). Dans ce contexte, les entreprises déploient des efforts soutenus pour adopter des normes qui précisent de bonnes pratiques et performances en matière de santé et de sécurité au travail (Cheikh *et al.* (2016)).

Les autorités législatives ont établi des règlements qui garantissent des conditions de travail sûres et saines (Code du Travail Français). Ces réglementations et mécanismes visent à anticiper et à prévenir l'exposition à des facteurs de pénibilité qui peuvent conduire à des effets perpétuels, identifiables et irréversibles sur la santé.

Cependant, malgré ces efforts, le lien est encore faible entre les recommandations de ces réglementations et les approches d'aides à la décision (Cheikh *et al.* (2016)).

Dans la thèse de Zelano (2014), l'auteur s'est concentré sur l'énumération, la définition et la quantification des facteurs de pénibilité. Son objectif était de proposer une méthodologie permettant aux managers de s'acquitter de leurs responsabilités législatives et de se conformer aux règlements requis. La méthodologie proposée se concentre sur le diagnostic des facteurs de pénibilité du travail et suggère de décrire la pénibilité par un ensemble d'indicateurs (figure 1.3). Toutefois, cette méthodologie ne fournit pas d'indications sur la manière d'utiliser les quantifications suggérées pour évaluer d'une façon générale les environnements de travail.

En s'appuyant sur le travail de Zelano (2014), qui est à la base un médecin spécialisé en médecine du travail, Cheikh *et al.* (2016) ont proposé un indicateur musculo-squelettique (MST) pour évaluer les conditions de travail pénibles pour une configuration donnée. Bien que cet indicateur puisse donner un aperçu de la difficulté du travail, d'un point de vue ergonomique, il ne peut pas refléter l'état de fatigue de chaque travailleur du système, ni décrire l'évolution dynamique de la fatigue des opérateurs pendant le travail.

Cheikh *et al.* (2016) ont également proposé une approche multi-critères pour la re-configuration des systèmes de production tout en prenant en compte certains facteurs de pénibilité. Leur objectif était de trouver un compromis entre certains critères techniques (par exemple, la durée nécessaire pour la re-configuration et la quantité des encours) et d'autres humains (trouble musculo-squelettiques, bruit et répétition). Les auteurs ont pris en compte les conditions de travail pénibles, dans le processus de re-configuration des systèmes de production, via les indicateurs suivants :

- **Indicateur de trouble musculo-squelettiques (MST)** est basé sur six facteurs liés à la tâche qui sont : l'intensité de la tâche (I), la durée de chaque

effort (DE), le nombre d'efforts exercés par minute (E), la posture (P), la cadence de travail (S) et la durée de la tâche (DT). Comme l'indique la figure 1.3, chacun de ces facteurs présente cinq niveaux auxquels différents coefficients sont attribués (Zelano (2014); Cheikh *et al.* (2016)). L'indicateur MST pour un opérateur est calculé en multipliant les coefficients des facteurs considérés selon l'équation (1.1) :

$$MST = C(I) * C(DE) * C(E) * C(P) * C(S) * C(DT) \quad (1.1)$$

Où $C(x)$ est le coefficient lié au facteur de pénibilité x . Pour Cheikh *et al.* (2016), un indicateur MST élevé montre que la configuration évaluée présente une risque élevée de troubles musculo-squelettiques. Ainsi, lorsque plusieurs configurations sont disponibles, le manager ou le gestionnaire doit choisir la meilleure alternative ayant l'indicateur MST le plus bas.

Intensity		Duration of effort (% cycle)		Number of Efforts/min		Posture		Speed		Duration of task (h)	
Level	$C(I)$	Level	$C(DE)$	Level	$C(E)$	Level	$C(P)$	Level	$C(S)$	Level	$C(DT)$
Light	1	<10	0,5	<3	0,5	Very good	1	Very low	1	<1	0,25
A little Hard	3	10-29%	1	4-8	1	Good	1	Low	1	1-2	0,5
Hard	6	30-49%	1,5	9-14	1,5	Medium	1,5	Medium	1	2-4	0,75
Very Hard	9	50-79%	2	15-19	2	Bad	2	Fast	1,5	4-8	1
Close to max	13	>80%	3	>20	3	Very bad	3	Very fast	2	>8	1,5

FIGURE 1.3 – Évaluation des facteurs de risques de MST.

- **Indicateur de répétition (R)** de tâches est donné par une échelle d'évaluation présentée dans la figure 1.4, selon le nombre de répétition de la tâche, R reçoit une valeur dans l'intervalle $[0 - 10]$.

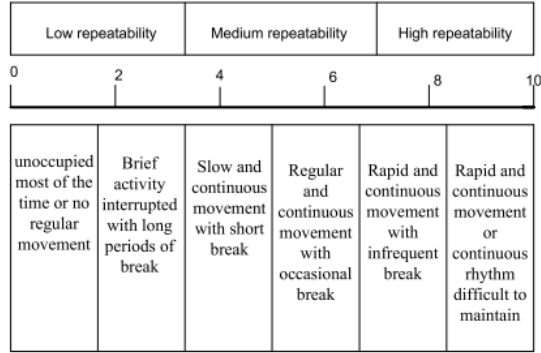


FIGURE 1.4 – Échelle pour l'évaluation de la pénibilité de la répétition de tâches.

- **Indicateur de bruit (N)** est caractérisé par son intensité (In), sa fréquence (F), son niveau de pression acoustique (AP) et sa durée (D). Cheikh *et al.* (2016) ont développé l'échelle présentée dans la figure 1.5 pour déterminer la pénibilité du bruit généré lors du traitement d'une tâche. Le calcul de la valeur de N est donné par l'équation (1.2).

$$N = C(In) * C(F) * C(AP) * C(D) \quad (1.2)$$

Intensity (dB(A))		Frequency (HZ)		Acoustic Pressure(dB(C))		Duration (h)	
Level	$C(In)$	Level	$C(F)$	Level	$C(AP)$	Level	$C(D)$
0-29	0-3	20-200	0-2	0-49	0-3	>0,5	0-3
30-59	3-5	200-2000	3-5	50-99	3-5	0,5-2	3-5
60-79	5-7	2000-20000	5-7	100-129	5-7	2-4	5-7
80-86	7-10	>20000	7-10	130-136	7-10	4-8	7-10

FIGURE 1.5 – Échelle pour l'évaluation de la pénibilité du bruit.

3.2 Autres facteurs

Perturbation des cycles circadiens

L'étude quantitative des processus biophysiques et biochimiques révèlent des variations périodiques et prévisibles des organismes vivants dans le temps, à l'échelle de 24h. Ainsi, des rythmes biologiques de période d'environ 24h (circadiens) peuvent être mis en évidence chez la plupart des êtres vivants dont l'être humain. Comme l'illustre la figure 1.6, le corps humain fonctionne selon une horloge de 24 heures. Il est programmé pour dormir la nuit et être éveillé le jour. Notre horloge biologique régit également nos cycles physiologiques journaliers, comme la sécrétion d'hormones, la digestion, la température corporelle et la somnolence. Ainsi, tout changement que subit notre horloge biologique engendre une perturbation du cycle circadien ce qui entraîne des conséquences néfastes sur les individus qui peuvent aller du simple inconfort et fatigue à des troubles profonds de santé (Potter *et al.* (2016)).

Dans les industries où l'organisation du travail est en horaires décalés, les études ont montré que les employés souffrent souvent de perturbations physiques (notamment la fatigue) et physiologiques (Kostreva *et al.* (2002)).

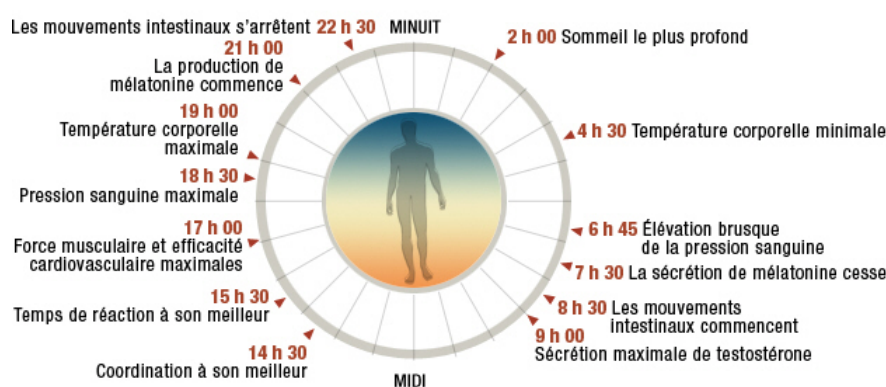


FIGURE 1.6 – Quelques rythmes circadiens.

Distances parcourues

Afin de pouvoir répondre aux caractéristiques changeantes des demandes du marché, il est devenu nécessaire de considérer des mains d'oeuvre flexibles, c'est à dire capables d'opérer différents types de tâches. Ceci implique que les travailleurs doivent changer de poste durant leur travail et se déplacer d'un poste à un autre ce qui conduit à parcourir des distances qui peuvent être plus ou moins importantes en fonction de plusieurs critères (par exemple, l'emplacement de postes et les compétences de travailleurs).

D'après Michalos *et al.* (2010, 2011), la distance parcourue entre les machines durant le travail peut augmenter la fatigue des opérateurs. Dans leurs travaux, les auteurs ont proposé des approches multi-critères pour l'ordonnancement dynamique de tâches. La fatigue et la distance parcourue par les opérateurs ont été considérées parmi les critères choisis pour l'aide à la décision. Les auteurs ont cherché à trouver une solution qui minimise à la fois la fatigue et la distance parcourue. Selon quelques ergonomes, le changement de poste, qui implique une distance raisonnable à parcourir, favorise plutôt la récupération. Ainsi, tout dépend de sa valeur, la distance parcourue peut être considérée comme un facteur d'accumulation ou de récupération de fatigue.

Il est important de noter que la distance parcourue par les opérateurs durant le travail a été prise en compte dans plusieurs problèmes de production tel que l'ordonnancement d'opérateurs et de tâches et les problèmes de configuration et de reconfiguration des systèmes manufacturiers (Al-Zuheri *et al.* (2016); Gruat-La-Forme *et al.* (2007)). D'ailleurs, il existe une vaste littérature à propos les "Walking Workers systems", où les travailleurs flexibles peuvent marcher entre les postes de travail et exécuter différents types de tâches (Wang *et al.* (2009); Sirovetnukul et Chutima (2010)).

Typiquement, l'objectif est d'ajuster le nombre de machines et/ou d'opérateurs en fonction des besoins de production afin de minimiser le temps de déplacement et/ou le coût (Al-Zuheri *et al.* (2016)). Dans la plupart de ces travaux, la distance parcourue est considérée implicitement comme un facteur de fatigue et de retard qu'il faut minimiser. Toutefois, aux meilleurs de nos connaissances, il n'y a pas de travaux scientifiques qui ont montré empiriquement ou analytiquement la relation entre la fatigue et la distance parcourue durant le travail. Ceci reste une question de recherche très importante qui doit être traitée par les ergonomes afin de mieux prendre en compte la distance parcourue dans les modèles de quantification de fatigue.

4 Les facteurs de récupération de fatigue

4.1 Pauses

Le travail musculaire associé avec un des facteurs de pénibilité mentionnés ci-dessus entraîne la fatigue et l'inconfort. Pour éviter l'accumulation rapide de la fatigue, des périodes de repos suffisantes et bien espacées sont recommandées. Selon Konz (2000), il existe 5 différents types de pauses : formelles (déjeuner, café), informelles (interruption du travail), micro-pauses (les pauses d'une minute ou moins), "working-rest" (changement de tâches en utilisant une partie différente du corps) et enfin "off-work" (weekends et vacances).

Une pause, quelle que soit son type, permet la récupération de l'effet de fatigue ce qui permet d'augmenter la productivité et le bien-être des opérateurs au travail (Imbeau *et al.* (2006)). Toutefois, certaines pauses (formelle, informelle et micro-pauses), qui sont souvent payées, engendrent des coûts (financier, retard). Par conséquent, il est important de déterminer leurs durées et à quelle fréquence il faut les prendre. Pour ces raisons, quelques recherches scientifiques ont été menées pour étudier le problème de planification de pauses, particulièrement, dans le contexte du travail

répétitif. Nous citons, à titre d'exemple, le travail de Dababneh *et al.* (2001) qui a comparé deux différentes répartitions de pauses : la première consiste à prendre une pause de 3 min après 27 min de travail. La deuxième consiste à prendre une pause de 9 min après 51 min de travail. Les résultats ont montré que les deux répartitions n'ont pas d'effet négatif sur la production, par contre, les auteurs ont noté que les travailleurs ont préféré la deuxième répartition.

Dans le travail de Jaber et Neumann (2010), les auteurs ont comparé quatre différentes planifications de pauses pour un système contraint à double ressources (Dual-Resource Constrained) avec un seul opérateur qualifié pour réaliser n types de tâches. Leurs résultats ont montré que de courtes pauses après chaque tâche, des temps de cycle courts et des taux de récupération plus rapides améliorent les performances du système et réduisent la vitesse d'accumulation de fatigue.

Des modèles d'allocation de repos ont été proposés dans la littérature pour estimer le temps nécessaire pour un repos adéquat après un effort statique. Une revue de la littérature sur ces modèles est proposée par Imbeau *et al.* (2006), les auteurs ont mené une comparaison entre quatre modèles d'allocations de repos et ils ont montré qu'il y a une différence importante entre les résultats obtenus par ces modèles.

4.2 Rotations de postes

C'est une technique de conception d'emploi qui consiste à faire déplacer les travailleurs entre deux ou plusieurs postes d'une manière planifiée à l'avance. Dans le contexte de production où les tâches sont manuelles et répétitives, la rotation de postes est très répandue parce qu'elle permet d'exposer les employés à des expériences différentes et de les former en alternance ce qui améliore la flexibilité de la ligne de production, la satisfaction au travail et la productivité.

En outre, les chercheurs ont montré que cette technique permet de réduire la fatigue de travailleurs durant le travail. On trouve, par exemple, Raina et Dickerson (2009) qui ont étudié l'influence de la rotation de postes sur la fatigue musculaire, particulièrement le muscle de l'épaule, et ils ont évalué quatre différentes combinaisons de tâches. Les auteurs ont montré que faire varier les tâches (pour toutes les combinaisons) permet de réduire la fatigue. Toutefois, ils ont noté que l'ordre de rotation n'a pas eu d'influence sur la fatigue.

Dans l'objectif de réduire la charge du travail, Boenzi *et al.* (2013) ont proposé deux modèles numériques pour la planification des horaires de pauses et de rotation de postes dans un environnement de travail caractérisé par des tâches manuelles à faible charge et à une fréquence de répétition élevée.

Dans le même contexte du travail répétitif, Mixter *et al.* (2018) ont proposé d'alterner le travail entre des tâches cognitives (nécessitent un effort mental) et d'autres physiques (manuelles) pour étudier l'effet de ce type de rotation sur la fatigue. Les résultats de l'expérience qui a été réalisé sur 15 travailleurs ont montré que la fatigue de ces participants a augmenté et que la difficulté des tâches cognitives a eu des effets marginaux sur la récupération de fatigue. Par conséquent, d'après les auteurs, ce type de rotation de postes ne permet pas la récupération, au contraire, ça peut même favoriser l'accumulation de fatigue.

5 Effets de la fatigue

Après avoir identifié les principaux facteurs d'accumulation et de récupération de fatigue, nous nous intéressons, dans cette section, à identifier quelques conséquences. Étant donné qu'il existe différentes sortes de fatigue (musculaire, mentale), c'est normal que nous trouvons des effets qui touchent le physique des employés (épouement, crampes) et d'autres qui touchent leur psychologie (stress, insatisfaction).

Il existe de nombreux travaux de recherche qui ont été menés sur l'investigation des effets de la fatigue dans divers domaines industriels et de services (Grosse *et al.* (2015); Jaber et Neumann (2010); Digiesi *et al.* (2006)). Il faut dire que la fatigue touche en premier lieu et à court terme les travailleurs, mais au fil du temps, ses effets se propagent au système de production et se manifestent par une dégradation de productivité ce qui impacte, par conséquent, les performances industrielles (erreurs, retards).

5.1 Dégradation des performances industrielles

Comme mentionné ci-dessus, la fatigue a des effets néfastes sur la productivité des êtres humains. Selon Perez *et al.* (2014), l'opérateur peut avoir des difficultés pour accomplir une série de tâches lorsqu'il est fatigué. Digiesi *et al.* (2006) ont montré que lorsqu'un travailleur devient fatigué, il/elle devient également plus lent, de sorte qu'il/elle produit moins de pièces parce qu'il passe plus de temps à traiter sa tâche.

Dans le travail de Lodree Jr *et al.* (2009), les auteurs ont remarqué que les durées opératoires de tâches peuvent se détériorer au fil du temps avec l'augmentation de la fatigue des travailleurs. Le temps de traitement est considéré comme détérioré lorsqu'il devient plus long que prévu (c'est-à-dire par rapport au temps de traitement "théorique"). Au début du travail, l'opérateur est assez rapide pour respecter la durée de traitement "théorique", mais dès que le travailleur commence à se sentir fatigué, il/elle devient trop lent et passe plus de temps à traiter les tâches.

Mummolo *et al.* (2004); Digiesi *et al.* (2006, 2009) ont suggéré d'ajouter des durées supplémentaires pour le traitement de tâches en fonction du niveau de fatigue du travailleur. Comme les auteurs étaient intéressés par les tâches manuelles et répétitives, ils se sont inspirés du modèle de Wright (1936) qui est le premier à

étudier les effets de facteurs humains, précisément l'effet de l'apprentissage, sur la variabilité du temps de performance de travailleurs. Le modèle de Wright (1936), décrit par (1.3), relie la durée opératoire de la tâche prévue à la n -ème répétition ($y(n)$) avec le nombre n de tâches précédemment accomplies, la durée opératoire prévue à la première répétition ($y(1)$) et le facteur d'apprentissage (b).

$$y(n) = y(1) n^{-b} \quad (1.3)$$

A partir du modèle de Wright (1936), de nombreux modèles ont été proposés dans la littérature et qui établissent un lien entre le temps d'achèvement de la tâche et le nombre de tâches précédemment accomplies. Ces modèles diffèrent selon le phénomène humain considéré (fatigue, oubli et apprentissage).

Mummolo *et al.* (2004) ont proposé un modèle qui prend en compte à la fois la fatigue et l'apprentissage. Le modèle présenté dans (1.4) détermine la durée opératoire de la tâche à la n -ème répétition.

$$y(n) = y(1) + [(M - y(1)) (1 - n^{-\tau})] - [(y(1) - m) (1 - n^{-\lambda})] \quad (1.4)$$

Avec,

- $y(1)$ est la durée "théorique" prévue pour le traitement de la tâche
- M est la pire performance attendue (la plus longue durée) en raison de la fatigue après un grand nombre de répétitions
- m est une estimation de la performance idéale pour l'opérateur
- λ et τ sont, respectivement, les paramètres du phénomène d'apprentissage et de fatigue ($0 \leq \lambda, \tau \leq 1$)

Dans un travail plus récent, Digiesi *et al.* (2009) ont étudié l'effet de la fatigue sur les performances d'une ligne de production et, comme le montre (1.5), les auteurs ont proposé d'exprimer les durées opératoires impactées par la fatigue par une fonction logarithmique qui dépend du nombre de fois que le travailleur a répété une tâche.

Leur modèle est une adaptation du modèle proposé par Mummolo *et al.* (2004) où ils ont négligé l'effet de l'apprentissage ($\lambda \rightarrow 0$). Ainsi, l'équation (1.4) devient comme suit :

$$y(n) = y(1) + \tau' \ln(n) \quad (1.5)$$

Avec τ' est un nouveau paramètre de fatigue.

Selon Lodree Jr *et al.* (2009), les durées opératoires de tâches peuvent être une fonction du temps passé par le travailleur pour traiter ses tâches précédentes. Malheureusement, les auteurs n'ont pas indiqué comment ils le calculent, mais il est raisonnable de dire que ce temps supplémentaire dépend de la fatigue accumulée par le travailleur.

La détérioration des durées opératoires a un impact significatif sur les performances de la ligne de production. Par exemple, dans le travail de Digiesi *et al.* (2006), les auteurs ont évalué l'effet de l'augmentation des durées opératoires en fonction de la fatigue sur une ligne d'assemblage où l'opérateur doit réaliser une tâche répétitive. Leurs résultats ont montré une augmentation significative dans la quantité des encours et dans la durée moyenne de passage des pièces dans le système. En effet, les auteurs ont signalé que, vers la fin du quart de travail et en particulier dans le cas d'une fatigue sévère, les lots commencent à s'accumuler dans les stocks parce que les travailleurs deviennent plus lents. Les résultats obtenus par Ferjani *et al.* (2015, 2017) ont montré que, quel que soit l'effet de fatigue sur les durées opératoires (léger, modéré ou sévère), la durée moyenne de passage des pièces dans le système est fortement touchée par cette détérioration.

Une des conséquences néfastes de la fatigue sur les systèmes de production, qui peut engendrer des pertes importantes, est l'augmentation du taux d'erreurs ou encore des défauts de qualité. Lorsque les travailleurs commencent à se sentir fatigués, ils deviennent moins vigilants et perdent progressivement leur concentration, ce qui

peut entraîner des erreurs de qualité. Bien que des problèmes de qualité soient des conséquences logiques de la fatigue, il faut dire que, particulièrement dans le secteur industriel, il y a peu de travaux dans la littérature scientifique qui étudient ce problème.

Dans le travail de Dode *et al.* (2016), les auteurs ont montré qu'en prenant en compte la fatigue lors de la configuration d'un atelier de production une augmentation du rendement sur les investissements allant jusqu'à 39%. Les auteurs ont mentionné que le rendement de la ligne de production diminue avec l'augmentation de la fatigue.

Eklund (1995) ont montré que l'inconfort, à cause des postures pénibles qui entraînent la fatigue, se traduit directement par des défauts de qualité. Givi *et al.* (2015) ont proposé un modèle pour estimer la probabilité de l'erreur d'un opérateur (Probability of human error PHE) tout en se basant sur son niveau d'expérience et de fatigue. Le modèle est basé sur deux indicateurs : indicateur d'apprentissage normalisé (Normalized Learning Score NLS) et l'indicateur de fatigue normalisé (Normalized Fatigue Score NFS) qui sont déterminés, respectivement, par les équations (1.6) et (1.7) :

$$NLS = T_x/T_l \quad (1.6)$$

$$NFS = F(t)/F_{max} \quad (1.7)$$

Avec, T_x est la durée requise par l'opérateur pour réaliser sa tâche (durée impactée seulement par l'apprentissage), T_l la durée opératoire "théorique", $F(t)$ est la fonction d'accumulation de fatigue et F_{max} est le niveau de fatigue maximale ($F_{max} \leq 1$). En utilisant ces deux indicateurs, Givi *et al.* (2015) ont défini la fonction d'utilité $U(f, l)$ suivante :

$$U(f, l) = w_1 NFS + w_2 NLS \quad (1.8)$$

Les coefficients w_1 et w_2 décrivent l'impact de la fatigue et l'apprentissage sur la fréquence d'erreurs. La probabilité d'erreurs PHE est donnée par (1.9).

$$PHE = \alpha \log(U(f, l)) \quad (1.9)$$

Dans (1.9), α est alors utilisé pour calibrer PHE . D'après Elmaraghy *et al.* (2008), le taux d'erreurs varie généralement entre 10^{-6} et 1. Le travail dans des conditions pénibles induisant l'épuisement de travailleurs conduit naturellement à des arrêts de travail et donc à une augmentation du taux d'absentéisme.

5.2 Troubles de santé

La fatigue peut à court terme entraîner une dégradation du bien-être de l'opérateur au travail mais, à long terme, elle peut conduire à divers problèmes de santé. Par exemple, Van Cauter *et al.* (2008) ont montré que des problèmes de réduction de la durée du sommeil, d'obésité et de diabète peuvent être liés à la fatigue au travail. D'après Ma *et al.* (2009), la fatigue peut réduire la puissance musculaire induisant, par conséquent, l'inconfort, la douleur et, à long terme, contribue à des troubles musculo-squelettiques du membre supérieur ou du rachis. Ces troubles représentent depuis plusieurs années la première des maladies professionnelles reconnues en France.

Compte tenu de la contribution de la fatigue aux troubles musculo-squelettiques et pour des objectifs de prévention, nous remarquons que les chercheurs évoquent beaucoup les troubles musculo-squelettiques et l'impact de la fatigue sur la santé et le bien-être des opérateurs au travail (Ma *et al.* (2009), Cuny-Guerrier *et al.* (2015)).

Une autre conséquence naturelle de la fatigue, quelle que soit physique ou mentale, est le stress (Elkosantini et Gien (2009)). Nous pouvons tous passer par des moments de stress dans notre vie professionnelle, mais lorsque le stress devient chronique, à ce moment nous parlons plus du Burn-out. Le Burn-out est un état dépressif

lié à l'épuisement à cause des journées de travail longues et fatigantes, au surcharge de travail, à la pression des délais, etc. (Dawson *et al.* (2011)).

5.3 Risques de sécurité

Au travail, la fatigue peut constituer un risque important. D'après Dawson *et al.* (2011), la fatigue induite par le travail posté a été clairement identifiée comme un facteur de risque important augmentant la probabilité d'accidents et de blessures. La recherche a montré que la fatigue qui résulte particulièrement du travail de nuit peut être très dangereuse surtout dans le domaine du transport (conducteurs de camions). C'est qu'à cause de la fatigue, le temps de réaction peut être allongé, la concentration et la mémoire peuvent être altérées. Par conséquent, l'opérateur risque beaucoup plus de commettre une erreur critique pour sa sécurité et même la sécurité de ses collègues et pour celle des installations. Une revue de la littérature sur la relation entre la fatigue et les accidents de la route est fournie par Williamson *et al.* (2011).

Pour des objectifs de préventions de risques de fatigue, certains scientifiques ont cherché à trouver la meilleure organisation des heures de travail (Dawson *et al.* (2011)), alors que d'autres se sont focalisés sur la répartition adéquate de pauses durant le travail (Jaber *et al.* (2013); Dembe *et al.* (2005)).

6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence quelques définitions proposées sur la fatigue, en particulier dans le contexte des systèmes de production. Bien que de nombreux travaux scientifiques en ergonomie portent sur la fatigue des opérateurs, aucune définition scientifique et universelle pour la fatigue ne semble être trouvée

dans la littérature. Ceci est possiblement dû à la diversité des contextes de travail et des facteurs agissant sur l'accumulation et la récupération dans chaque contexte.

Nous avons également identifié les facteurs les plus impactant sur la fatigue des opérateurs et qui peuvent être pris en considération pour l'évaluation des ateliers de production. Nous avons mis particulièrement l'accent sur la pénibilité au travail qui constitue l'un des principaux facteurs d'accumulation de fatigue dans les systèmes manufacturiers. Nous avons également constaté qu'il est souvent difficile de mesurer la pénibilité et de l'exprimer d'une façon précise à cause de la diversité de ses facteurs et la manque de données exactes.

Nous avons identifié quelques conséquences de la fatigue des opérateurs sur les performances des systèmes. Nous mentionnons surtout la détérioration des durées opératoires, qui doit être prise en considération dans les approches d'ordonnement, de planification et d'organisation des ateliers de production afin de prendre des décisions pertinentes et plus réalistes.

Dans la suite de ce manuscrit, nous nous intéressons plus particulièrement à la fatigue physique des opérateurs, notamment à la fatigue générée par le travail en milieu industriel. Dans le chapitre suivant, nous allons nous concentrer tout particulièrement sur les travaux qui s'intéressent à la simulation et nous allons voir comment la fatigue a été prise en compte dans la simulation des systèmes de production.

Chapitre 2

Modélisation, Quantification et Évaluation de la Fatigue et de ses Impacts dans les Systèmes de Production

1 Introduction

D'après l'analyse bibliographique faite dans le chapitre précédent, nous avons constaté que la fatigue des opérateurs dépend énormément du secteur d'activité dans lequel elle a été étudiée. Néanmoins, elle résulte principalement de la quantité de travail réalisée. Lorsque l'opérateur réalise une tâche et exerce un effort physique, il/elle accumule de la fatigue. En revanche, les pauses aident à soulager la fatigue du corps et permettent au travailleur de retrouver sa force et sa capacité normale. Ainsi, comment décrire l'impact des périodes de travail et de repos sur la fatigue de l'opérateur et comment déterminer sa capacité maximale à exercer une force physique représentent des défis pour les chercheurs, notamment en ergonomie.

Dans ce chapitre, nous présenterons dans un premier temps une revue de la littérature sur les modèles de quantification de fatigue proposés dans la littérature ergonomique. Ensuite, nous nous focalisons particulièrement sur les travaux de re-

cherche qui s'intéressent à la simulation des systèmes de production et qui ont pris en compte la fatigue des opérateurs. Nous présenterons donc, dans la deuxième partie de ce chapitre, l'intérêt de l'usage de la simulation pour étudier les ateliers de production, comment la fatigue des opérateurs a été prise en compte dans les travaux existants qui utilisent la simulation et quelles sont les limites de ces travaux.

2 Modèles et outils ergonomiques pour la quantification de la fatigue

2.1 Méthodes basées sur l'observation pour l'analyse de la posture

Comme nous avons vu dans le chapitre précédent, la pénibilité au travail représente souvent le facteur principal pour l'accumulation de la fatigue de travailleurs dans les systèmes de production. Particulièrement, l'inconfort ou la pénibilité de la posture du corps durant le travail a attiré l'attention de plusieurs ergonomes qui ont mis l'accent sur la posture du corps pour évaluer la fatigue musculaire (Ma *et al.* (2009)). Ils ont considéré que l'estimation de la fatigue musculaire revient principalement à analyser l'inconfort de la posture : plus la posture est inconfortable, plus l'individu devient fatigué. Ainsi, il était nécessaire de trouver une méthode efficace qui permet d'analyser l'inconfort due à la posture.

A cet égard, plusieurs outils et méthodes ergonomiques ont été développés et la plupart d'entre eux ont été répertoriés, classés et comparés dans le travail de Li et Buckle (1999). La majorité des méthodes citées se sont basées sur l'observation pour l'analyse de la posture du corps. Parmi ces méthodes, nous citons :

- **Posturegram** : cette méthode a été développée par Priel (1974), elle implique l'enregistrement des postures sur des cartes de papier appelée "Posturegram". Il faut dire qu'avant le développement de cette méthode, les analystes ont

réalisé l'enregistrement au moyen de dessins ou de photographies. Avec les Posturegram, l'analyste doit observer, sélectionner puis esquisser une posture d'intérêt, puis catégoriser la posture du corps en fonction de 14 différentes positions des membres supérieurs et inférieurs par rapport à trois plans de référence orthogonaux. La procédure permet l'adaptation des postures enregistrées à la transmission et au traitement de données numériques. Toutefois, cette méthode nécessite plusieurs minutes pour que l'analyste complète une posture unique ce qui le rend, par conséquent, inadaptée aux activités dynamiques.

- **Ovako Working Posture Analyzing System (OWAS)** : cette méthode a été développée par Ovako Oy Steel Co. OWAS définit les mouvements des segments du corps autour du bas du dos, de l'épaule et de l'extrémité inférieure (y compris la hanche, le genou et la cheville) selon quatre types : flexion, rotation, élévation et position. Pour utiliser cette méthode, l'analyste fait une observation instantanée de la posture et enregistre un code à quatre chiffres, représentant les positions du dos (quatre choix), les bras (trois choix), les jambes (sept choix) et la force. Ainsi, la procédure d'enregistrement ne nécessite que quelques secondes, elle peut donc être utilisée pour une large variété de tâches.
- **Posture Targeting** : cette technique a été développée par Corlett *et al.* (1979). La posture est enregistrée sur une carte qui contient quatre différentes configurations posturales pour la jambe, le pied et le bras. La méthode possède des caractéristiques permettant l'identification de différentes postures, ainsi que leur fréquence d'occurrence. Cependant, le temps requis pour compléter la carte est souvent supérieur à 40 s, ce qui peut être trop long pour les situations où les postures changent rapidement.

- **Rapid Upper Limb Assessment System (RULA)** : ce système est conçu pour évaluer l'intensité de la charge posturale. Il adopte le concept d'OWAS en utilisant des nombres pour représenter les postures avec un système de codage associé. La gamme de mouvement pour les parties supérieures du corps (tête, tronc, bras supérieur et inférieur, poignet) est divisée en sections numérotées. Si une abduction ou une rotation est impliquée, la notation est décrite à côté du diagramme. En plus des enregistrements de posture, RULA considère également la charge sur le système musculo-squelettique causée par le travail musculaire statique ou répétitif, de sorte qu'une liste d'actions peut être produite (Li et Buckle (1999)). Ceci indique le niveau d'intervention requis pour réduire les risques de blessures dus à une charge physique sur l'opérateur.

Le point commun entre les méthodes basées sur l'observation est l'évaluation objective de la fatigue en se basant principalement sur la posture. D'après Ma *et al.* (2009), la variabilité et la subjectivité des individus peuvent influencer les résultats de l'évaluation en utilisant les mêmes méthodes d'observation pour la même tâche. En plus, ces méthodes sont limitées à des postures bien déterminées et dans des conditions de travail bien déterminées aussi, ce qui signifie qu'elles sont plus adaptées à l'analyse de la fatigue dans un processus de travail statique.

2.2 Méthodes d'auto-évaluation

Outre les méthodes basées sur l'observation pour l'analyse de la posture, il existe des techniques et outils qui permettent l'auto-évaluation de la fatigue. Autrement dit, les travailleurs sont tenus de donner leur propre évaluation de la fatigue. Pour certains ergonomes (Perez *et al.* (2014); Ma *et al.* (2009)), il est important de se concentrer sur la sensation et la perception de travailleurs de leur fatigue. Ils pré-

tendent même que "Si la personne vous dit qu'il est fatigué et n'est plus efficace, alors il est fatigué quel que soit le comportement ou les performances qu'il montre".

Les méthodes subjectives de perception de fatigue sont très populaires. Parmi ces méthodes, nous trouvons, dans le travail de Stanton (2004), une technique pour l'analyse de la fatigue, soit l'analyse de la fatigue musculaire (AMF). Cette technique a été développée par Rodgers et Williams en 1987 pour caractériser la sensation d'inconfort décrite par les travailleurs sur les lignes d'assemblage automobile et les tâches de fabrication. Dans cette méthode, chaque partie du corps est mise à l'échelle en quatre niveaux d'effort en fonction de la posture de travail, au même temps, la durée de l'effort musculaire et la fréquence sont toutes les deux échelonnées en quatre niveaux d'effort. La combinaison des niveaux des trois facteurs peut déterminer le score qui implique la priorité à changer la tâche.

D'autres méthodes d'auto-évaluation sont présentées dans le travail de Ma *et al.* (2009). Nous citons par exemple, la méthode "Body-map" (Corlett et Bishop (1976)), les échelles d'évaluation (Borg (1998)), les questionnaires ou les interviews et les listes de contrôle (checklists) (Ma *et al.* (2009)).

Bien que les méthodes d'auto-évaluation sont les plus couramment utilisées, notamment les approches basées sur les questionnaires car elles sont pratiques, flexibles et les résultats peuvent être obtenus rapidement, ces méthodes restent vulnérables à de nombreuses influences. Par exemple, les travailleurs sondés peuvent ne pas être honnêtes à 100% dans leurs réponses et ceci éventuellement pour bénéficier de plus de repos. D'après Ma *et al.* (2009), les résultats fournis par ce type d'approches ne sont pas toujours fiables.

2.3 Estimation de la durée d'endurance maximale (MET)

La fatigue musculaire se développe lorsque la vitesse et le niveau des demandes musculaires chez l'individu dépassent la capacité physiologique de son muscle à se remettre de ces demandes. La recherche en physiologie du travail s'est principalement concentrée sur la prévision de la durée d'endurance maximale des individus (Maximum Endurance Time).

La durée d'endurance maximale (MET) est une mesure liée au travail musculaire statique. Elle représente la durée maximale pendant laquelle une charge musculaire statique peut être maintenue (généralement associée à une tâche de travail) (Imbeau *et al.* (2006)). Le MET est notamment utilisé pour déterminer une durée acceptable durant laquelle une personne peut maintenir une contraction musculaire statique. Ainsi, lorsque le travailleur atteint le MET, certains ergonomes (par exemple, Imbeau *et al.* (2006), Perez *et al.* (2014) et Jaber *et al.* (2013)) supposent qu'il/elle a également atteint un niveau de fatigue de 100%, ce qui implique qu'il/elle est incapable de maintenir les niveaux de charge.

Le MET est souvent calculé en fonction du pourcentage de la contraction volontaire maximale (%MVC) ou de la force relative ($fMVC = \%MVC/100$) requise pour la réalisation d'une tâche. Comme l'illustre la figure 2.1, Imbeau *et al.* (2006) ont classé les modèles existants sur le MET par type du muscle considéré. Nous trouvons, par exemple, que le premier groupe (1-7) est constitué de modèles génériques, c'est-à-dire qu'ils peuvent être adaptés à n'importe quel type de muscle. Cependant, pour le deuxième groupe (8-11), les modèles ne peuvent être appliqués que lorsque le muscle étudié est l'épaule. Les modèles existants sont soit de forme exponentielle, par exemple $MET = \beta_0 * e^{-\beta fMVC}$, ou puissance, par exemple $MET = \alpha_0 * fMVC^{-\alpha}$, avec, MET est mesuré en minutes et β_0 , β , α_0 et α sont des paramètres spécifiques à chaque modèle.

Bien que les chercheurs se sont concentrés principalement sur le développement des modèles mathématiques pour l'estimation du MET, il est important de noter que ces modèles sont limités dans le sens où ils prédisent la "fatigue maximale" sous une charge $fMVC$ donnée, mais ne fournissent aucune indication sur la forme de la fonction d'accumulation de fatigue ou révèlent l'état de fatigue au cours de l'exécution de la tâche (Jaber *et al.* (2013); Ferjani *et al.* (2017)).

No	Model	Standardized formulation (MET in minutes)	Number of subjects
<i>General models</i>			
1	Rohmert (1960)	$MET = -1.5 + \frac{21}{fMVC} - \frac{0.6}{fMVC^2} + \frac{0.1}{fMVC^3}$	38
2	Monod and Scherrer (1965)	$MET = 0.4167 \times (fMVC - 0.14)^{-2.4}$	(*)
3	Huijgens (1981)	$MET = 0.865 \times \left[\frac{1-fMVC}{fMVC-0.13} \right]^{1/1.4}$	(*)
4	Sato et al. (1984)	$MET = 0.3802 \times (fMVC - 0.04)^{-1.44}$	5
5	Manenica (1986)	$MET = 14.88 \times \exp(-4.48fMVC)$	18
6	Sjogaard (1986)	$MET = 0.2997 \times fMVC^{-2.14}$	(*)
7	Rose et al. (1992) (General)	$MET = 7.96 \times \exp(-4.16fMVC)$	8
Upper limbs (total number of subjects and situations 142)			
<i>Shoulder (Equivalent number of subjects : 64)</i>			
8	Sato et al. (1984)	$MET = 0.398 \times fMVC^{-1.29}$	5
9	Rohmert et al. (1986) (Posture 1)	$MET = 0.2955 \times fMVC^{-1.658}$	7
10	Mathiassen and Ahsberg (1999)	$MET = 40.6094 \times \exp(-9.7fMVC)$	40
11	Garg et al. (2002)	$MET = 0.5618 \times fMVC^{-1.7551}$	12
<i>Elbow (60)</i>			
12	Hagberg (1981)	$MET = 0.298 \times fMVC^{-2.14}$	9
13	Manenica (1986)	$MET = 20.6972 \times \exp(-4.5fMVC)$	18
14	Sato et al. (1984) (Elbow)	$MET = 0.195 \times fMVC^{-2.52}$	5
15	Rohmert et al. (1986) (Posture 2)	$MET = 0.2285 \times fMVC^{-1.391}$	7
16	Rose et al. (2000)	$MET = 20.6 \times \exp(-6.04fMVC)$	13
17	Rose et al. (1992) (Elbow joint)	$MET = 10.23 \times \exp(-4.69fMVC)$	8
<i>Hand (18)</i>			
18	Manenica (1986) (hand grip)	$MET = 16.6099 \times \exp(-4.5fMVC)$	18
<i>Back/Hip (Total number of subjects and situations 75)</i>			
19	Manenica (1986) (body pull)	$MET = 27.6604 \times \exp(-4.2fMVC)$	18
20	Manenica (1986) (body torque)	$MET = 12.4286 \times \exp(-4.3fMVC)$	18
21	Manenica (1986) (back muscles)	$MET = 32.7859 \times \exp(-4.9fMVC)$	18
22	Rohmert et al. (1986) (posture 3)	$MET = 0.3001 \times fMVC^{-2.803}$	7
23	Rohmert et al. (1986) (posture 4)	$MET = 1.2301 \times fMVC^{-1.308}$	7
24	Rohmert et al. (1986) (posture 5)	$MET = 3.2613 \times fMVC^{-1.256}$	7

FIGURE 2.1 – Liste des modèles de MET dans la revue de la littérature réalisée par Imbeau *et al.* (2006).

En outre, les modèles de MET existants sont souvent concentrés sur le travail statique où les travailleurs répètent les même tâches durant leur travail. D'après Ma *et al.* (2011b), les principales limites de ce type de modèles sont :

- La relation physique dans ces modèles ne peut pas être interprétée directement par la physiologie musculaire, et il n'y a pas d'universalité parmi ces modèles.
- Tous les modèles MET ont été obtenus en ajustant les résultats expérimentaux en utilisant différentes formules et équations. Il a été constaté que la fatigue musculaire peut varier à travers les muscles et les articulations. Cependant, il n'y a pas de formulation générale pour ces modèles.
- Des différences ont été trouvées entre les résultats obtenus par les modèles de MET pour différents groupes musculaires, pour différentes postures, et même pour différents modèles pour le même groupe musculaire.

Compte tenu de ces limitations, Ma *et al.* (2011b) ont souligné la nécessité de développer un modèle MET général capable de remplacer tous les modèles MET expérimentaux et d'expliquer toutes les différences qui traversent ces modèles.

En ce qui concerne les modèles d'allocation de repos (Rest Allowance RA), les chercheurs se sont intéressés à l'estimation de la durée nécessaire pour un repos adéquat après un effort statique. Les modèles de RA existants sont généralement exprimés en pourcentage du temps de maintien, défini comme le temps pendant lequel un effort statique, une posture statique ou une combinaison des deux est maintenue sans interruption (Imbeau *et al.* (2009)).

Comme illustré sur la figure (2.2), il existe dans la littérature scientifique quatre modèles d'allocation de repos pour le travail statique. Dans le travail de Imbeau *et al.* (2009), les auteurs ont mené une comparaison entre ces modèles et ils ont montré qu'il existe des écarts importants entre les résultats obtenus par les modèles. Par exemple, le modèle de Rose *et al.* (1992) a toujours recommandé des durées de repos plus élevées que les autres modèles. D'après Ma *et al.* (2009), ce dernier modèle est le plus utilisé dans la littérature.

Puisque la fatigue musculaire résulte également du cumul des périodes de travail entrecoupées par des périodes de repos, un grand nombre d'ergonomes ont souligné l'importance d'estimer l'effet des deux. Une approche consiste à appliquer les modèles existants pour l'estimation de MET et de RA a été proposé par Jaber et Neumann (2010). Des approches similaires ont été également proposées par Perez *et al.* (2014) et Dode *et al.* (2016) pour quantifier la fatigue.

Model	RA (%)	Main characteristics
Rohmert (1973)	$RA = 18 \times (fMHT)^{1.4} \times (fMVC - 0.15)^{0.5} \times 100$	%MVC and fMHT required no fatigue when %MVC < 15% Model based on static work data for 13 muscle groups (upper limbs, trunk, lower limbs)
Milner (1985) ^a	$RA = 0.164 \times \left[4.61 + \ln\left(\frac{1}{100 - (fMHT)^{-1}}\right) \right]^{-1} \times 100$	%MVC is not considered fMHT required MHT must be determined Posture without load applied on an external object For a static posture where hands are at 50% shoulder height and 100% forward reach: back and lower limbs were particularly stressed in this posture
Rose et al. (1992)	$RA = 3 \times MHT^{-1.52} \times 100$	MHT required Holding time not considered Construction work tasks
Byström and Fransson-Hall (1994)	$RA = \left[\frac{(fMVC)}{15} - 1 \right] \times 100$	No specific muscle group indicated for the model %MVC required %MHT not considered no fatigue when %MVC < 15% Intermittent work at hand/wrist Short holding time

FIGURE 2.2 – Les modèles d'allocation de repos existants dans la littérature (Imbeau *et al.* (2009)).

2.4 Indicateurs de fatigue

Nous avons vu dans les paragraphes précédentes que les méthodes d'auto-évaluation peuvent être soumises à de nombreux influences, les méthodes d'observation sont surtout liées à la posture alors que les modèles de MET et de RA s'intéressent souvent aux tâches répétitives. Dans le cadre de cette thèse, nous avons alors besoin d'un modèle général qui permet d'évaluer la fatigue d'une façon objective et dans un contexte de travail dynamique, c'est à dire lorsque le travailleur peut réaliser différents types de tâches. A cet égard, plusieurs indicateurs de fatigue ont été proposés dans la littérature scientifique.

Dans une série de publications (Wexler *et al.* (1997), Ding *et al.* (2000a,b)), Wexler et ses collègues ont proposé un indicateur de fatigue musculaire basé sur le

mécanisme du pont croisé Ca^{2+} . C'est un mécanisme physiologique qui permet de déterminer le niveau de contraction musculaire à travers le niveau de la concentration calcique intracellulaire parce que la contraction musculaire est le résultat d'une augmentation calcique intracellulaire et la relaxation est le résultat du retour de cette concentration à son niveau de repos. Les auteurs ont vérifié leur indicateur avec des expériences basées sur la stimulation.

Parce que leur indicateur est principalement basé sur le mécanisme physiologique, il semble complexe pour une application ergonomique à cause du nombre de ses variables. Par exemple, seulement pour les quadriceps, il existe plus de 20 variables pour décrire le mécanisme de fatigue musculaire ce qui rend difficile l'intégration de ce type d'indicateur pour évaluer la fatigue du corps entier.

Giat *et al.* (1993) ont développé un autre indicateur de fatigue musculaire basé sur la relation force- pH . Cet indicateur de fatigue a été obtenu par ajustement de la courbe du niveau de pH avec le temps au cours de l'accumulation et de la récupération de fatigue. Komura *et al.* (1999, 2000) ont utilisé cet indicateur en infographie pour évaluer la capacité musculaire et la faisabilité du mouvement. Toutefois, les auteurs n'ont pas évalué la fatigue musculaire de l'ensemble du processus de travail. Bien que l'indicateur de pH permette d'analyser mathématiquement la capacité du muscle à la génération de forces, toutes les influences des forces musculaires sur la fatigue n'ont pas été prises en considération.

Bien que les indicateurs, déjà mentionnés ci-avant, permettent d'avoir une idée plus objective et globale de l'état de fatigue de la personne, ils restent limités dans le sens qu'ils ne fournissent aucune indication sur comment la fatigue évolue dynamiquement au cours du temps, ni sur la forme de fonction d'accumulation ou de récupération. Tandis que certains chercheurs ont affirmé que la fatigue s'accumule exponentiellement avec le temps (par exemple, Konz (2000)), d'autres ont supposé qu'elle augmente d'une façon linéaire (par exemple, Kaneko et Sakamoto (2001)).

Toutefois, aucun travail n'a empiriquement ou expérimentalement montré que c'est le cas (Grosse *et al.* (2015)). Cela reste une question de recherche ouverte à aborder dans la littérature sur la physiologie humaine.

Néanmoins, il est important de souligner que les chercheurs en ergonomie accordent plus d'attention à l'indicateur de fatigue proposé par Konz (2000) qui suggère la forme exponentielle, notamment pour la fonction de récupération qui est caractérisée par un bénéfice maximal dans les premières phases de la période de récupération (Grosse *et al.* (2015)).

Dans son travail, Konz (2000) a supposé que l'accumulation et la récupération ont, respectivement, les formes suivantes :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.1)$$

$$R(\tau_i) = F(t) e^{-\mu \tau_i} \quad (2.2)$$

Avec, $F(t)$ est la fatigue accumulée durant le temps t et $R(\tau_i)$ est la fatigue résiduelle après une période de repos de durée $\tau_i \geq 0$: $R = 0$ représente une récupération complète (pas de fatigue résiduelle) et $R = 1$ représente la fatigue maximale. Dans les équations (2.1) et (2.2), λ et μ sont, respectivement, les paramètres de l'accumulation et la récupération $0 \leq \lambda, \mu \leq 1$. Ces paramètres contrôlent la vitesse d'accumulation de fatigue et l'atténuation de la récupération ; c'est-à-dire qu'une valeur faible de λ (μ) signifie une accumulation (récupération) lente alors qu'une valeur élevée signifie une accumulation (récupération) rapide de la fatigue.

Notez que l'équation (2.1) préconise que la fatigue s'accumule sur t à partir d'une valeur initiale de zéro, ce qui signifie qu'un rétablissement total a été atteint lors de la période de repos précédente. En pratique, les pauses de repos séparant les cycles de travail sont généralement courtes et ne permettent pas une récupération totale.

D'après Grosse *et al.* (2015) et comme l'illustre la figure 2.3, la fatigue résiduelle $R(\tau_i)$ doit être propagée dans les cycles suivants $(i + 1)$. D'après Jaber *et al.* (2013), l'équation (2.1) sera alors réécrite comme suit :

$$F_{i+1}(t) = R(\tau_i) + (1 - R(\tau_i)) (1 - e^{-\lambda (t_n - t_i)}) \quad (2.3)$$

Avec, t_n est le temps de production du cycle i et t_i est déterminé par la projection de la valeur de $R(\tau_i)$ sur la courbe d'accumulation, tel que,

$$t_i = -\ln(1 - R(\tau_i))/\lambda \quad (2.4)$$

Ainsi, la figure 2.3 décrit le comportement dynamique de la fatigue durant le travail selon Jaber *et al.* (2013) et l'alternance entre les périodes d'accumulation et de récupération au cours d'un cycle travail-repos répété.

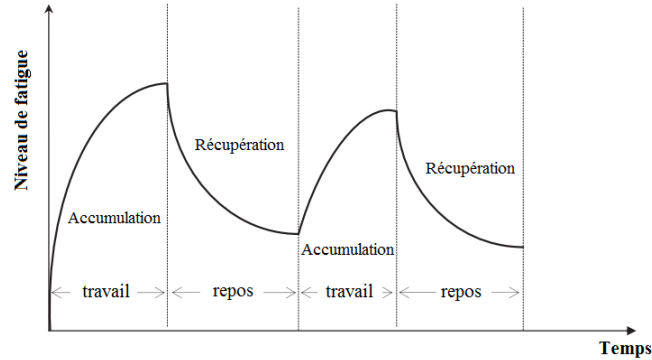


FIGURE 2.3 – Le comportement du processus d'accumulation et récupération de la fatigue durant le travail.

Dans un travail plus récent, Ma *et al.* (2009) ont proposé un indicateur dynamique pour l'évaluation de la fatigue musculaire qui prend en compte des paramètres liés à la fois à la tâche, tels que l'intensité, la répétitive et la durée de la force exercée, et à la capacité du muscle à exercer cette force. Le concept utilisé est le même que celui appliqué aux méthodes d'analyse de posture : plus la force exercée est impor-

tante, plus le travailleur peut ressentir de la fatigue et plus la capacité du muscle est faible, plus vite le muscle se fatigue.

Comme le présente l'équation (2.5), qui décrit l'évolution de la fatigue d'après Ma *et al.* (2009), l'indicateur de fatigue proposé $U(t)$ est une fonction de $F_{cem}(t)$ la capacité actuelle du muscle et de $F_{load}(t)$ la force que le muscle doit générer.

$$dU(t)/dt = MVC/F_{cem}(t) * F_{load}(t)/F_{cem}(t) \quad (2.5)$$

Bien que l'indicateur de fatigue de Konz (2000) soit très ancien et que de nouveaux indicateurs aient été proposés dans la littérature, il est important de noter qu'il est le plus utilisé jusqu'aujourd'hui. Par exemple, nous trouvons que cet indicateur a été utilisé conjointement avec un modèle d'apprentissage-oubli pour étudier les effets de ces deux phénomènes sur la productivité du système manufacturier et la qualité de produits (Jaber *et al.* (2013); Grosse *et al.* (2015)). Dans un autre travail, El Mouayni *et al.* (2016) ont également utilisé l'indicateur de Konz (2000) dans un algorithme pour simuler l'évolution de la fatigue (figure 2.9).

3 Usage de la simulation

3.1 Notions générales

La simulation s'est développée en parallèle avec la facilité d'accès et la puissance croissante des ordinateurs. Il s'agit en effet d'une méthode de recherche, d'analyse et d'évaluation puissante et originale et généralement efficace pour le traitement des problèmes difficiles. La simulation, en reproduisant de façon expérimentale des situations au plus proche de la réalité (figure 2.4), permet d'étudier et d'analyser des systèmes et des phénomènes complexes, tels que les systèmes de production.

La simulation est utilisée pour analyser et évaluer dynamiquement la performance des systèmes au fur et à mesure de leur évolution dans le temps. Technique-

ment et comme l'illustre la figure 2.4, la simulation permet la création d'un modèle informatisé d'un système réel ou en cours de construction dans le but de mener des expériences numériques, pour une meilleure compréhension de son comportement pour un ensemble de conditions donné. Il faut dire que la simulation est une approche plus flexible que les modèles analytiques et mathématiques et elle n'exige généralement pas les hypothèses restrictives faites avec les modèles analytiques.

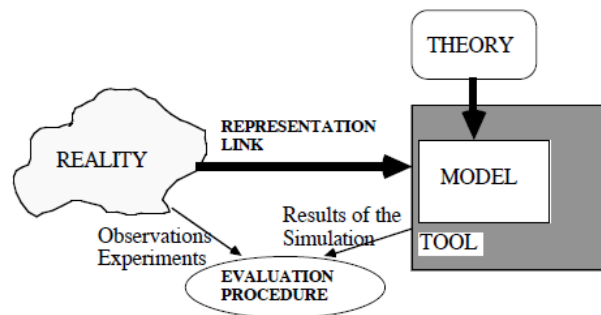


FIGURE 2.4 – Une représentation de la construction des modèles de simulation.

La simulation est largement utilisée dans les approches d'aide à la décision dans les systèmes de production. Un modèle de simulation permet de décrire les entités qui sont les éléments de base du système physique, leurs attributs et les différentes interactions entre ces entités afin de voir comment le système se comporte sur une période de temps. La notion du temps est extrêmement importante et nous distinguons deux types de modèles de simulation (Law *et al.* (1991); Law (2015); Kleijnen (2015)) : dans le premier, l'intérêt se porte sur les événements qui entraînent des changements de l'état du système, nous parlons ainsi de simulation à événement discret. Tandis que pour le deuxième type, des équations différentielles ou de récurrence sont souvent utilisées pour décrire l'évolution continue de l'état du système. Il est à noter que généralement dans les systèmes de production la simulation à événement discret est plus utilisée que la simulation continue (Pierreval (2006)).

La simulation, quelle que soit déterministe ou stochastique, a été largement utilisée pour l'évaluation, l'analyse, la conception, l'apprentissage et l'optimisation dans les systèmes de production (Ouzrout *et al.* (2009); Lim *et al.* (2017)). Toutefois, il semble que les aspects humains des opérateurs, à savoir que la fatigue, sont rarement pris en compte dans les modèles de simulation existants ce qui peut conduire à des résultats inexacts et même parfois erronés (Dode *et al.* (2016)).

Dans la suite, nous allons donc présenter les rares travaux scientifiques qui ont pris en compte la fatigue dans la simulation des systèmes manufacturiers. Notre objectif est d'identifier leurs limites afin de pouvoir se positionner. En effet, nous pouvons distinguer principalement deux types d'usage de la simulation : le premier est purement à des fins d'ergonomie. Il consiste à simuler l'opérateur et/ou la posture de travail pour réaliser des analyses ergonomiques. Le deuxième usage consiste à fournir quelques données, souvent temporelles, sur le déroulement du travail et sur les tâches réalisées afin d'évaluer l'impact de la fatigue sur les performances industrielles.

3.2 Analyse par simulation de la posture de travail

Au cours des vingt dernières années, les processus de conception ont profondément évolués afin de mieux prendre en compte des nouvelles contraintes industrielles (raccourcissement du cycle de vie des produits, évolutions rapides des marchés, produits plus personnalisés, etc.). Cette évolution a été accompagnée de progrès des technologies informatiques ce qui a donné naissance à des nouvelles outils et logiciels de simulation. Parmi ces outils, nous trouvons les humains virtuels (HV), appelés également les "mannequins numériques", qui ont connu un développement notable.

Il s'agit d'une technique de modélisation numérique (digital) qui considère l'être humain au centre du processus de conception de systèmes, ses fonctions principales sont l'analyse et la prédiction de la posture de travail. Parmi les HV, on cite Jack

(Badler *et al.* (1993)), Ergo-Man (Schaub *et al.* (1997)), 3DSSPP (Chaffin (1969)), Santos (Group *et al.* (2004)), RAMSIS (Bubb *et al.* (2006)), Any-Body (Damsgaard *et al.* (2006)) et OpenGL (Ma *et al.* (2011a)).

Ces techniques de simulation sont de plus en plus utilisées dans les industries car elles permettent aux concepteurs et aux managers de représenter et de mettre en situation des opérateurs virtuels (Haesen (2009)) avant même la réalisation de prototypes physiques du futur poste de travail. Grâce à ces outils, un concepteur de poste de travail peut définir les mouvements du futur opérateur comme il peut évaluer les contraintes futures d'une situation de travail. Les HV peuvent donc contribuer à l'application des principes de sécurité dès la phase de conception ce qui permet de favoriser une conception ergonomique plus fiable des postes de travail. C'est pourquoi, ces techniques ont été largement utilisées dans le design des postes de travail afin de prendre en compte certains facteurs humains y compris la fatigue.

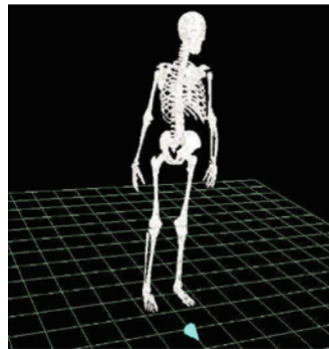


FIGURE 2.5 – Le squelette virtuel du modèle OpenGL (Ma *et al.* (2011a)).

Quelques chercheurs ont proposé d'intégrer certains modèles de fatigue dans certains HV pour prédire la fatigue et/ou la force physique due à la posture de travail. Par exemple, Ding *et al.* (2000b) ont intégré l'indicateur de fatigue de Wexler *et al.* (1997) dans le HV Santos pour prédire la variation de la force physique.

Dans son travail, Ma *et al.* (2011a) ont proposé une nouvelle plateforme (Virtual Reality & Human Interface Technology laboratory (VRHIT)) pour la conception des

HV (voir un exemple de HV dans la figure 2.5) qui intègrent la fatigue. La plateforme proposé combine à la fois des techniques de simulation de HV avec l'indicateur de fatigue de Ma *et al.* (2009) afin d'évaluer la difficulté des opérations de manutention manuelle. Les auteurs ont appliqué leur approche sur un cas réel d'un opérateur sur une ligne d'assemblage d'un avion où ils ont simulé les différentes postures et mouvements possibles pour cet opérateurs. Ma *et al.* (2011a) ont évalué la fatigue à travers la réduction de la capacité physique de l'opérateur à exercer la force requise.

Bien que l'intégration de modèles de quantification de fatigue dans certaines applications de HV représente une approche intéressante et efficace pour l'analyse de la posture et l'évaluation de la fatigue, cette technique reste souvent liée à la tâche ou l'effort musculaire exercé par l'opérateur. Ainsi, il est nécessaire de décrire les actions élémentaires constituant l'activité, la géométrie du poste, la taille et la masse du produit à manipuler, ainsi que la description de l'opérateur (anthropométrie).

Il est important de noter que dans notre thèse, nous ne nous intéressons pas à ce type de simulation parce qu'il est particulièrement concentré sur l'opérateur humain, alors que nous cherchons à étudier le système manufacturier en entier. Dans les HV, nous remarquons bien que plusieurs caractéristiques de l'environnement de production (déplacement entre les machines, bruit, etc.) ne sont pas pris en considération et nous soulignons surtout l'aspect temporel qui est souvent négligé.

L'accent a été principalement mis sur l'opérateur alors que l'environnement de production et le déroulement de travail ne sont pas pris en considération. Nous constatons que les chercheurs, qui ont utilisé ce type d'approches de simulation, se sont intéressés plus à l'aspect ergonomique et ils ont négligé l'impact du contexte de production même s'il est évident que ce dernier est étroitement lié à la productivité des opérateurs et leur bien-être au travail.

3.3 Évaluation de l'impact de la fatigue sur les performances du système

La simulation représente une technique d'évaluation très puissante. Elle était largement utilisée dans les systèmes de production pour évaluer différentes stratégies d'ordonnancement, de pilotage, d'affectation, etc. Dans ce contexte Digiesi *et al.* (2006) ont utilisé la simulation à événement discret (SED) pour étudier l'effet de la variabilité des durées opératoires de tâches à cause de la fatigue des opérateurs sur la durée moyenne de passage de pièces dans le système.

Digiesi *et al.* (2006) ont considéré que les durées opératoires peuvent se détériorer en fonction de la fatigue de l'opérateur. Les auteurs ont utilisé le modèle de Mummolo *et al.* (2004) pour calculer les durées opératoires impactées par la fatigue et par l'apprentissage. Leurs résultats ont montré que la durée moyenne de passage de pièces dans le système a été fortement touchée par la variabilité des durées opératoires de tâches.

Dans le travail de Digiesi *et al.* (2009) qui représente une extension du travail de Digiesi *et al.* (2006), les auteurs ont négligé l'effet de l'apprentissage sur les durées opératoires pour étudier l'impact de différents niveaux de fatigue sur les performances du système. Dans les deux travaux déjà cités, les auteurs ont simulé l'impact du nombre de répétition d'une tâche sur la dégradation des durées opératoires et sur certaines performances, telles que la durée moyenne de passage de pièces dans le système et la quantité des encours. Ainsi, il ne s'agit pas d'une simulation d'un atelier de production et il n'y a aucune considération sur l'environnement de travail, le comportement des opérateurs et sur l'évolution de la fatigue.

Dans (Ferjani *et al.* (2015)) et (Ferjani *et al.* (2017)), les auteurs ont proposé une heuristique d'affectation basée sur un choix multi-critères pour affecter les opérateurs dynamiquement et en ligne aux différentes machines du système afin de réduire

la durée moyenne de passage de pièces dans le système (Mean Flowtime MFT). Dans ces deux derniers travaux, les auteurs ont utilisé la simulation avec l'optimisation pour déterminer les poids de pondération des critères de leur heuristiques d'affectation. Le modèle de simulation a été donc utilisé pour l'évaluation de l'heuristique proposée. Les opérateurs ont été représentés par des simple ressources inanimées. Comme le paradigme utilisé est la simulation à évènement discret, la fatigue a été quantifiée d'une façon discrète, à chaque fois l'opérateur est affecté à une machine. En outre, les auteurs n'ont pas pris en considération les périodes de récupération ce qui n'est pas très réaliste.

Dode *et al.* (2016) ont proposé une approche pour évaluer des configurations d'une ligne d'assemblage de produits électroniques. Leur objectif est d'estimer les erreurs de qualité dû à la fatigue. Comme l'illustre la figure 2.6, Dode *et al.* (2016) ont simulé le processus de production en se basant sur des informations collectées d'une ligne d'assemblage existante (par exemple, les distributions du temps du cycle et de pause et le calendrier de pauses). L'intérêt du modèle de simulation est de déterminer, selon les informations entrées, les temps des cycles et de pauses, la quantité des encours et le taux d'utilisation des opérateurs.

D'après la figure (2.6), nous pouvons bien remarquer que Dode *et al.* (2016) n'ont pas pris en compte la fatigue dans leur modèle de simulation. En effet, elle a été calculée séparément dans un fichier excel selon le temps du cycle et de pauses fournies par le modèle de simulation.

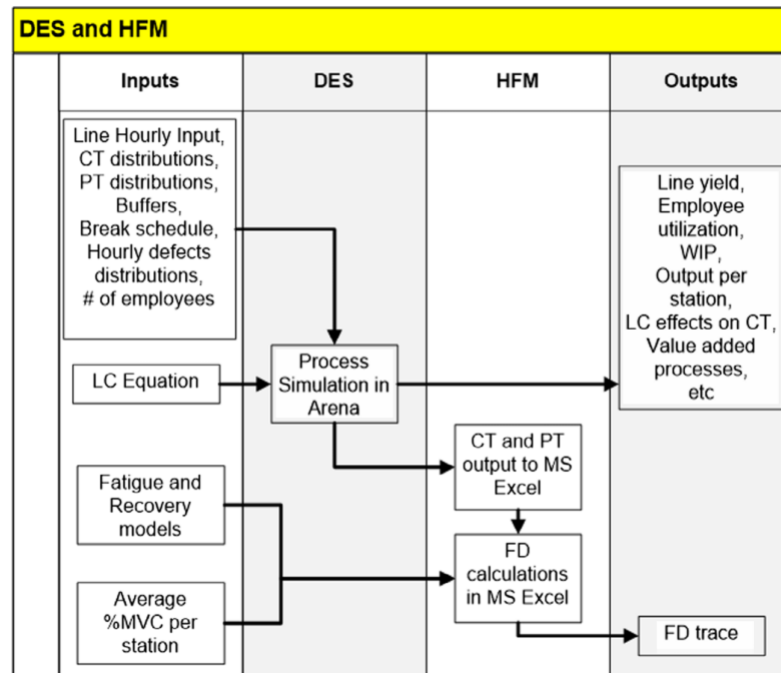


FIGURE 2.6 – Présentation de l'approche proposée par Dode *et al.* (2016).

La prise en compte de la fatigue dans la phase de conception de nouveaux systèmes de production représente un défi pour les praticiens. Parce que en absence de l'opérateur humain, il est difficile de quantifier sa fatigue surtout que la majorité des méthodes de quantification existantes s'appuient sur des informations collectées directement de l'opérateur soit par l'observation ou les questionnaires. Pour surmonter cette difficulté, Perez *et al.* (2014) ont pensé qu'il fallait tirer profit du potentiel de la SED. Les auteurs ont proposé de simuler la ligne de production d'un système d'assemblage de rasoirs électriques pour évaluer l'impact d'une configuration donnée sur l'évolution de la fatigue. Tout comme dans le travail de Dode *et al.* (2016) et comme l'illustre la figure (2.7), le modèle de simulation est utilisé pour fournir le schéma temporel de la production qui indique les périodes de travail et de repos. Le modèle de quantification de fatigue a été appliqué par la suite sur le schéma temporel pour générer la courbe décrivant l'évolution de la fatigue.

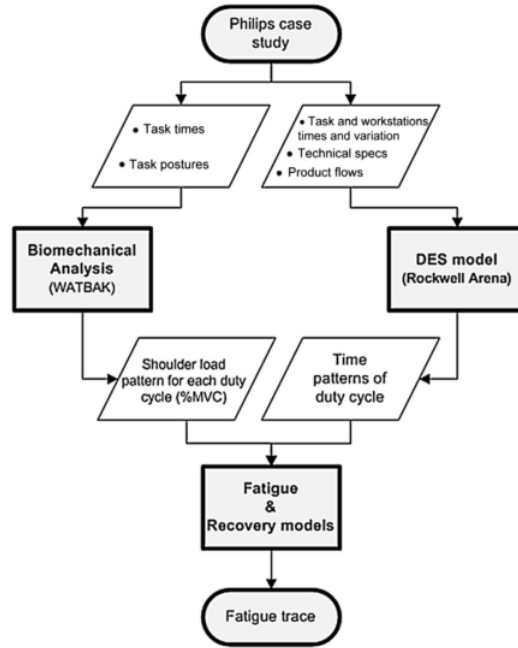


FIGURE 2.7 – Approche proposée par Perez *et al.* (2014) pour l’évaluation des configurations d’atelier de production.

Dans la figure (2.8), nous remarquons que chaque opérateur est associé à une seule machine dans le système et répète la même tâche durant son travail. Il s’agit donc d’un travail répétitif. D’ailleurs, les auteurs dans (Perez *et al.* (2014)) ont utilisé des modèles de MET et RA pour la quantification de la fatigue.

Dans le même contexte celui de la configuration des systèmes manufacturiers, El Mouayni *et al.* (2016) ont proposé une approche basée sur SED pour comparer deux différentes configurations d’une ligne de production composée de 6 postes de travail. Les auteurs ont proposé un algorithme pour simuler l’évolution de la fatigue. Nous ne parlons donc pas d’un modèle de simulation d’un atelier de production. Il s’agit tout simplement d’un algorithme où les auteurs ont utilisé l’indicateur de Konz (2000) pour quantifier la fatigue des opérateurs.

Comme l’illustre la figure 2.9, la fatigue est calculée en utilisant les fonctions *fatigueUp()* et *fatigueDown()* qui s’exécutent d’une façon cyclique après un certain

délai que les auteurs n'ont pas expliqué dans leur travail. Ceci implique que la fatigue est calculée d'une manière discrète, après l'écoulement de ce délai.

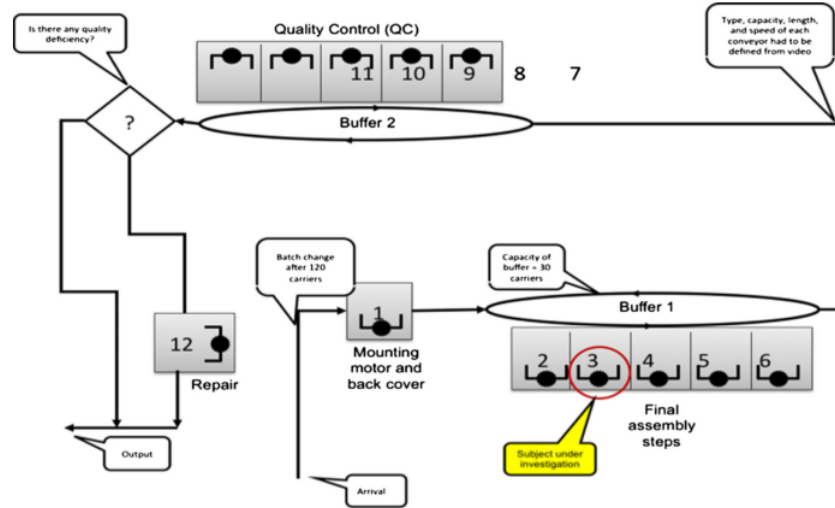


FIGURE 2.8 – Le modèle de simulation utilisé par Perez *et al.* (2014).

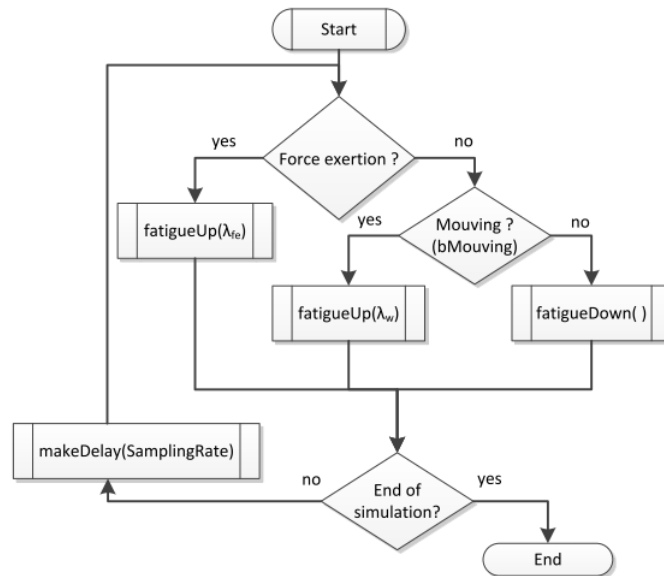


FIGURE 2.9 – L'algorithme de simulation de fatigue proposé par El Mouayni *et al.* (2016).

Dans la plupart des travaux mentionnés dans cette section, les modèles de simulation des systèmes industriels ont été utilisés pour collecter des informations sur

le processus de production. Ces informations sont utilisées pour calculer la fatigue d'une façon discrète ce qui n'est pas judicieux pour un phénomène continu.

En outre, la fatigue n'est pas prise en compte dans le modèle de simulation lui-même. Elle a été souvent calculée a posteriori (par exemple dans un fichier excel). Autrement dit, la quantification de fatigue se fait d'une manière statique dans la plupart de ces travaux, c'est-à-dire après avoir obtenu les informations nécessaires sur les tâches à réaliser. Toutefois, les systèmes de production sont souvent caractérisés par un comportement dynamique et changeant et sujettes à des événements imprévisibles (des pannes, absence des opérateurs, etc.) qui a un impact énorme sur les activités des opérateurs durant le travail et par conséquent sur l'évolution de leur fatigue. Il est donc nécessaire de prendre en compte l'aspect dynamique du comportement de fatigue. En outre, les conditions de travail dans les ateliers de production sont souvent pénibles ce qui accélère d'avantage l'accumulation de la fatigue durant le travail. Par conséquent, il est nécessaire de prendre en compte la pénibilité au travail.

La fatigue était parmi les facteurs qui ont été pris en compte dans le modèle comportemental de Elkosantini et Gien (2009). Elle a été considérée comme le résultat de l'effort physique exercé par l'opérateur durant le traitement d'une tâche. Les auteurs ont utilisé des équations différentielles pour calculer la variation du niveau de fatigue. Au début, la fatigue a été mesurée d'une façon numérique, puis, les auteurs ont étendu leur modèle pour décrire le niveau de fatigue avec des variables linguistiques floues et ils ont utilisé le principe d'extension pour résoudre leurs équations différentielles floues (Zadeh (1988)).

Bien que Elkosantini et Gien (2009) et Elkosantini (2015) aient pris en compte les conditions de travail dans leurs modèles, même s'ils n'ont pas vraiment précisé quelles sont ces conditions, les auteurs ont supposé que la fatigue dépend uniquement

de l'effort physique. Ceci implique que la pénibilité, le contexte de production et le déroulement de travail ne sont pas pris en considération.

La limite majeure de ces derniers travaux, c'est qu'ils se concentrent principalement sur les tâches à réaliser (durée de traitement et effort musculaire exercé) et négligent souvent l'impact de l'environnement de travail, notamment la pénibilité qui joue un rôle très important sur l'évolution de la fatigue.

3.4 Conclusion

D'après notre recherche bibliographique, nous avons pu constater qu'il existe un nombre très limité de publications sur la fatigue des opérateurs dans les systèmes de production. Les travaux existants peuvent être classés principalement en deux grandes catégories : la première est de nature ergonomique et concerne la quantification et l'évaluation de la fatigue d'une façon subjective ou bien objective. La deuxième catégorie concerne l'évaluation de l'impact de la fatigue, notamment sur la productivité des opérateurs et les performances industrielles.

Nous avons pu également constater que la grande majorité de publications relie la fatigue uniquement à la tâche ou à la force physique exercée, notamment dans le cas du travail répétitif, et néglige souvent les différentes conditions de production. Particulièrement pour la pénibilité au travail, qui a été distinguée parmi les facteurs principaux d'accumulation de fatigue dans les systèmes de production. Nous avons remarqué qu'à l'exception des postures pénibles et du travail répétitif les autres facteurs de pénibilité ne sont pas souvent pris en compte ni dans la quantification de fatigue ni dans les modèles de simulation des systèmes de production.

Nous avons pu identifier à travers ce chapitre, les principales techniques, méthodes et modèles mathématiques pour la quantification de la fatigue dans divers contextes de production. Bien qu'il existe quelques approches proposées dans ce

contexte, nous avons noté qu'il y a un besoin de nouvelles approches qui permettent la quantification de la fatigue d'une façon générique et qui soient adaptées à différents contextes de travail. Cette question de recherche reste donc à traiter dans la littérature sur l'ergonomie de travail et la physiologie humaine.

Bien que les modèles de MET et RA sont les plus utilisés dans la littérature pour la quantification de la fatigue, l'application de ces modèles dans le cas du travail dynamique ne semble pas être judicieux parce qu'ils sont principalement conçus pour les tâches répétitives. En revanche, nous avons remarqué que l'indicateur de Konz (2000) est le plus utilisé lorsque les travailleurs traitent différents types de tâches.

D'après notre analyse de la littérature, nous avons pu constater que les travaux qui utilisent la simulation et prennent en compte la fatigue des opérateurs sont rares. Dans la plupart de ces travaux, la fatigue n'a pas été prise en considération au sein des modèles utilisés pour simuler les ateliers de production. En effet, elle a été souvent calculée dans un fichier externe. C'est parce que l'objectif était souvent de prédire a posteriori la fatigue des opérateurs et le modèle de simulation de l'atelier a été utilisé pour générer des informations sur le processus de production. Dans la plupart des travaux, la fatigue a été quantifiée d'une façon discrète et statique ce qui n'est pas judicieuse pour un phénomène continu.

Bien que certains travaux de recherche aient mis l'accent sur l'importance de la simulation continue du comportement de fatigue, ils sont souvent limités uniquement à la tâche exercée et donc ils négligent souvent les différentes conditions opératoires du système malgré qu'elles jouent un rôle très important sur l'évolution de la fatigue.

En conclusion et aux meilleurs de nos connaissances, il semble qu'il n'y a pas d'approches ni de logiciels de simulation qui permettent de prendre en compte d'une manière judicieuse la pénibilité au travail, le comportement dynamique des opéra-

teurs et l'évolution de leur fatigue dans les modèles de simulation des systèmes industriels. Ainsi, il y a un vrai besoin d'une approche générique et dynamique qui permet la simulation des ateliers de production tout en prenant en considération tous ces aspects.

Chapitre 3

Approche de Simulation Combinée des Systèmes de Production Intégrant les Opérateurs et leur Fatigue

1 Introduction

Nous avons pu constater à travers l'étude bibliographique réalisée dans le chapitre précédent que, malheureusement, les approches de simulation existantes et les logiciels disponibles ne possèdent pas les concepts adéquats qui nous aident à simuler les systèmes manufacturiers en prenant en compte la fatigue des opérateurs. Nous proposons donc d'aborder, dans ce chapitre, le problème de modélisation et de simulation des ateliers de production pour prendre en considération la fatigue des opérateurs durant le travail.

Notre objectif est dans un premier temps, de proposer un cadre conceptuel qui combine différents paradigmes de modélisation afin d'arriver à construire des modèles de simulation des systèmes de production qui intègrent les opérateurs et leur fatigue. Puis, dans un second temps, notre objectif consiste à montrer comment

mettre en oeuvre le cadre conceptuel proposé à travers une implémentation logicielle avec le simulateur ANYLOGIC.

2 Intégration de la dimension fatigue dans la simulation des systèmes manufacturiers

2.1 Simulation du fonctionnement des ateliers de production

Pour pouvoir étudier les performances des systèmes de production en prenant en considération la fatigue des opérateurs durant le travail, nous avons d'abord besoin de connaître plusieurs informations sur la dynamique de fonctionnement de ces systèmes au cours du temps. Autrement dit, nous avons besoin de savoir le nombre de machines dans l'atelier, les distances à parcourir entre les différentes machines, les tâches à réaliser, les horaires de travail, les périodes de repos, etc.

En outre, il faut connaître l'ampleur du travail effectué par chaque opérateur pour décrire l'impact des conditions de travail sur l'évolution de sa fatigue. Cela nécessite également des informations sur les tâches effectuées (durée et effort physique exercé) et sur l'environnement de travail (les niveaux de bruit générés par les machines, les poids des pièces à transporter, etc.). Ces informations peuvent être disponibles grâce à un modèle de simulation du système de production.

Plusieurs paradigmes de simulation ont été utilisés dans la littérature scientifique pour étudier les performances des ateliers de production. Nous mentionnons ainsi la simulation à événement discret (Fishman (1978)), la simulation continue (Law *et al.* (1991)) et la simulation combinée (Jahangirian *et al.* (2010)). Ces paradigmes sont régulièrement utilisées par les ingénieurs pour comprendre la dynamique du système dans la conception précoce de nouveaux systèmes manufacturiers et pour étudier les performances des ateliers de production (Castagna *et al.* (2001)).

En effet, la modélisation et la simulation des ateliers de production sont le processus de conception d'un modèle pour un atelier réel. Un modèle de simulation décrit des entités (éléments basiques d'un système physique), leurs attributs (caractéristiques principales et relations) et comment elles interagissent dans le but de voir comment le système se comporte sur une période de temps (Doukidis et Angelides (1994)). A partir du modèle de simulation, nous pouvons conduire des expérimentations dans le but de comprendre le fonctionnement de l'atelier et d'évaluer différentes stratégies de production. Il permet donc de répondre à des questions du type « Que se passerait-il si. . . ? ». D'après Pierreval (2006), le paradigme de simulation à évènement discret est le plus utilisé pour étudier les systèmes manufacturiers.

2.2 Intégration des opérateurs et de leur comportement en simulation

D'après Baines *et al.* (2004), les travailleurs sont souvent considérés dans les modèles de simulation des systèmes de production comme des éléments pseudo-techniques qui devraient se comporter de la même manière qu'un équipement. D'après Baines *et al.* (2004), les opérateurs ne se prêtent pas à la simulation de la même manière que les machines dans les systèmes de production qui sont caractérisés par une forte proportion de tâches manuelles qui nécessitent un effort physique et où les conditions de travail peuvent être pénibles. En effet, d'après les auteurs, les opérateurs humains sont intrinsèquement imprévisibles et capables d'être fatigués.

Or, dans la plupart des modèles de simulation des ateliers de production, l'opérateur est modélisé par une simple ressource inanimée avec un taux d'utilisation qui ne peut malheureusement pas refléter son état de fatigue. C'est parce que la fatigue des opérateurs dans les ateliers de production ne dépend pas uniquement de la quantité de travail réalisée mais aussi de plusieurs facteurs, notamment la pénibilité au travail.

En outre, les travailleurs dans les systèmes de production sont capables de raisonner, prendre des décisions, marcher, etc. Par conséquent, ils sont caractérisés par un comportement. L'évolution de la fatigue durant le travail représente une caractéristique importante du comportement des opérateurs et elle dépend énormément des activités réalisées par les opérateurs. Par exemple, lorsque l'opérateur traite une tâche, il/elle accumule de la fatigue, alors que s'il/elle se repose, il/elle récupère de la fatigue. Cela conduit à un comportement dynamique au cours du temps.

Selon Baines *et al.* (2004) et Elkosantini et Gien (2009), la modélisation des opérateurs en utilisant le concept de ressources a également des limites au niveau de la représentation du comportement des opérateurs. En réalité, les opérateurs en tant que des humains présentent des comportements plus complexes, sophistiqués et imprévisibles qu'une simple ressource inanimée ne peut pas les représenter. Par conséquent, la modélisation des opérateurs par des ressources inanimées dans les modèles de simulation des systèmes de production n'est pas pertinente pour prendre en considération leur comportement durant le travail.

Durant le travail, les opérateurs réalisent plusieurs activités. Par exemple, ils utilisent des machines, manipulent des produits et réalisent des tâches. Ainsi, leur comportement dépend énormément des interactions avec les machines, les produits, les stocks, etc. Il est donc nécessaire de représenter les interactions qui peuvent exister entre les différentes composantes du système de production et les opérateurs.

Le comportement des opérateurs dépend également des stratégies utilisées au sein de l'atelier pour affecter les travailleurs, répartir les pauses, aménager les machines, etc. Nous avons donc besoin d'intégrer ce type de stratégies dans la simulation des systèmes de production afin de pouvoir décrire le comportement de fatigue des opérateurs.

2.3 Modélisation du comportement de fatigue

Comme le concept de ressource en simulation ne peut pas être pertinent pour refléter l'état de fatigue des opérateurs, nous avons besoin d'un outil qui permet d'indiquer d'une façon objective et générale l'impact des conditions de travail sur la fatigue de chaque opérateur. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser un modèle de quantification de fatigue. Comme nous sommes pas des ergonomes, nous proposons d'exploiter les résultats des études existants sur l'ergonomie de travail et d'utiliser un des modèles de quantification de fatigue proposés dans la littérature.

Nous avons vu dans le chapitre précédent que la plupart des méthodes de quantification sont basées sur l'observation et les questionnaires ce qui nécessite souvent la présence de l'opérateur humain pour lui interroger ou l'installation de certains équipements pour lui observer, tels que des capteurs qui peuvent être placés à différents endroits sur le corps de l'opérateur, permettent d'enregistrer tous les mouvements qu'il/elle effectue.

Malheureusement, ce type de méthodes ne semble pas être pertinentes, dans le cadre d'une simulation, parce que notre objectif est de concevoir des modèles de simulation qui peuvent être utilisés même dans les phases de conception pour des systèmes inexistants encore, où l'opérateur ne peut pas être présent ni pour l'interroger ni pour l'observer. C'est pourquoi, nous avons besoin d'utiliser un des modèles mathématiques proposés dans la littérature qui permet, en se basant sur des informations sur la tâche à réaliser (tel que le poids de la pièce et la durée de traitement), d'évaluer l'état de fatigue de l'opérateur.

Dans le chapitre précédent, nous avons vu que les rares travaux, qui ont simulé des ateliers de production et ont pris en compte la fatigue des opérateurs, ont utilisé le paradigme de simulation à événement discret. Ainsi, la fatigue a été quantifiée d'une manière discrète, souvent avant et après le traitement d'une tâche ou d'une

période de repos. Un exemple de courbes d'évolution de fatigue d'une façon discrète est présenté dans la figure (3.1).

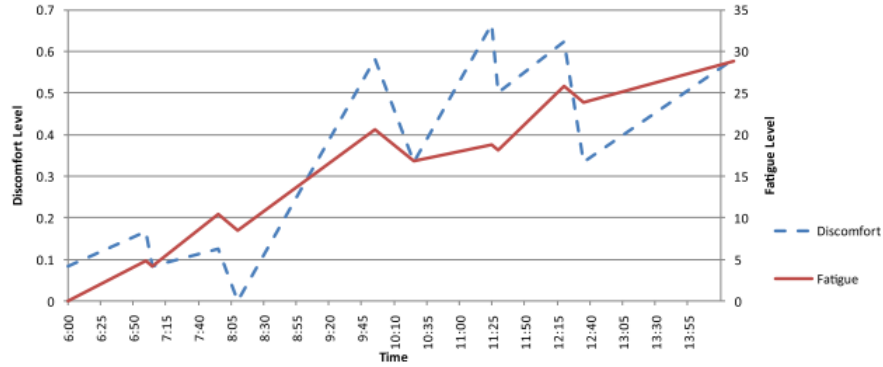


FIGURE 3.1 – L'évolution de la fatigue selon Perez *et al.* (2014).

En réalité, la fatigue est un phénomène continue. Durant le travail, l'opérateur soit accumule ou il/elle récupère de la fatigue. Ainsi, la modélisation en se basant sur le paradigme de simulation à évènement discret ne semble pas une technique judicieuse pour décrire l'évolution continue de la fatigue des opérateurs durant le travail.

En revanche, les changements qui se produisent d'une façon discrète au niveau de l'atelier de production, tels que lorsqu'une machine occupée devient disponible et lorsqu'une nouvelle pièce arrive dans le système, peuvent avoir un impact significatif sur le comportement de fatigue des opérateurs. Par exemple, lorsque l'opérateur attend la libération d'une machine, il récupère de la fatigue, mais lorsque la machine concernée devient disponible, l'opérateur devient opérationnel et par conséquent il/elle accumule de la fatigue. Ainsi, il est nécessaire de prendre en considération l'impact des changements discrets qui se produisent au niveau de l'atelier de production et peuvent conduire à une variation au niveau de l'état de fatigue des opérateurs.

2.4 Prise en compte de la pénibilité en simulation

Les opérateurs dans les systèmes manufacturiers sont souvent soumis à la pénibilité au travail, à savoir la manutention des charges lourdes, l'exposition à des niveaux de bruit importants, le travail dans des postures inconfortables, etc. Nous avons vu dans le premier chapitre que la pénibilité au travail a été distinguée parmi les principaux facteurs qui entraînent l'accumulation de la fatigue dans les ateliers de production. Alors, pour mieux décrire l'évolution de la fatigue des opérateurs, il est important de prendre en considération la notion de pénibilité au travail.

Il est important de noter que les travaux de recherche qui prennent en compte la pénibilité dans les ateliers de production sont très rares. Dans la plupart de ces travaux, la pénibilité a été réduite à la sévérité de la tâche ou à l'effort musculaire exercé (Konz (2000); Jaber *et al.* (2013); Ferjani *et al.* (2015, 2017)).

Toutefois, nous avons vu dans le premier chapitre que la pénibilité est une notion complexe aux interprétations multiples et difficile à déterminer d'une façon précise. C'est parce que ses facteurs sont nombreux et très diversifiés. En général, il est souvent difficile de déterminer les valeurs exactes de ces facteurs. Prenant à titre d'exemple les postures inconfortables, comment peut-on quantifier ou déterminer le degré de confort d'une posture donnée ?

En outre, il est difficile d'avoir toujours des données exactes et précises sur comment intégrer les différents facteurs de pénibilité. Face au problème d'imprécision (Boujelben *et al.* (2011)), nous avons besoin de faire des approximations pour exprimer la pénibilité tout en prenant en considération ses différents facteurs. C'est-à-dire que nous devons aussi être capables d'agréger les différents facteurs pour avoir un indicateur global qui exprime la pénibilité (Berrah *et al.* (2004)).

3 Présentation du cadre conceptuel : Principes de base

Pour répondre à nos besoins, nous proposons dans cette section un cadre conceptuel qui permet la modélisation et la simulation des systèmes de production tout en prenant en considération les opérateurs et leur fatigue. Le cadre conceptuel proposé combine différents paradigmes de modélisation : Simulation à Évènement Discret (SED), Agent Intelligent (AI), Simulation Continue (SC) et la logique floue (figure (3.2)).

D'après Pierreval (2006), le paradigme SED a été largement utilisé dans la littérature pour étudier les systèmes manufacturiers. Nous proposons donc d'utiliser le paradigme SED pour décrire le dynamique de fonctionnement, à savoir comment les pièces arrivent dans le système, les gammes de fabrication des produits, etc. Il permet ainsi de représenter les différentes composantes qui constituent les systèmes de production et qui peuvent être utilisées pour étudier les performances industrielles.

Pour avoir les informations nécessaires pour décrire l'état de fatigue des opérateurs (comment les machines sont agencées dans l'atelier, les distances à parcourir entre les machines, niveaux de bruit, etc.) et décrire l'impact de la fatigue des opérateurs sur l'atelier de production, nous devons représenter l'environnement dans lequel les opérateurs sont situés. Ainsi, nous utilisons le paradigme SED pour représenter les éléments du système avec lesquelles les opérateurs peuvent interagir et qui peuvent influencer et/ou être influencées par la fatigue des travailleurs.

Les opérateurs, dans notre cadre conceptuel, peuvent être fatigués et ils sont capables de travailler sur différentes machines, d'opérer différents types de tâches, de marcher et de se reposer. Ainsi, ils peuvent passer durant le travail par différents états autre que les états "Disponible" et "Occupé" qui sont les états typiques des opérateurs dans les modèles de simulation des systèmes de production.

Un agent tel qu'il est défini dans (Franklin et Graesser (1996)) "*exécute continuellement trois fonctions : perception des conditions dynamiques dans l'environnement ; action pour affecter les conditions dans l'environnement ; et raisonnement pour interpréter les perceptions, résoudre des problèmes, tirer des conclusions et déterminer des actions*". Selon Macal et North (2010) et Macal (2016), l'agent montre également un comportement.

Sur la base de ces définitions et afin de prendre en compte le comportement des opérateurs dans la simulation des systèmes manufacturiers, nous suggérons d'utiliser le concept d'agent intelligent. Ainsi, nous proposons de modéliser les travailleurs par des agents dans notre cadre conceptuel.

En effet, la simulation à base d'agents est une approche de modélisation qui permet de simuler des processus dynamiques impliquant des agents autonomes capables d'agir seuls sans direction externe en réponse à des situations rencontrées lors de la simulation (Macal et North (2014)).

D'après Bonabeau (2002), la simulation à base d'agents est le plus souvent utilisée pour modéliser la prise de décisions individuelles et le comportement social et organisationnel, où les agents représentent souvent une personne ou un groupe de personne. Selon les auteurs, seuls les modèles à base d'agents peuvent intégrer explicitement la complexité résultant de comportements individuels et des interactions qui existent dans le monde réel. D'après Elsayah *et al.* (2015), la principale valeur ajoutée de la simulation à base d'agents est sa capacité à représenter plus explicitement le comportement des humains.

L'évolution de la fatigue représente une caractéristique importante du comportement de l'agent. Dans les chapitres précédents, nous avons vu que la fatigue est un phénomène continu et complexe. Ainsi, pour décrire comment ce phénomène évolue durant le travail, nous proposons d'utiliser le paradigme SC qui est largement utili-

sées par les chercheurs pour décrire l'évolution des phénomènes complexes au fil du temps (Law (2015)).

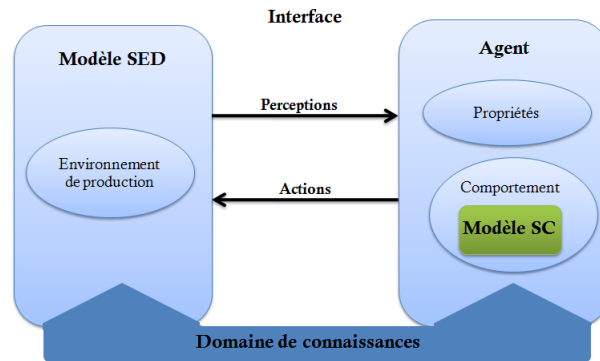


FIGURE 3.2 – Description générale du cadre conceptuel proposé.

Pour arriver à prendre en compte la pénibilité au travail et faire face au problème d'imprécision, nous proposons de faire des approximations et de l'exprimer en langage naturel. Pour ce faire, nous proposons d'utiliser la logique floue. En effet, la logique floue est parmi les approches les plus utilisées dans littérature pour faire des approximations et répondre au besoin de représenter des connaissances imprécises (Zadeh (1976); Gien et Jacqmart (2005); Elkosantini (2007)).

D'après Elkosantini (2007), la logique floue, issue de la théorie des sous-ensembles flous, permet de raisonner sur des variables linguistiques, c'est-à-dire, sur des variables qualitatives (lourde, bruyante, inconfortable, etc.). Le fait de raisonner sur ces variables linguistiques nous permet de pouvoir manipuler des connaissances en langage naturel et de s'inspirer du raisonnement humain pour faire des approximations. Ainsi, au lieu d'utiliser des valeurs numériques pour décrire la pénibilité et ses facteurs, nous proposons d'utiliser des nombres flous (Zadeh (1975, 1976)).

Pour arriver à obtenir un indicateur global qui exprime la pénibilité au travail, nous devons agréger les différents facteurs élémentaires de pénibilité. Selon la définition générale proposée par Wald (1998), l'agrégation d'informations est un cadre

formel dans lequel sont exprimés des moyens et des outils permettant l’alliance d’informations provenant de différentes sources. Son objectif est d’obtenir une information globale à travers des informations élémentaires. La figure 3.3 résume l’ordre logique des différentes étapes du processus d’agrégation d’informations.

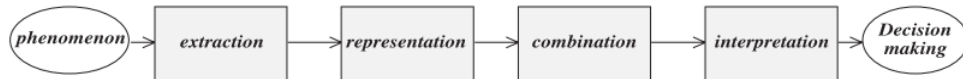


FIGURE 3.3 – Le processus d’agrégation d’informations.

D’après Berrah *et al.* (2004), la logique floue facilite la résolution du problème d’agrégation lorsqu’on n’a pas une expression numérique explicite qui relie directement les informations élémentaires. Selon Elkosantini (2007), la logique floue assure la construction d’une logique plus flexible que les règles logiques traditionnelles et permet de produire des inférences à partir de relations imprécises. En outre, elle adopte un mécanisme de déduction plus proche du raisonnement humain que la logique classique. Ainsi, nous proposons d’utiliser la logique floue pour agréger les différents facteurs de pénibilité.

4 Usage de la Simulation à Évènement Discret pour la modélisation de l’environnement de production

La composante SED de notre cadre conceptuel est une représentation de l’environnement de production où les opérateurs sont situés. Elle est composée de l’ensemble d’objets physiques (tel que les machines, les produits, les stocks, etc.) et non physiques (tel que les horaires de travail ou de repos) qui constituent le système de production et qui peuvent influencer et/ou être impactés par la fatigue des opérateurs.

Typiquement, les machines du système sont modélisées en simulation par des ressources, les produits par des entités, les stocks sont modélisés par des files d'attente, etc. Certaines caractéristiques de ces éléments, telles que les durées opératoires, les dates d'entrée et de sortie d'un produit dans le système, peuvent être utilisées pour étudier les performances de l'atelier de production alors que d'autres peuvent avoir un impact sur l'accumulation et/ou la récupération de la fatigue.

Prennent par exemple, les positions de certaines installations, à savoir les machines, ont une incidence sur la distance que le travailleur parcourt durant son travail et donc sur la fatigue. Par ailleurs, les dates d'entrée et de sorties des pièces dans le système sont indispensables pour mesurer la performance de l'atelier en termes de la durée moyenne de passage de pièces dans le système (en anglais Mean Flowtime MFT). Pour décrire ces caractéristiques, nous proposons d'associer aux différents éléments constituant la composante SED des attributs.

Nous proposons d'associer à chaque machine $j \in M$, avec M est l'ensemble de machines dans le système considéré, l'ensemble des attributs suivants :

- $Pm_j = (x_j, y_j)$: un point indiquant la position géographique de la machine j dans le système de production considéré. Cet attribut peut être utilisé par l'agent pour vérifier sa position par rapport à la position de la machine j afin de décider s'il/elle doit marcher ou commencer directement la tâche lorsqu'il/elle est affecté à la machine j .
- $dist_j = \{ dm_{jj'}, j' = 1...m \}$: un vecteur représentant les distances euclidiennes qui séparent la machine j des autres machines du système, avec $dm_{jj'} > 0, \forall j' \neq j$ et m est le nombre de machine dans le système à étudier. Ce vecteur représente également la distance que l'opérateur doit parcourir lorsqu'il/elle va déplacer de la machine j pour aller travailler sur une autre machine.

- NB_j : un paramètre fixe indiquant le niveau de bruit généré par la machine j (exprimé en décibel). Selon la figure (1.2), qui indique les seuils de bruit, nous supposons que NB_j ne doit pas dépasser la valeur de 110 dB ($0 \leq NB_j \leq 110$). Le niveau de bruit généré est considéré comme un des facteurs de pénibilité dans notre travail.
- $Prox_j = [px_{jj'}, \forall j \neq j']$: un vecteur qui indique les machines qui sont à proximité de la machine j pour pouvoir déterminer le bruit ambiant.

Tout comme les machines, certaines caractéristiques des produits, que l'opérateur doit manipuler, peuvent impacter sa fatigue. Ainsi, nous proposons d'associer à chaque pièce $K \in P$ (avec P représente l'ensemble de produits dans le système à étudier) les attributs suivants :

- $Poids_K = \{ C_{Kj} \mid j = 1..m \}$: un vecteur qui indique le poids de la pièce k lorsqu'elle doit être manipulée sur chacune des machines du système. Le poids que l'opérateur doit maintenir pendant le traitement de la pièce est considéré ici comme un facteur de pénibilité.
- $T_K = \{ T_{Kj}, j = 1..m \}$: un vecteur indiquant la durée opératoire "théorique" de la pièce k sur chacune des machines du système, tel que $T_{Kj} \geq 0$. Étant donné que les durées opératoires de tâches peuvent être impactées par la fatigue de l'opérateur, elles peuvent être plus longues que prévu. Pour cela, nous verrons dans la suite que nous allons les corriger en fonction du niveau de fatigue de l'opérateur qu'il doit les traiter. Lorsque la durée opératoire de la tâche est expirée, un évènement se déclenche indiquant que la machine associée est devenue disponible et peut être occupée à nouveau.

Nous avons vu que les performances industrielles sont touchées par la fatigue, c'est pourquoi les critères de performance les plus classiques peuvent être calculés dans notre composante SED. Dans notre travail, nous nous intéressons particulièrement à étudier la durée moyenne de passage des pièces dans le système (mean

Flowtime MFT), nous utilisons donc l'attribut *FW* qui indique la valeur de la durée moyenne du passage de pièces dans le système depuis le début de la simulation.

5 Représentation des opérateurs : Modélisation par une approche agent

Comme l'illustre la figure (3.4), la structure typique de l'agent est souvent composée de :

- Les attributs et le comportement de l'agent
- L'environnement de l'agent dans lequel il est situé et avec lequel il interagit.
Dans notre cas, c'est le modèle SED qui représente l'environnement de notre agent.
- Les relations et les méthodes d'interaction entre les agents. Bien que l'interaction entre les agents représentent une caractéristique des opérateurs, cette dernière ne fait pas, malheureusement, partie de cette thèse. Ceci représente une future piste de recherche très importante qui contribue à améliorer notre approche afin de prendre en compte l'aspect social des opérateurs.

D'après Macal et North (2014), il n'y a pas un accord universel sur une définition précise pour le terme agent dans la littérature et que ce sujet fait l'objet de nombreuses discussions et débats scientifiques. Bien que la définition du terme "Agent" et de sa structure représentent des sujets controversés en Intelligence Artificielle, la plupart des définitions tendent à convenir que la caractéristique fondamentale d'un agent est sa capacité à prendre des décisions indépendantes. Cela nécessite un comportement, qui peut aller des règles de décision réactives primitives à l'intelligence artificielle adaptative complexe (IA) (Adam (2000)).

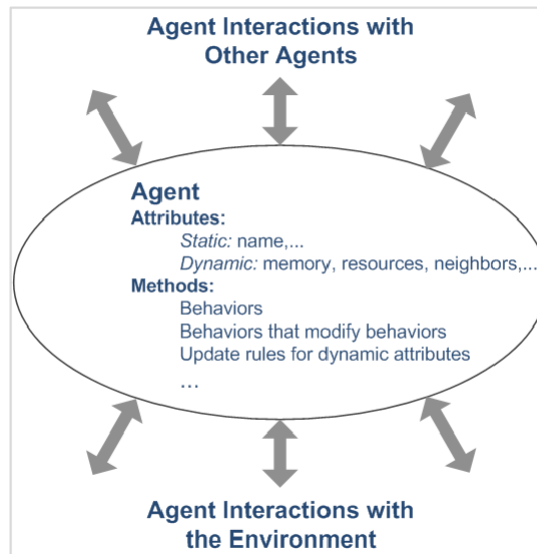


FIGURE 3.4 – La structure typique d'un agent.

Dans notre travail, nous nous sommes donc inspirés de plusieurs travaux de recherche dans le domaine d'intelligence artificielle (Van Harmelen *et al.* (2008); Elkosantini et Gien (2009); Macal et North (2014)) pour proposer une structure personnalisée pour notre agent qui répond à nos besoins. Ainsi, nous suggérons que notre agent soit composé d'une base de connaissances, d'un ensemble de capacités, d'un état et d'un comportement.

5.1 Base de connaissances

Selon Sowa *et al.* (2000) et Van Harmelen *et al.* (2008), la base de connaissances dans un agent lui permet de raisonner sur ses plans d'actions. D'après Padgham et Lambrix (2000), la base de connaissances d'un agent, particulièrement dans l'architecture BDI (Belief - Desire - Intention), est souvent composée de plans qui sont essentiellement des spécifications abstraites permettant à l'agent d'atteindre certains objectifs ou de réaliser des sous-tâches pour atteindre un objectif bien particulier.

Chaque plan peut également comporter une liste de conditions préalables ou un contexte décrivant la situation dans laquelle le plan doit être utilisé.

En se basant sur ces descriptions, nous proposons d'associer à l'agent une base de connaissances composée également d'un ensemble de plans d'actions qui lui permettent d'assurer son travail dans le système de production. Parmi les connaissances de l'agent, nous trouvons, par exemple, le raisonnement logique que l'agent doit suivre pour faire le choix entre plusieurs machines disponibles afin de sélectionner celle où il va travailler.

Ainsi, l'agent doit avoir des connaissances sur les stratégies d'affectation qu'il peut utiliser pour faire le choix entre plusieurs machines disponibles tout en respectant les contraintes suivantes :

- L'agent ne peut pas sélectionner plus qu'une seule machine à la fois ;
- Une machine ne peut pas être occupée que par un seul opérateur à la fois.

Pour représenter les stratégies d'affectation, nous proposons d'utiliser des règles logiques de type " **Si...**, **Alors...** ". Par exemple, " **Si** le critère de sélection de machines est les durées opératoires courtes, **Alors** sélectionner la machine sur laquelle le première pièce en attente a la durée opératoire le plus courte.

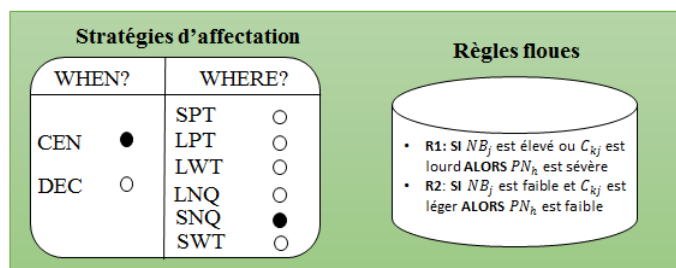


FIGURE 3.5 – Représentation de la base de connaissances de notre agent.

Comme l'illustre la figure (3.5), l'agent possède également des connaissances sur comment déterminer la pénibilité de la tâche qu'il va traiter pour arriver à mettre à

jour son état de fatigue. Nous verrons dans la suite comment nous pouvons prendre en compte la pénibilité dans notre travail.

5.2 Capacités

Comme mentionné dans Padgham et Lambrix (2000), les capacités d'un agent lui permettent de réagir rationnellement à la réalisation d'un objectif particulier. Dans notre travail, les opérateurs sont hétérogènes et polyvalents et leur objectif principal est d'assurer le travail. Pour ce faire, ils doivent avoir des compétences. Nous proposons donc d'associer à l'agent un vecteur de compétences $Comp[j]$ qui indique si l'agent est qualifié ou non pour travailler sur la machine j . Les compétences de l'agent peuvent évoluer en fonction de l'expérience du travailleur, quel que soit il/elle est novice ou expert.

En plus des compétences, l'agent doit avoir des capacités physiques qui lui permettent d'atteindre ses objectifs. Parmi ces capacités, nous mentionnons sa capacité à récupérer pendant une période de repos. Nous considérons donc le paramètre Cp qui décrit les capacités physique de l'agent pour récupérer pendant une pause.

Pour que l'agent soit capable de se déplacer entre les machines durant le travail, nous suggérons de lui associer le paramètre V (mètre/seconde) qui décrit la vitesse de marche. Les capacités physiques de l'agent peuvent varier en fonction de ses caractéristiques physiques, tel que son âge. Nous pouvons donc associer à l'agent un attribut age pour indiquer son âge actuel.

5.3 État

Durant le travail, l'opérateur peut passer par différents états d'occupation, par exemple, il peut travailler, marcher et se reposer, comme il peut aussi être absent. Dans chacun de ses états, l'agent présente un comportement bien particulier.

Ainsi pour décrire l'état actuel de l'agent, nous proposons d'utiliser un ensemble de variables d'état. Comme illustré dans la figure (3.6), certaines variables peuvent être discrètes et dépendent fortement de l'état de la composante SED, telles que l'état d'occupation de l'agent et sa position géographique actuelle dans l'atelier. D'autre variables, qui décrivent souvent l'état physique de l'agent dépendent énormément du temps et peuvent être plutôt continues, tel que le niveau actuel de fatigue qui varie au fil du temps.

FIGURE 3.6 – Variables d'état utilisées pour la description de l'état actuel de l'agent-opérateur.

Ainsi, nous proposons d'utiliser les variables d'état suivantes :

- Po^t : une variable d'état discrète qui indique la position actuelle (coordonnées géographiques) de l'agent dans son système de production.
- $Occp^t$: une variable d'état discrète qui indique l'état d'occupation actuelle de l'agent.
- D^t : une variable d'état discrète indiquant la distance parcourue par l'agent depuis l'instant t_m , où il/elle a commencé à marcher, et jusqu'à l'instant t .
- $F(t)$: une variable d'état continue qui indique le niveau actuel de la fatigue de l'agent.

5.4 Comportement

Dans notre travail, nous distinguons particulièrement deux sortes de comportements : le premier concerne l'affectation de l'agent aux différentes machines du système alors que le deuxième concerne l'évolution de sa fatigue durant le travail.

Le comportement d'affectation décrit ainsi le changement dynamique de l'état d'occupation de l'agent en fonction de l'évolution du processus de production, c'est-à-dire en fonction de l'état actuel de la composante SED. Autrement dit, il dépend énormément du comportement du système de production (par exemple les arrivées des pièces et la fluctuation des demandes clients). Pour représenter ce type de comportement, nous proposons d'utiliser un diagramme d'états-transitions.

Les états du diagramme représentent les différentes états d'occupation de l'agent et les transitions représentent les conditions de passage d'un état à un autre. Comme l'illustre la figure (3.7), nous distinguons trois types de transitions : certaines transitions sont les résultats de décisions prises par l'agent, tel que le choix d'une machine pour l'affectation. Des transitions sont provoquées par les événements qui peuvent se déclencher d'une façon aléatoire et discrète dans la composante SED et impliquent des changements dans l'état de l'agent. Les autres transitions sont dûs à l'écoulement des durées de pauses et du travail journalier.

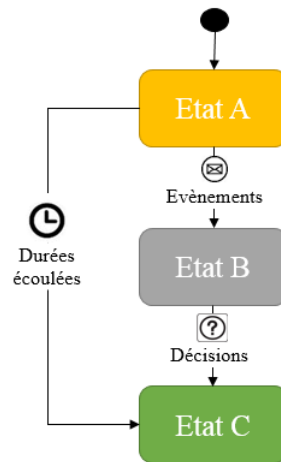


FIGURE 3.7 – Représentation d'un exemple de diagrammes d'états de l'agent.

6 Approche basée sur la Simulation Continue pour la modélisation du comportement de fatigue

Pour arriver à décrire le comportement de fatigue des opérateurs, il faut :

- Déterminer les facteurs agissant sur l'accumulation et la récupération de fatigue dans les systèmes de production.
- Quantifier la fatigue de l'opérateur à chaque instant t .
- Décrire la variation du niveau de fatigue au fil du temps.
- Prendre en compte la pénibilité du travail et l'intégrer dans le processus de l'évaluation de la fatigue.

Dans ce qui suit, nous allons présenter en détails comment nous pouvons prendre en considération la fatigue dans notre cadre conceptuel.

6.1 Facteurs d'accumulation et de récupération de fatigue

Comme nous avons vu, dans les chapitres précédents, la fatigue est un phénomène complexe qui dépend de divers facteurs dont certains sont liés à la composante

SED, tels que les facteurs de pénibilité, et d'autres sont liés à l'agent lui-même, telle que sa capacité physique à se récupérer pendant une pause. Suite à notre étude bibliographique sur la fatigue, nous avons pu construire le diagramme causal, présenté dans la figure 3.8, qui illustre d'une façon générale les principaux facteurs d'accumulation et de récupération de fatigue dans les systèmes de production.

Dans la figure 3.8, nous pouvons distinguer deux types de relation de causalité : relations positives et autres négatives. Pour une relation positive, l'augmentation d'un facteur (cause) entraîne l'augmentation d'un autre (effet) et inversement. Prenant par exemple la relation de causalité entre la pénibilité du travail et le taux d'accumulation de fatigue, une augmentation de la pénibilité entraîne une augmentation du taux d'accumulation. Autrement dit, la vitesse d'accumulation de fatigue augmente en fonction de la sévérité de la pénibilité. Quant à la relation négative, l'augmentation d'un facteur entraîne la diminution d'un autre et inversement.

6.2 Quantification de la fatigue

Pour décrire la façon dont la fatigue évolue durant le travail, nous avons d'abord besoin de choisir un modèle pour la quantifier à chaque instant t du travail. En effet, le choix du modèle de quantification dépend énormément du type de travail dans le système à étudier. Autrement dit, s'il s'agit d'un travail répétitif, il est raisonnable d'utiliser un des modèles MET existants dans la littérature ergonomique, alors que, si le travail est dynamique, il semble que les indicateurs de fatigue sont les plus appropriés.

Comme nous proposons une approche générique capable de modéliser divers type de systèmes de production, nous suggérons ici d'utiliser les indicateurs de fatigue. Ces indicateurs-là permettent de décrire d'une façon générale et objective l'état de

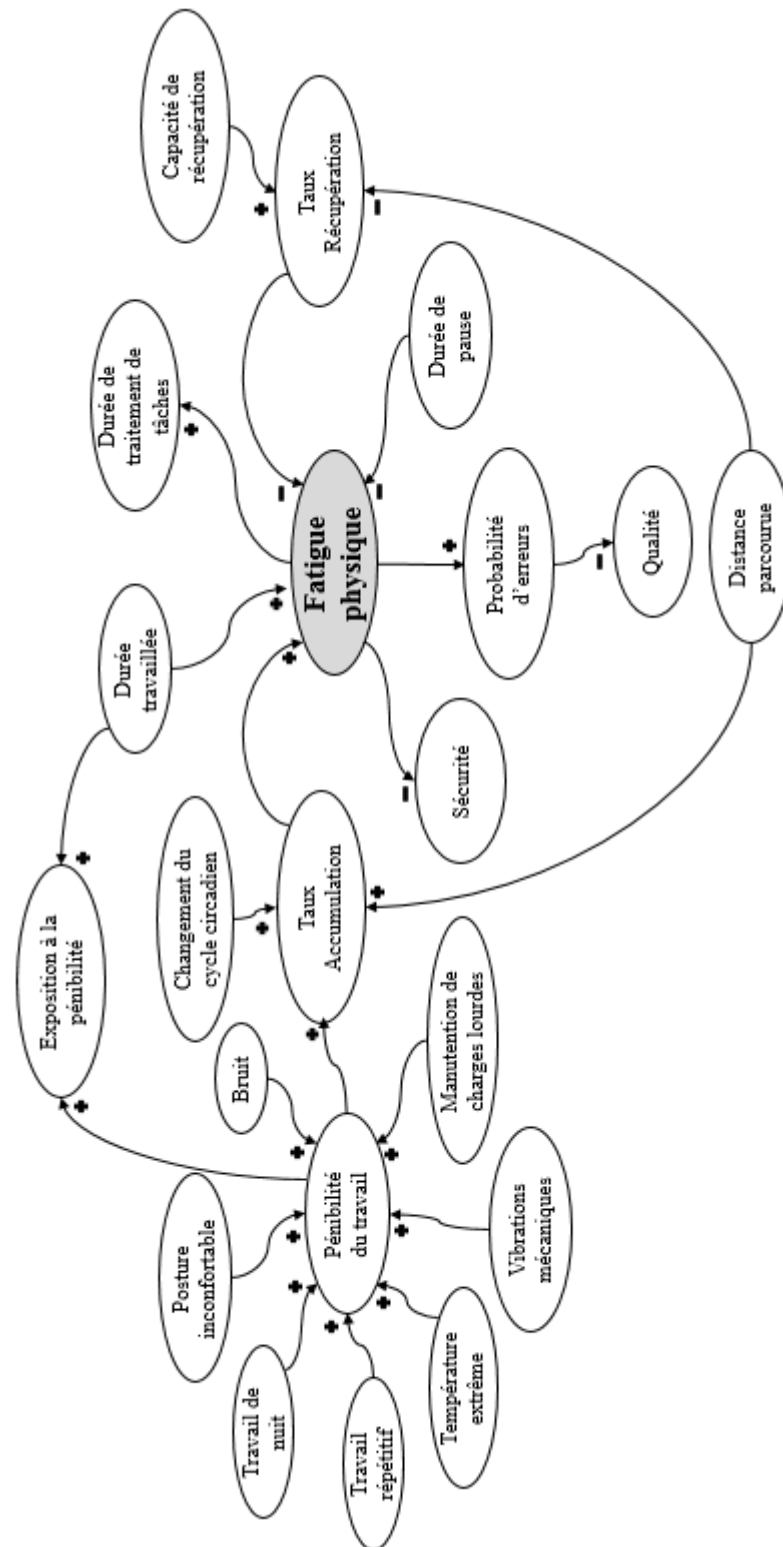


FIGURE 3.8 – Diagramme générique des facteurs affectant la fatigue.

fatigue des opérateurs sans entrer trop dans les détails ergonomiques (par exemple quel muscle a été utilisé ou l'intensité de la force exercée).

D'après Jaber *et al.* (2013), l'indicateur de fatigue proposé par Konz (2000) est le plus utilisé dans la littérature. Nous proposons donc d'utiliser cet indicateur pour la quantification de fatigue dans notre travail. Cependant, il est à noter qu'il est possible d'utiliser d'autres indicateurs.

6.3 Variations du niveau de fatigue

Bien que l'indicateur de fatigue proposé par Konz (2000) permet d'indiquer le niveau de fatigue à un instant t durant le travail, il est limité dans le sens où il permet de quantifier la fatigue uniquement d'une façon discrète en se basant sur l'état de l'opérateur à cet instant-là (c'est-à-dire tout dépend si l'opérateur est en train d'accumuler ou de récupérer de la fatigue).

Toutefois, pour décrire l'évolution de la fatigue durant le travail, il faut prendre en compte l'alternance entre les périodes d'accumulation et les périodes de repos ainsi que la fatigue résiduelle de la dernière tâche réalisée. Pour cela, nous avons besoin de décrire la variation continue et dynamique du comportement de fatigue de l'agent.

Dans ce contexte, Elkosantini (2007) a noté que les équations différentielles ont été très utilisées pour modéliser certains aspects dynamiques et complexes liés au comportement humain, telle que la fatigue. Ainsi, la variation du niveau de fatigue de notre agent peut être également modélisé par des équations différentielles.

Pour définir les équations différentielles adéquates dans notre travail, nous proposons d'adapter le modèle de quantification de fatigue de Konz (2000). Ainsi, nous définissons l'équation (3.1), (3.2) et (3.3) pour décrire la variation du niveau de fatigue.

$$dF(t)/dt = V_a(PN_h, D^t)(1 - F(t)) - V_r(Cp) F(t) \quad (3.1)$$

Tel que,

$$V_a(PN_h, D^t) = 1 - e^{-g(PN_h, D^t)} \quad (3.2)$$

et,

$$V_r(Cp) = e^{-g'(Cp)} \quad (3.3)$$

Avec, V_a et V_r sont les fonctions qui déterminent les taux d'accumulation et de récupération de fatigue. Nous considérons l'attribut PN_h qui indique la pénibilité associée au traitement de la tâche h . Dans notre travail, nous considérons que $PN_h = H(NB_j, C_{kj})$, c'est-à-dire que la pénibilité est une fonction du bruit généré par les machines et du poids de la pièce à manipuler.

Or, nous n'avons pas des formules mathématiques exactes pour définir les fonctions g , g' et H . pour déterminer la pénibilité PN_h et les vitesses d'accumulation V_a et de récupération V_r . Pour faire face à ce problème, nous proposons d'utiliser la logique floue et de décrire la valeur de ces attributs d'une façon qualitative et non quantitative.

7 Prise en considération de la pénibilité au travail

7.1 Raisonnement basée sur la logique floue

Pour prendre en compte la pénibilité dans l'évaluation de la fatigue, nous suggérons de l'intégrer comme un facteur d'accumulation dans les équations différentielles qui décrivent la variation du niveau de fatigue. En se basant sur le concept de la logique floue et afin d'interpréter les valeurs, respectivement, de V_a , V_r et PN_h dans les équations (3.2) et (3.3), nous considérons les attributs suivants $V_a, V_r, PN_h, NB_j, C_{kj}, D^{t_m}$

et Cp comme des nombres flous de forme trapézoïdale (figure 3.9). Pour décrire les intervalles flous, nous suggérons d'utiliser des fonctions d'appartenance ayant la représentation trapézoïdale suivante :

$$\mu_A(X) = \begin{cases} 0 & \text{si } X < n_1 \text{ ou } X > n_4 \\ 1 & \text{si } n_2 \leq X \leq n_3 \\ 1 + \frac{(X - n_2)}{(n_2 - n_1)} & \text{si } n_1 < X < n_2 \\ 1 - \frac{(n_3 - X)}{(n_4 - n_3)} & \text{si } n_3 < X < n_4 \end{cases}$$

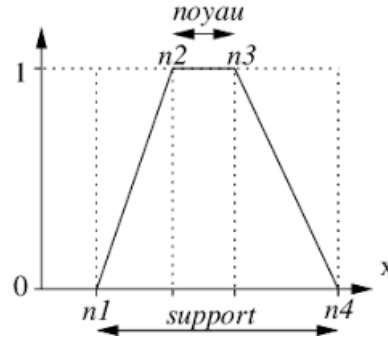


FIGURE 3.9 – Un intervalle flou de forme trapézoïdale.

Afin d'exprimer le lien entre $V_a, V_r, PN_h, NB_j, C_{kj}, D^{tm}$ et Cp , nous utilisons des expressions linguistiques ou des propositions logiques inspirées du langage naturel. Parmi ces expressions, nous trouvons les règles floues de type "**Si** X est A **Alors** Y est B , où A et B représentent des termes linguistiques quantifiant les liens qui peuvent exister entre les variables d'entrée X et de sortie Y (par exemple, **Si** la machines est bruyante et la température est élevée **Alors** la pénibilité est sévère).

En effet, ce type d'expressions est parmi les méthodes les plus utilisées dans la littérature pour la représentation des connaissances humaines (Elkosantini et Gien (2009)). Dans notre travail, ces connaissances permettent à l'agent de déterminer

la pénibilité PN_h et les vitesses d'accumulation V_a et de récupération V_r . Nous proposons donc d'introduire dans la base de connaissances de notre agent l'ensemble des règles floues suivantes :

- Pour déterminer V_r et V_a , nous définissons les règles suivantes :
 - Si Cp est élevé alors V_r est rapide ;
 - Si Cp est moyenne alors V_r est moyenne ;
 - Si Cp est faible alors V_r est lente ;
 - Si PN_h est sévère alors V_a est rapide ;
 - Si PN_h est moyenne alors V_a est moyenne ;
 - Si PN_h est faible alors V_a est lente ;
 - Si D^{tm} est faible ou D^{tm} est raisonnable alors V_a est faible ;
 - Si D^{tm} est faible alors V_r est rapide ;
 - Si D^{tm} est raisonnable alors V_r est moyenne ;
 - Si D^{tm} est longue alors V_a est rapide ;
- Pour déterminer la valeur de PN_h , nous définissons les règles suivantes :
 - Si NB_j est élevé ou C_{kj} est lourd Alors PN_h est sévère ;
 - Si NB_j est faible et C_{kj} est léger Alors PN_h est faible ;
 - Si NB_j est raisonnable et C_{kj} est raisonnable Alors PN_h est moyenne ;
 - Si NB_j est raisonnable et C_{kj} est léger Alors PN_h est faible ;
 - Si NB_j est faible et C_{kj} est raisonnable Alors PN_h est moyenne ;

Pour interpréter les règles floues et faire l'aggrégation, nous avons besoin d'une méthode d'inférence. Plusieurs méthodes d'inférences sont proposées dans la littérature. Parmi ces méthodes, nous citons, particulièrement, celles de Mamdani, Larsen et Takagi-Sugeno qui sont les plus répandues dans la littérature (Elkosantini (2007)). Dans notre travail, l'agent a besoin d'un moteur d'inférence pour interpréter les règles floues. Nous proposons donc d'utiliser la méthode d'inférence de Mamdani (Nedjah et de Macedo Mourelle (2005)).

Généralement, le processus d'inférence se base sur la Fuzzification - Inférence floue -Agrégation des conclusions - Défuzzification.

- **Fuzzification** : c'est un processus qui consiste à transformer une grandeur numérique en un sous ensemble flou. Autrement dit, qualifier une valeur numérique avec un terme linguistique.
- **Inférence floue** : ce processus permet de combiner les connaissances fournies par l'ensemble des règles floues pour déduire une nouvelle connaissance.
- **Agrégation des conclusions** : c'est le résultat de la combinaison des résultats de différentes règles activées. L'objectif de cette étape est de déterminer la fonction d'appartenance globale en utilisant les normes triangulaire (T-normes) ou T-conorme ((Elkosantini (2007))).
- **Defuzzification** : c'est l'opération inverse de la Fuzzification et qui consiste à transformer un nombre flou en une grandeur numérique. Parmi les méthodes de défuzzification les plus répandues, nous pouvons citer le Centre de gravité (CG), le Premier Maximum et le Centre Maximum.

Ainsi, pour fuzzifier et pour défuzzifier, nous utilisons des fonctions d'appartenances trapézoïdales (3.9) et nous faisons les hypothèses suivantes :

- Nous supposons que le poids C_{kj} varie entre 0 et 15 kg. Jusqu'à 3 kg, C_{kj} est considéré léger, entre 1 kg et 6 kg, C_{kj} est considéré raisonnable, et entre 5 kg et 15 kg, C_{kj} est considéré lourd.
- Nous supposons que le niveau de bruit NB_j varie entre 0 et 110 dB. Jusqu'à 60 dB, NB_j est considéré faible, entre 20 dB et 80 dB, NB_j est considéré raisonnable et entre 70 dB et 110 dB, NB_j est considéré élevé.
- Nous supposons que PN_h est inclus dans l'intervalle $[0,1]$, avec une pénibilité égale à 0 signifie que la tâche en cours de traitement n'est pas pénible et 1 signifie qu'elle est extrêmement pénible. Jusqu'à 0.4, PN_h est considéré

faible, entre 0.3 et 0.8, PN_h est considéré moyenne et entre 0.6 et 1, PN_h est considéré sévère.

- En se basant sur le travail de Givi *et al.* (2015), nous faisons l'hypothèse que 99% de l'indicateur de fatigue est accumulé après 10 h de travail (sans repos), nous obtenons, en adaptant l'indicateur de fatigue de Konz (2000), une vitesse d'accumulation considérée lente si elle est inférieure à $7.2 \cdot 10^{-3}$. En appliquant la même hypothèse pour 99% de fatigue après, respectivement, 6 h et 4 h de travail, nous obtenons une vitesse d'accumulation moyenne V_a est entre $5.3 \cdot 10^{-3}$ et 0.19 et une vitesse d'accumulation rapide V_a qui dépasse 0.19 (Givi *et al.* (2015)). Nous considérons également les mêmes hypothèses pour déterminer une vitesse de récupération lente qui soit inférieure à $7.2 \cdot 10^{-3}$, moyenne lorsque V_r est entre $5.3 \cdot 10^{-3}$ et 0.19 et une vitesse de récupération rapide lorsque V_r dépasse 0.19.
- Nous supposons que la distance à parcourir entre les machines ne peut pas dépasser 1500 m. Jusqu'à 400 m, D^t est considérée courte, entre 200 m et 800 m, D^{tm} est considérée raisonnable et entre 600 m et 1500 m, D^t est considérée longue.

La pénibilité ne dépend pas du bruit généré uniquement par la machine sur laquelle l'opérateur est affecté, mais elle dépend également du bruit généré par les machines à proximité. Nous parlons ainsi du bruit ambiant South (2013).

En effet, le bruit ambiant c'est le bruit en un point fixe spécifié dans un atelier, à un instant donné. Comme c'est illustré dans la figure (3.10), il résulte de l'effet cumulé en ce point du bruit émis par chaque machine et de l'effet du local (qui amplifie plus ou moins l'effet émis).



FIGURE 3.10 – Propagation du bruit dans un atelier.

Par conséquent, l'agent doit être capable de calculer la valeur du bruit ambiant lorsqu'il travaille sur une machine pour qu'il puisse déduire la pénibilité. Pour ce faire, nous proposons d'introduire dans la base de connaissances de l'agent les règles logiques suivantes :

- Quand deux bruits de niveaux très différents (c'est-à-dire $\geq 10 \text{ dB}$) s'additionnent, le bruit le plus fort masque le plus faible ;
- Quand deux bruits de niveaux voisins (c'est-à-dire inférieur à 10 dB) s'additionnent, il faut ajouter au bruit le plus fort les valeurs indiquées dans le tableau dans la figure (3.11).

Différence en (dB) entre les deux niveaux sonores	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Valeur en (dB) à ajouter au niveau le plus fort	3	2,6	2,1	1,8	1,5	1,2	1	0,8	0,6	0,5

FIGURE 3.11 – Addition de décibels.

En effet, nous nous sommes basées sur quelques travaux de recherche pour définir ces dernières règles (Thiéry et Canetto (2009); South (2013); Mitschke (2016)). D'après les auteurs, les niveaux de bruit en décibels, de par leur nature logarithmique, ne s'ajoutent pas linéairement. Ils sont combinés en sommant les énergies de chacun. Ce calcul donne la règle suivante : *Quand l'énergie acoustique est doublée, le niveau augmente de 3 dB*. Par exemple, si une machine générant un bruit de niveau

60 dB et une autre à proximité génère 90 dB, le bruit ambiant devient 90 dB. Ainsi, en se basant sur le vecteur $Prox_j$ et le bruit généré $NB_{j'}$ ($j' \neq j$) généré par chaque machine dans le système, l'agent peut déterminer la valeur du bruit ambiant NB'_j lorsqu'il/elle est affecté à la machine j .

7.2 Détérioration des durées opératoires de tâches

Les durées opératoires de tâches peuvent être fortement impactées par la fatigue de l'opérateur $F(t)$ et la pénibilité de la tâche PN_h et elles peuvent être plus longues que prévu. Nous proposons donc de les corriger afin qu'elles puissent prendre en compte l'effet de la fatigue et de la pénibilité.

Comme dans le travail de Digiesi *et al.* (2009), nous suggérons que les durées opératoires augmentent selon une fonction logarithmique. En effet, Digiesi *et al.* (2009) ont utilisé une expression logarithmique pour quantifier le temps supplémentaire nécessaire pour la réalisation d'une tâche.

Dans notre travail, nous supposons que la correction ne se fait qu'au moment de l'affectation de l'agent pour traiter une tâche h , c'est-à-dire à l'instant d'affectation t_a . Nous considérons l'attribut $T'_{kjh}(t_a)$ pour représenter le temps de traitement corrigé pour une pièce k qui est en attente sur la machine j à laquelle l'agent peut être affecté à l'instant t_a . Les durées opératoires corrigées peuvent être calculées comme suit :

$$T'_{kjh}(t_a) = T_{kj}(1 + \delta PN_h \ln(1 + F(t_a))) \quad (3.4)$$

La correction des durées opératoires de tâches peut dépendre du cas traité et diffère d'un système à un autre. Par conséquent, comme dans (Digiesi *et al.* (2009)), nous utilisons un paramètre δ , qui représente l'influence de la fatigue, afin d'adapter cette correction au cas étudié.

Cette correction permet de prendre en compte une durée de dégradation maximale (par exemple, dans le pire des cas, la tâche prend deux fois plus que prévu), étant donné que lorsque $\delta = 0$, la fatigue n'a pas d'influence sur la durée opératoire de la tâche. Dans notre cas, nous utilisons également la pénibilité PN_h , dans la mesure où elle contribue à augmenter la fatigue du travailleur lors du traitement de sa tâche.

8 Interactions entre la composante SED et l'agent

L'interaction entre la composante SED et agent se fait par l'intermédiaire des événements qui peuvent se déclencher lorsqu'il y a un/des changement(s) de l'état d'un/de plusieurs éléments dans l'atelier. Dans notre travail, nous nous intéressons particulièrement aux événements suivants :

- *EvDebutTrav/EvFinTrav* : ces événements indiquent, respectivement, le début et la fin des journées de travail. Le déclenchement de l'évènement *EvDebutTrav* implique que tous les opérateurs deviennent disponibles pour être affectés sur les machines du système. En revanche, le déclenchement de l'évènement *EvFinTrav* implique la fin d'une journée de travail et par conséquent tous les opérateurs deviennent absents. Comme nous nous intéressons à la fatigue pendant le travail, nous faisons l'hypothèse, qu'après chaque journée de travail, les opérateurs récupèrent totalement et que leur fatigue se réinitialise. Ces événements se déclenchent d'une manière cyclique dans la composante SED.
- *EvDebutPause/EvFinPause* : ces événements indiquent, respectivement, le début et la fin d'une période de pause. Lorsque l'évènement *EvDebutPause* se déclenche, les agents se reposent et récupèrent de la fatigue. En revanche, le déclenchement de l'évènement *EvFinPause* indique que les opérateurs

sont à nouveau disponibles pour l'affectation. De même, ces événements se déclenchent aussi d'une manière cyclique.

- *EvArrivPiece_{kj}* : il se déclenche à chaque fois une pièce k entre dans la file d'attente d'une machine j à condition que cette file d'attente soit déjà vide et la machine associée est aussi disponible. Cet événement indique l'arrivée d'une nouvelle pièce qui doit être traitée par un des opérateurs disponibles au moment du déclenchement de l'évènement.
- *EvLibMach_j* : il se déclenche à chaque fois la machine j devient disponible. Une machine est considérée libre/disponible une fois l'opérateur qui le détient termine sa tâche actuelle. Le moment de la libération d'une machine correspond également au moment de la libération de l'opérateur opérationnel qui l'occupe (c'est-à-dire que cet opérateur devient disponible).

9 Implémentation logicielle avec ANYLOGIC

Dans cette section, nous présenterons comment notre cadre conceptuel peut être mis en oeuvre et implémenté dans le cadre d'une simulation. L'objectif est de montrer qu'il est possible de combiner les paradigmes de modélisation de SED, IA, SC et logique floue dans un même modèle de simulation d'atelier de production.

Pour ce faire, nous proposons d'utiliser le simulateur ANYLOGIC. Nous avons opté pour ce simulateur dans notre travail parce qu'il a été initialement conçu pour supporter plusieurs méthodes de modélisation, notamment les agents, et permet de les combiner ensemble favorisant ainsi la construction des approches de simulation combinées (Borshchev (2013)). Néanmoins, il est possible d'utiliser d'autres logiciels de simulation, tel que ARENA.

Pour implémenter la composante SED du modèle de simulation, nous suggérons d'utiliser la bibliothèque de modélisation de processus de ANYLOGIC, appelée

"Process Modeling Library". Cette bibliothèque est centrée sur le processus et permet de prendre en compte le concept de modélisation à événements discrets. À l'aide des objets proposés dans cette bibliothèque, nous pouvons modéliser les systèmes de production en termes de processus (séquences d'opérations impliquant généralement des files d'attente, l'utilisation de ressources, etc.) et de ressources (machines).

Il faut dire que les organigrammes ANYLOGIC sont hiérarchiques, évolutifs, extensibles et orientés objet. Inspirés donc des méthodes de modélisation orientées objets, les développeurs d'ANYLOGIC ont conçu une classe de base appelée "Agent" pour supporter le concept d'agents. Dans cette classe, il est possible de définir des attributs, des événements, des diagrammes d'états-transitions, des diagrammes de stock et de flux (SC), etc.

Nous proposons alors d'utiliser la classe "Agent" pour implémenter notre agent-opérateur en définissant une nouvelle classe "Opérateur" qui hérite de la classe "Agent". Les opérateurs du système représentent ainsi des instances de cette classe. Pour définir les attributs individuels de notre agent (par exemple, son âge) et ses capacités, nous pouvons utiliser des paramètres. Pour décrire son état, nous utilisons un ensemble de variables d'état. Nous pouvons ainsi utiliser des variables continues pour décrire l'état de fatigue de l'agent.

Par ailleurs, nous devons utiliser des variables discrètes pour décrire les variables d'état qui dépendent de la composante SED. Ceci nous amène aux interactions entre la composante SED et la composante Agent se fait à travers des événements discrets, qui lorsqu'ils se déclenchent dans la composante SED peuvent entraîner un/des changement(s) au niveau des valeurs des attributs discrets de la composante agent.

Les comportements, qui caractérisent les agents, sont souvent décrits par des diagrammes d'états-transitions dans ANYLOGIC. Dans notre travail, nous distinguons deux sortes de comportements. Le premier concerne le comportement d'affectation de l'agent, où il/elle change d'état suite à un événement au niveau de la composante SED, à une décision d'affectation, après l'écoulement d'une période de repos ou de marche, etc. Pour ce type de comportements, nous proposons de définir des diagrammes d'états-transitions pour le représenter.

Le deuxième type de comportements concerne l'évolution de la fatigue durant le travail. Pour le représenter, nous proposons de définir des diagrammes de stocks et de flux en se basant sur la palette "*System Dynamics*" d'ANYLOGIC, qui permet la représentation graphique de l'évolution d'un phénomène continu. Dans cette palette, les stocks (également connus sous le nom de niveaux, d'accumulations ou de variables d'état) sont utilisés pour représenter les processus continus. Les flux sont utilisés pour définir l'évolution des valeurs des stocks dans le temps et définissent ainsi la dynamique du système (Borshchev (2013)).

Par conséquent, nous pouvons représenter le niveau de fatigue de l'agent $F(t)$ par un stock et le taux d'accumulation V_a et celui de la récupération V_r par des flux. L'introduction des équations différentielles, qui décrivent le taux de variation du stock, se fait au niveau des flux. Il est à noter que ANYLOGIC offre la possibilité d'introduire les équations de façon manuelle. Puisque les équations différentielles sont une adaptation du modèle de quantification de fatigue utilisé et comme le choix du modèle varie selon le type de travail, le fait de pouvoir d'introduire les équations manuellement, nous permet de changer uniquement les équations insérées sans modifier les principes de modélisation.

10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé un cadre conceptuel qui permet de modéliser et de simuler les systèmes de production tout en prenant en compte la fatigue des opérateurs durant le travail. Le cadre conceptuel proposé combine différents paradigmes de modélisation qui sont la Simulation à Événement Discret, Agent Intelligent, la Simulation Continue et la Logique Floue.

Nous avons utilisé le paradigme d'agent intelligent pour modéliser les opérateurs dans les modèles de simulation des ateliers de production. Nous avons ainsi proposé une nouvelle représentation d'agent qui permet d'intégrer différentes caractéristiques des opérateurs humains (l'évolution de la fatigue, les compétences, etc.). Nous avons également proposé une approche basée sur la logique floue qui permet d'exprimer la pénibilité au travail tout en prenant en considération ses différents facteurs. Une implémentation logicielle avec le simulateur ANYLOGIC a été également proposée pour mettre en oeuvre notre cadre conceptuel.

Grâce à l'usage des paradigmes de simulation, notre approche combinée peut être considérée comme étant générique et dynamique et peut être utilisée pour simuler différents types de systèmes de production et de tâches. Elle peut également être considérée comme un outil d'aide à la décision qui permet de construire des modèles de simulation plus réalistes en intégrant la dimension fatigue des opérateurs. Elle permet aussi de fournir des connaissances pertinentes à la fois sur les performances industrielles que sur l'évolution de la fatigue des opérateurs durant le travail. Ces connaissances peuvent fortement aider les responsables de production à améliorer le bien-être de leurs opérateurs au travail.

Toutefois, bien que l'approche proposée soit capable d'apporter une plus-value dans la simulation des systèmes de production en prenant en considération la fatigue

des opérateurs, nous avons conscience que la fatigue et la pénibilité au travail sont des phénomènes très complexes.

Nous ne prétendons donc pas que notre approche puisse être capable de modéliser parfaitement la fatigue des opérateurs dans la simulation des systèmes de production. Au contraire, ce que nous proposons ici c'est un premier pas vers l'intégration des facteurs humains dans la simulation des ateliers de production.

Maintenant que les paradigmes utilisés sont combinés et le cadre conceptuel est mis en oeuvre, nous pouvons illustrer l'intérêt de notre approche. Cela sera fait à l'aide des exemples d'application que nous détaillerons au cours du prochain et dernier chapitre.

Chapitre 4

Application de l'Approche de Modélisation

1 Introduction

L'objectif de ce chapitre consiste à confronter l'approche proposée dans le chapitre précédent à des exemples d'application afin d'illustrer son intérêt et montrer son utilité et sa pertinence pour aborder des problèmes de production où les opérateurs peuvent être sujets à la fatigue et où les performances industrielles peuvent être impactées par la fatigue des travailleurs. A cet égard, nous proposons d'étudier deux exemples de problèmes. L'idée fut de tester différents scénarios de production et d'évaluer leurs impacts sur les performances du système et sur l'évolution de la fatigue des travailleurs.

Ainsi, le premier exemple concerne le problème d'affectation dynamique des opérateurs tout en prenant en considération la fatigue afin de réduire la durée moyenne de passage de pièces dans le système. Le deuxième exemple concerne le problème d'agencement de machines dans l'atelier de production tout en prenant en compte la fatigue des opérateurs. L'objectif est d'identifier un agencement efficient, en termes

de performances, et qui respecte le bien-être des opérateurs au travail (c'est-à-dire qu'il permet d'éviter la fatigue excessive des opérateurs).

2 Affectation dynamique des opérateurs dans les systèmes de production

2.1 Contexte

Dans cet exemple, nous nous intéressons aux problèmes d'affectation d'opérateurs flexibles dans les systèmes de production caractérisés par un comportement imprévisible et fluctuant. Nous nous attacherons plus particulièrement aux ateliers de type Job-Shop, où le nombre d'opérateurs est inférieur à celui de machines, produisant des produits divers, et dont les tâches ne peuvent pas être interrompues. Les opérateurs ont des degrés de flexibilité différents. Certains opérateurs peuvent être qualifiés pour travailler sur une seule machine et d'autres sont qualifiés pour plusieurs. De même, plusieurs opérateurs peuvent être qualifiés pour une même machine à la fois à condition qu'ils ne soient jamais affectés à cette machine au même temps.

A cause du comportement stochastique de ce type de systèmes, il est souvent difficile, voire impossible, de prévoir les tâches que les opérateurs doivent traiter ni les machines sur lesquelles ils peuvent être sollicités. Par conséquent, il est souvent difficile de prévoir l'affectation à l'avance. C'est pourquoi, les responsables de production cherchent à affecter les opérateurs d'une façon dynamique et en ligne, selon l'état du système à l'instant où l'opérateur devient disponible Ammar *et al.* (2013). Dans ce contexte-là, il semble que les méthodes d'optimisation classiques peuvent ne pas être pertinentes.

2.2 Synthèse sur les approches d'affectation dynamiques

D'après l'étude bibliographique que nous avons menée sur les problèmes d'affectation dynamiques d'opérateurs (Ferjani *et al.* (2017)), nous avons constaté que les règles d'affectation de type "When" et "Where" sont les plus utilisées dans la littérature (Ammar *et al.* (2013)). Les règles d'affectation de type "when" sont utilisées pour gérer la fréquence de déplacements et la durée d'affectation d'un opérateur alors que les règles de type "where" permettent de choisir la machine à laquelle l'opérateur libre va être affecté (Xu *et al.* (2011)).

D'après Ammar *et al.* (2014), il existe principalement deux types de règles "When" : la règle "When décentralisée" (When DEC) qui ne permet au travailleur de se déplacer et être affecté à une autre machine que lorsque la file d'attente de la machine sur laquelle il travaille devient totalement vide. D'après les auteurs, cette règle est plus utilisée dans les travaux qui considèrent la durée de déplacement entre les machines. En revanche, lorsque les durées de déplacement sont négligeables, la règle "When centralisée" (When CEN) est plutôt recommandée. Cette règle considère l'opérateur disponible dès qu'il/elle finisse sa tâche même s'il y a d'autres pièces en attente sur la machine à laquelle il/elle est affecté.

Plusieurs règles "Where" ont été utilisées dans la littérature, parmi ces règles, nous trouvons :

- Shortest Processing Time (SPT) : suggère d'affecter l'opérateur à la machine dont la première pièce en attente a la courte durée opératoire.
- Largest Number in Queue (LNQ) : affecte l'opérateur à la machine qui a la plus grande quantité des encours en attente.
- Longest waiting time (LWT) : propose d'affecter l'opérateur à la machine qui contient la pièce ayant la plus longue durée d'attente.

Le choix de la règle d'affectation à utiliser dépend des conditions opératoires du système et des objectifs désirés (Salum et Araz (2009)). Particulièrement, dans cet exemple, nous cherchons à affecter les opérateurs afin de réduire la durée moyenne de passage de pièces dans le système (Mean Flowtime MFT). D'après Salum et Araz (2009), qui ont mené une comparaison entre les règles d'affectation en utilisant la simulation, la règle SPT est la plus performante en termes de minimisation de MFT. Toutefois, les auteurs n'ont pas pris en considération la fatigue des opérateurs dans cette comparaison.

Dans des travaux plus récents, Ferjani *et al.* (2017) et Ferjani *et al.* (2015) ont étudié le problème d'affectation dynamique des opérateurs en prenant en compte la fatigue. Comme la fatigue entraîne une détérioration des durées opératoires de tâches ce qui conduit, par conséquent, à une augmentation du MFT, les auteurs ont proposé de corriger les durées opératoires de tâches en fonction de la fatigue des opérateurs et ils ont proposé une heuristique d'affectation multi-critères qui permet de réduire le MFT.

Grâce à l'utilisation de la simulation dans leur travail, Ferjani *et al.* (2017) ont pu également comparer les règles SPT et LNQ, de point de vu minimisation de MFT. Leurs résultats ont montré que la règle LNQ est souvent plus performante que la règle SPT lorsque les opérateurs sont soumis à la fatigue. Autrement dit, plus les durées opératoires sont longues, plus la règle LNQ devient performante. Cependant, il faut noter que les auteurs n'ont pas pris en considération les pauses durant lesquelles les travailleurs récupèrent de la fatigue. Ceci signifie que les niveaux de fatigue des opérateurs peuvent diminuer durant les journées de travail ce qui réduit, par conséquent, la détérioration des durées opératoires. Dans ce cas, la règle LNQ reste-elle toujours la plus performante ?

Aux meilleurs de nos connaissances, il n'y a pas d'autres travaux scientifiques qui ont pris en compte la fatigue dans l'affectation dynamique et en ligne des opérateurs

polyvalents. Par conséquent, nous n'avons pas de connaissances sur quelle règles les gestionnaires peuvent utiliser pour gérer leurs travailleurs lorsqu'ils sont soumis à la fatigue. Pour cela, il est nécessaire de comparer les stratégies d'affectation existantes afin de déterminer celle qui contribue à réduire le MFT.

Sachant que la simulation est la technique la plus utilisée dans l'évaluation et la comparaison des stratégies d'affectation dans un environnement de production dynamique (Salum et Araz (2009); Ammar *et al.* (2014)), nous proposons de l'utiliser également pour faire notre comparaison. Dans ce contexte, notre approche de modélisation paraît intéressante car elle nous permet de concevoir des modèles pour simuler et évaluer les performances des systèmes de production tout en prenant en compte la fatigue des opérateurs. Grâce à ce type de modèles, nous pouvons faire des comparaisons entre les stratégies d'affectation existantes et déterminer celle qui est la plus performante sur le MFT lorsque les travailleurs sont soumis à la fatigue.

2.3 Présentation du cas d'étude

Dans cet exemple, nous suggérons de comparer les règles d'affectation SPT, LPT (Longest Processing Time), LNQ, SNQ (Shortest Number in Queue), LWT (Longest Waiting Time) et SWT (Shortest Waiting Time), qui sont les plus utilisées dans la littérature. Pour ce faire, nous proposons d'appliquer notre approche combinée pour construire des modèles de simulation pour un atelier de production de type Job-Shop composé de :

- Un ensemble M de m machines hétérogènes (c'est-à-dire différentes en terme de produits à manipuler ou d'opérations à réaliser).
- Un ensemble O de n opérateurs polyvalents qui peuvent être affectés à l'ensemble M . Pour que l'affectation en ligne soit envisagée, nous supposons que $n < m$. En effet, il n'est pas pertinent dans notre cas d'étude d'avoir le même nombre d'opérateurs que de machines car ceci pourrait conduire à l'affecta-

tion d'un opérateur par machine et donc l'affectation n'aurait pas beaucoup de sens dans ce cas.

- Un ensemble P de p types de produits, dont chacun a son propre gamme de fabrication. Autrement dit, le processus de fabrication de chaque produit est composé de plusieurs opérations réalisées sur différentes machines (sans interruption).

Nous abordons une classe de systèmes dont l'évolution de l'état du processus de production ne peut pas être prévisible à cause de l'arrivée aléatoire des pièces dans le système et de la fluctuation au cours du temps des commandes clients. Ainsi, pour représenter l'atelier et décrire son fonctionnement et sa dynamique, nous utilisons la composante SED de notre approche.

Comme l'objectif de ce cas d'étude est de déterminer la règles d'affectation la plus performante sur le MFT, nous utilisons également la composante SED pour calculer le MFT.

La pénibilité ici est due uniquement au bruit généré par la machine sur laquelle un opérateur travaille et au poids du produit qu'il/elle manipule pendant la durée de traitement d'une tâche. Pour arriver à déterminer la pénibilité de la tâche en cours de traitement, nous utilisons les règles floues qui sont dans la base de connaissances de l'agent (section 7.1 du chapitre précédent).

Les temps de traitement "théoriques" des pièces sont donnés en minutes et varient selon la machine et le type du produit. Dans cet exemple, la pénibilité et la fatigue ont une incidence sur la durée que l'opérateur doit passer pour traiter la tâche. Nous considérons ainsi que l'incidence des autres facteurs de pénibilité est négligeable, voire inexistant pour certains facteurs, à savoir le travail répétitif puisqu'il s'agit ici d'un contexte de production dynamique (les opérateurs sont polyvalents et peuvent traiter différents types de tâches).

Dans cet atelier, chaque machine doit avoir au moins un opérateur qualifié et chaque opérateur doit être qualifié pour travailler au minimum sur une seule machine. Les opérateurs peuvent marcher pour se déplacer entre les différentes machines du système et être fatigués. Ainsi, nous utilisons la structure de l'agent présentée dans le chapitre précédent (section 5) pour représenter les opérateurs.

Le comportement d'affectation des opérateurs dans l'atelier est décrit par le diagramme d'état-transitions présenté dans la figure (4.1). Nous considérons ici qu'un agent peut être dans l'état "Disponible", "Opérationnel", "Absent", "En Repos" ou "En Marche".

L'agent est considéré dans l'état "Disponible" lorsqu'il/elle est en attente de l'arrivée d'une nouvelle pièce ou d'une machine pour qu'elle devienne disponible (en attente du déclenchement d'un événement de la composante SED). L'agent est considéré "Opérationnel" lorsqu'il/elle est affecté à une machine et en train de traiter une tâche. Il/elle est considéré "En Repos" lorsqu'il/elle prend une pause, considéré "Absent" lorsqu'il/elle termine son travail journalier et supposé "En Marche" lorsqu'il/elle se déplace pour travailler sur une machine dont sa position géographique est différente de celle de l'agent.

Rappelons que la question d'affectation se pose à chaque fois un opérateur devient disponible. Dans notre cas d'étude, un agent est considéré disponible dans les cas suivantes :

- Si l'agent est "Absent", il/elle devient "Disponible" lorsque le travail journalier commence.
- Si l'agent est "Opérationnel" sur une machine, il/elle devient "Disponible" lorsque cette machine se libère.
- Si l'agent est "En Repos", il/elle devient "Disponible" lorsque la pause se termine.

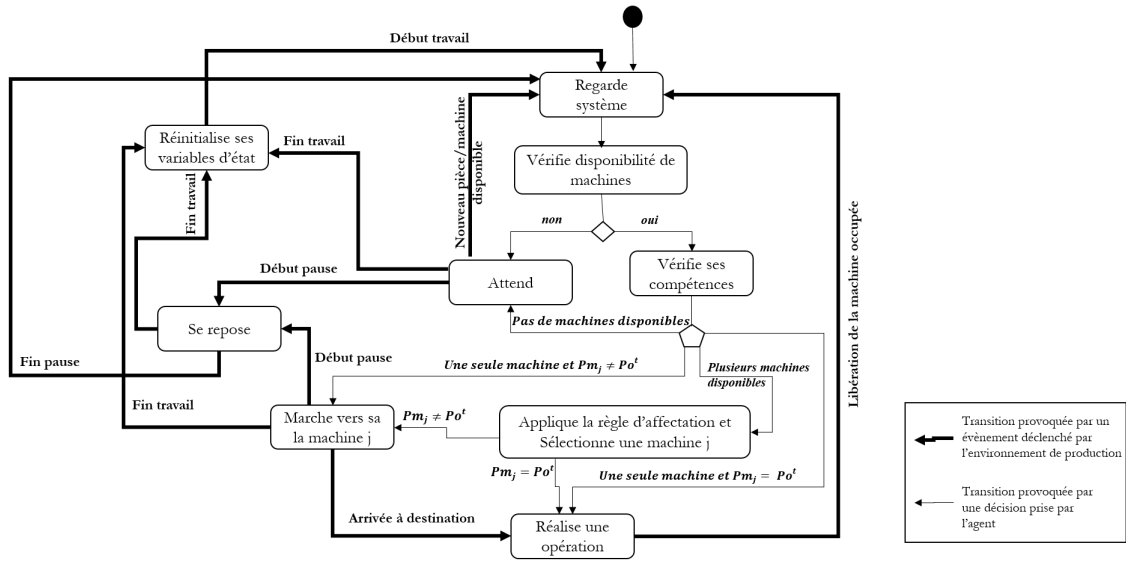


FIGURE 4.1 – Description du comportement d'affectation de l'agent durant le travail.

2.4 Expérimentation

Pour illustrer notre premier cas d'étude, nous considérons le système présenté par la figure (4.2), il s'agit d'un atelier de type Job-Shop composée de cinq machines hétérogènes $M0$, $M1$, $M2$, $M3$ et $M4$, quatre agents polyvalents $Agent0$, $Agent1$, $Agent2$ et $Agent3$ et 3 différents types de produits $P0$, $P1$ et $P2$. Les compétences des agents sont données par la matrice Q .

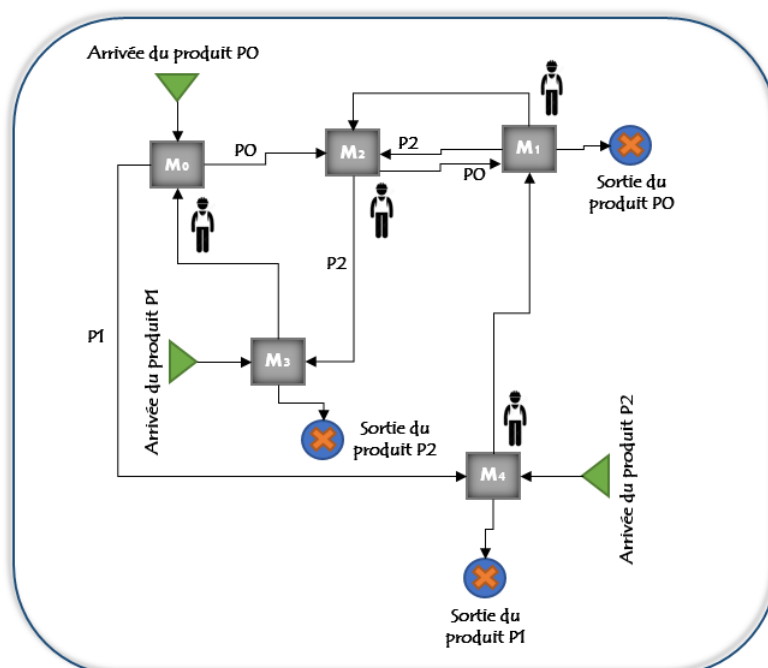


FIGURE 4.2 – Représentation du système de production étudié.

$$\begin{array}{c}
 Q \\
 \begin{array}{ccccc}
 & M0 & M1 & M2 & M3 & M4 \\
 \begin{array}{l}
 Agent0 \\
 Agent1 \\
 Agent2 \\
 Agent3
 \end{array}
 & \left(\begin{array}{ccccc}
 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\
 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
 0 & 1 & 1 & 0 & 1
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \end{array}$$

La pénibilité au travail dépend du bruit généré par les machines. Le tableau (4.1) indique le niveau de bruit généré par chaque machine dans le système. Elle dépend également du poids des pièces à manipuler. La matrice ci-dessous indique le poids de

chaque produit sur chacune des machines du système. Le signe "-" dans la matrice signifie que le produit ne passe pas par la machine associée dans son processus de fabrication.

Tableau 4.1 – Bruit généré par les machines.

	M0	M1	M2	M3	M4
Niveau de bruit en dB	70	30	50	100	60

	Poids des produits (kg)				
	M0	M1	M2	M3	M4
P0	11	2	5	—	—
P1	3	—	—	6	12
P2	—	8	12	3	3.5

Les pièces de type $P0$, $P1$ et $P2$ arrivent aléatoirement selon une distribution exponentielle avec, respectivement, les paramètres $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$ et $\lambda_3(t)$. La moyenne des commandes clients varie dans le temps pour chaque type de produit. Par conséquent, les valeurs de $\lambda_i(t)$, $i = 1, 2, 3$ dépendent du temps et sa fluctuation est illustrée par la figure (4.3).

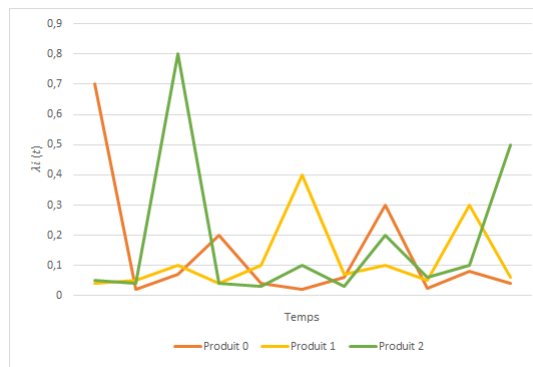


FIGURE 4.3 – Fluctuation dans le temps des commandes clients.

Chaque pièce est traitée suivant un ordre de séquence prédéfini en passant par un ensemble de machines selon la règle de priorité FIFO (Premier Arrivé Premier Servi). Le temps de transfert des pièces entre les machines est supposé négligeable et les durées opératoires "théoriques" des pièces sur les machines sont supposées déterministes et varient d'un produit à un autre et d'une machine à une autre.

Les durées opératoires "théoriques" sont déterministes et elles varient également selon le type du produit et selon la machine. Elles sont données par le tableau (4.2).

Tableau 4.2 – Durées opératoires "théoriques" exprimées en minutes.

	M0	M1	M2	M3	M4
P0	2	6	10	-	-
P1	7	-	-	15	8
P2	-	4	3	8	3

Concernant les horaires de travail, nous considérons ici que le travail journalier dure au total 10 h entrecoupées par 2 h de repos (la pause aura lieu après 4 h de travail).

Puisque le but de cet exemple est de tester différentes stratégies d'affectation afin de déterminer la plus performante sur le MFT, nous proposons de faire des scénarios de test, dont l'objectif de chacun est d'évaluer une des stratégies d'affectation mentionnées ci-avant. Nous proposons alors de tester les six scénarios suivants :

- **Scénario 1** : Nous considérons que tous les opérateurs utilisent la stratégie d'affectation SPT pour sélectionner les machines. Autrement dit, les agents doivent favoriser les durées opératoires courtes.
- **Scénario 2** : Les opérateurs appliquent la règle d'affectation LPT, c'est-à-dire qu'ils doivent favoriser les durées opératoires longues.
- **Scénario 3** : Nous testons la règle d'affectation LNQ qui privilégie les machines les plus chargées.

- **Scénario 4** : Les opérateurs appliquent la règle SNQ qui favorise les machines les moins chargées.
- **Scénario 5** : Nous testons la règle LWT qui privilégie les durées d'attente longues.
- **Scénario 6** : Dans ce dernier scénario, les opérateurs s'appuient sur la règle d'affectation SWT et favorisent les durées d'attente courtes.

2.5 Résultats et discussions

Le système de production décrit dans la sous-section précédente a été implémenté avec le simulateur ANYLOGIC version 8.2.3. Les expériences ont été réalisées sous les conditions suivantes : une longue durée de simulation de 80 000 unités de temps (en minutes) avec 8 répliques. L'exécution de chaque réplique donne la mesure de performance calculée sur 10 000 unités de temps. Les répliques sont effectuées dans les mêmes conditions expérimentales déjà décrites.

En plus de l'évaluation des performances des règles d'affectations, il est important d'évaluer également l'impact de la correction des durées opératoires de tâches parce que nous n'avons pas une formule universelle qui décrit l'impact de la fatigue. Pour ce faire, nous avons procédé à des analyses de sensibilité avec différentes valeurs de δ (équation 3.4).

2.5.1 Analyse de sensibilité du niveau d'impact de la fatigue

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à étudier la sensibilité de nos résultats de simulation par rapport au niveau d'impact de la fatigue considéré dans chaque expérimentation. Cette analyse est particulièrement intéressante dans notre exemple car elle permet d'examiner l'impact du choix de la formule utilisée pour corriger

les durées opératoires sur les performances des règles d'affectation étudiées. Nous considérons les valeurs suivantes de δ :

- Pour un impact modéré de la fatigue sur les durées de traitement de tâches, nous considérons que, lorsque l'opérateur atteint son niveau de fatigue maximal, la durée opératoire ne peut augmenter au maximum que de 30% par rapport à sa valeur initiale (c'est-à-dire la valeur théorique). Cela signifie que $\delta = \frac{0.3}{PN_h} \ln(2)$.
- Pour un effet sévère, nous considérons que, $\delta = \frac{0.7}{PN_h} \ln(2)$, ce qui signifie que la durée de traitement de la tâche peut augmenter au maximum de 70% par rapport à sa valeur initiale.
- Lorsqu'il n'y a pas d'impact de la fatigue sur les durées opératoires, $\delta = 0$.

Dans le but de comparer les performances estimées (MFT) et obtenues par les stratégies d'affectation étudiées, nous avons effectué des tests de Student pour échantillons appariés au seuil $\alpha = 0,05$. Ce type de tests statistiques est largement utilisé en simulation pour comparer des scénarios alternatifs. Les résultats de simulation, obtenus pour chacun des scénarios considérés, sont donnés dans les tableaux (4.3), (4.4) et (4.5).

Tableau 4.3 – Comparaisons entre les règles d'affectation lorsque l'impact de la fatigue est sévère.

	$\delta = \frac{0.7}{PN_h} \ln(2)$					
	SPT	LPT	LNQ	SNQ	LWT	SWT
Moyenne de MFT	1167.08	1044.96	984.79	1242.47	1006.64	1323.51
Ordre d'efficacité	4	3	1	5	2	6

Plusieurs interprétations peuvent être tirées des résultats obtenus. D'abord, il est clair que les performances estimées pour les stratégies d'affectation étudiées dans cet exemple varient en fonction de l'effet de la fatigue. Une première interprétation globale et prévisible, qui peut être tirée de notre analyse de sensibilité, est que la valeur

Tableau 4.4 – Comparaisons entre les règles d'affectation lorsque l'effet de la fatigue est modéré.

	$\delta = \frac{0.3}{PN_h} \ln(2)$					
	SPT	LPT	LNQ	SNQ	LWT	SWT
Moyenne de MFT	1119.95	1025.44	978.62	1233.49	986.91	1303.73
Ordre d'efficacité	4	3	1	5	2	6

Tableau 4.5 – Comparaisons entre les règles d'affectation lorsqu'il n'y a pas d'effet de fatigue.

	$\delta = 0$					
	SPT	LPT	LNQ	SNQ	LWT	SWT
Moyenne de MFT	944.17	973.04	958.88	1060.29	966.48	1166.59
Ordre d'efficacité	1	4	2	5	3	6

du MFT est sensible au niveau d'impact de la fatigue δ . En effet, nous pouvons observer que la valeur du MFT, pour le même scénario, augmente significativement dès que l'impact de la fatigue devient important. Ceci peut être expliqué par l'augmentation des durées opératoires de tâches à cause de la fatigue des opérateurs qui peut conduire, au fil du temps, à l'accumulation des pièces dans les files d'attente et, par conséquent, à l'augmentation de la valeur du MFT.

Une deuxième interprétation générale concerne l'ordre d'efficacité des règles d'affectation qui varie aussi selon le niveau d'impact de la fatigue. Nous pouvons constater que, d'après le tableau (4.3), la stratégie LNQ est considérée comme la plus efficace. Cependant, cette interprétation ne reste pas toujours vraie lorsque $\delta = 0$. En effet, les tests statistiques réalisés nous ont permis de conclure que, particulièrement dans notre exemple et dans le cas où la fatigue n'a pas d'impact sur les durées opératoires, la règle d'affectation SPT est significativement plus efficace que les autres règles étudiées. En revanche, dès que l'effet de la fatigue devient important, nous remarquons que la règle LNQ devient significativement plus performante.

Contrairement aux résultats obtenus dans (Salum et Araz (2009)), où les auteurs ont montré à travers des comparaisons de règles d'affectation que SPT est la règle

la plus performante sur le MFT, nous avons pu constater que, particulièrement dans notre exemple, lorsque l'effet de la fatigue devient sévère, le critère de la règle LNQ (celui de la quantité de charge en attente sur les machines) devient plus important que les autres critères considérés. Ces résultats confirment également les résultats que nous avons obtenus dans un autre travail réalisé hors du cadre de cette thèse (Ferjani *et al.* (2017)).

Nous avons également pu constater que, particulièrement dans cet exemple, il semble que la règle SWT est la moins efficace sur le MFT. En effet, nous avons remarqué que, quel que soit la valeur de δ , l'application de la règle SWT donne toujours le performance le moins faible. En revanche, nous avons remarqué que, lorsque l'effet de la fatigue devient plus important, la règle LWT devient plus performante.

Généralement et selon l'ordre d'efficacité des règles dans le tableau (4.3), nous pouvons constater qu'il est plus judicieux de privilégier les machines les plus chargées dans notre cas pour éviter l'accumulation des tâches dans les files d'attente lorsque les opérateurs sont soumis à la fatigue.

En conclusion, nous pouvons constater que les résultats obtenus dans cet exemple sont particulièrement sensibles à la formule utilisée pour la correction des durées opératoires. Notons que, dans le cadre de cet exemple, nous avons exploité le travail de Digiesi *et al.* (2009). Toutefois, il est possible d'utiliser d'autres formules ce qui nécessite une recherche bibliographique plus approfondie en ergonomie sur les modèles mathématiques pour la correction des durées opératoires.

2.5.2 Analyse des tendances d'évolution de la fatigue des opérateurs

Bien que nous ayons tiré un certain nombre de conclusions dans le paragraphe précédent, il faut dire que les résultats de simulation obtenus ne concernent pas uniquement les performances des règles d'affectation, en terme de MFT, mais égale-

ment l'évolution de la fatigue des opérateurs durant le travail. Grâce au modèle de simulation implémenté, nous avons obtenu des courbes qui décrivent les tendances d'évolution de fatigue pour chacun des opérateurs dans le système. Par exemple, dans la figure (4.4) nous présenterons quelques courbes obtenues durant la simulation lorsque les travailleurs ont utilisé la règle d'affectation SPT.

Notons que les courbes dans la figure (4.4) décrivent l'évolution de la fatigue des opérateurs durant cinq journées de travail. Rappelons qu'une journée est l'équivalent de 10 h (600 minutes) de travail entrecoupées par 2 h de repos. Les périodes durant lesquelles l'opérateur accumule de la fatigue correspondent aux phases où la courbe est croissante. En revanche, lorsque la courbe devient décroissante, il s'agit d'une récupération. Rappelons également que l'accumulation signifie que l'opérateur est entrain de réaliser une tâche ou de marcher une distance importante, alors que, la récupération signifie qu'il/elle prend une pause ou en attente d'un travail. Lorsque l'indicateur de fatigue est nul, nous parlons d'opérateurs absents (dans notre cas signifie la fin d'une journée de travail).

En comparant l'évolution de la fatigue des opérateurs dans la figure (4.4), nous pouvons remarquer que le niveau de fatigue de l'opérateur 3 est souvent inférieur à 0.6, ce qui n'est toujours pas le cas pour les autres opérateurs. Nous pouvons donc interpréter que cet opérateur semble être le moins fatigué durant les cinq premiers jours de travail pour ce scénario.

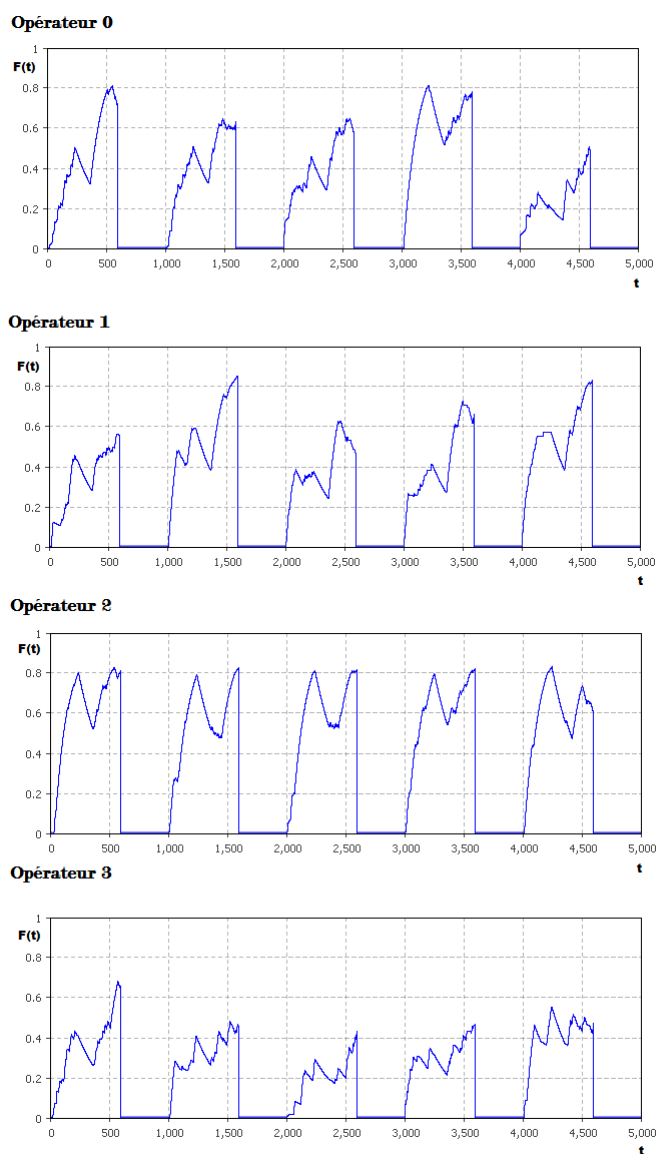


FIGURE 4.4 – Évolution de la fatigue des opérateurs durant le travail.

En revanche, nous avons pu constater que, particulièrement dans notre exemple et pour ce scénario, il semble que l'opérateur 2 est le plus fatigué. En fait, nous remarquons que l'indicateur de fatigue de cet opérateur a atteint la valeur 0.8 sur toutes les journées de travail, ce qui n'est pas le cas pour les autres travailleurs. Généralement, nous pouvons remarquer que l'opérateur 2 ne récupère pas beaucoup

durant le travail. En effet, à l'exception des pauses formelles, il semble que cet opérateur prenne rarement de périodes de repos. Ceci peut être expliqué par la quantité importante de travail que le travailleur a du réaliser ou par la pénibilité des tâches qu'il/elle a du traiter. Nous avons décidé alors de revenir sur le modèle de simulation et de faire un zoom sur l'opérateur 2 durant la simulation pour voir quelles sont les activités qu'il/elle a fait.

En effet, le travailleur 2 est qualifié pour travailler sur les machines M0, M2 et M3 et, dans le tableau (4.1), ces machines sont généralement les plus bruyantes dans le système ce qui peut supporter notre explication, en terme de pénibilité. En outre, nous avons remarqué que durant la simulation, l'opérateur 2 est souvent affecté à la machine M3. Sachant que cette machine représente la machine goulot dans notre exemple car sur laquelle se traitent les pièces ayant la durées opératoires la plus longue (15 mn). Étant donné que l'opérateur 2 est souvent affecté à la fois à la machine la plus bruyante et la plus chargée dans le système, il est raisonnable qu'il/elle soit le plus fatigué ce qui supporte, par conséquences, les résultats de fatigue obtenus.

Il est à noter que les variations des niveaux de fatigue constatées pendant les journées simulées peuvent être expliquées par la fluctuation des demandes clients ce qui implique un comportement changeant et stochastique du système de production. Par conséquent, nous ne pouvons pas avoir le même comportement d'opérateurs pour toutes les journées de travail.

3 Agencement de machines dans l'atelier de fabrication

3.1 Contexte

Les problèmes d'agencement sont des activités d'ingénierie qui ont une forte influence sur la conception des ateliers de production. Elle est habituellement définie comme un problème d'optimisation (Jacquenot (2010)). Dans la littérature scientifique, nous trouvons différentes définitions pour ce problème. L'idée principale reste cependant toujours la même : *étant donné un ensemble de composants, l'optimisation d'agencement consiste à trouver l'ensemble des variables de positionnement des composants afin de minimiser certains objectifs, tout en respectant certaines contraintes* (Bénabès *et al.* (2011)). Cette définition générale s'adapte à divers applications industrielles.

Dans notre exemple, nous nous intéressons, particulièrement, aux problèmes d'agencement de machines hétérogènes (c'est-à-dire que sur lesquelles ne se traitent pas les mêmes types de tâches) dans un système de production avec des opérateurs polyvalents et hétérogènes. L'objectif est de trouver la meilleure position pour l'installation de chaque machine dans le système afin d'améliorer ses performances. Nous considérons que les positions réservées à l'installation de machines sont fixes et nous cherchons alors à agencer les machines selon ces positions.

Il est connu que la façon, dont les machines sont agencées dans le système, a un impact significatif sur le coût de fabrication, la quantité des encours, les délais et la productivité de l'atelier. C'est pourquoi, les problèmes d'agencement de machines ont fait l'objet de nombreuses études dans la littérature et ont généré une grande quantité de publications (Drira *et al.* (2007); Zhu *et al.* (2017); Hosseini-Nasab *et al.* (2018)). Dans cet exemple, l'agencement de machines a également une incidence sur la fatigue des opérateurs durant le travail.

Parmi les facteurs de pénibilité, nous trouvons le bruit qui peut être généré par les machines. Ainsi, il peut y avoir des machines bruyantes et d'autres qui sont moins bruyantes ou qui ne le sont pas. Il faut dire que, non seulement, l'opérateur qui occupe une machine bruyante peut accumuler de la fatigue à cause du bruit, mais également ceux qui travaillent à proximité. Ainsi, selon la façon dont les machines sont agencées dans le système, nous pouvons trouver des opérateurs qui travaillent dans un milieu bruyant et qui sont plus fatigués que d'autres qui travaillent dans un milieu calme.

La façon dont les machines sont agencées a une influence non pas uniquement sur la pénibilité de travail, mais également sur les distances que les opérateurs doivent parcourir durant leur travail. Par exemple, nous pouvons trouver qu'il y a des opérateurs qui parcourent des distances qui leur permettent d'accumuler de la fatigue et d'autres qui l'aident à récupérer. Par conséquent, l'agencement de machines dans le système a un impact énorme sur la manière comment la fatigue évolue durant le travail. Ainsi, nous pouvons trouver qu'il y a des agencements qui induisent plus de fatigue que d'autres.

Compte tenu ses effets néfastes sur les opérateurs et les performances du système de production, il est important pour les managers de trouver l'agencement de machines qui induit le moins de fatigue tout en gardant ou améliorant les performances industrielles afin d'améliorer également le bien-être de ses opérateurs au travail. Pour ce faire, ils doivent être capables de de comparer différents agencements de machines.

Il est important de noter qu'il est difficile de déterminer à l'avance l'agencement qui induit le moins de fatigue. Ceci est principalement dû au comportement des systèmes de production, qui est souvent imprévisible, à la différence de qualifications entre les opérateurs et aux stratégies d'affectation utilisées. Dans ces conditions, il est souvent difficile de prévoir les tâches que les opérateurs doivent traiter, les

machines sur lesquelles ils doivent travailler et les distances qu'ils doivent marcher. Il est donc indispensable, pour les managers, de disposer d'un outil efficaces qui leur permettent d'évaluer l'impact d'un agencement donné sur l'évolution de la fatigue.

Dans ce contexte, Drira *et al.* (2007) ont souligné que la simulation a été souvent utilisée pour évaluer l'impact d'un agencement donné sur les performances des systèmes. Cependant, et aux mieux de nos connaissances, la fatigue des opérateurs, n'a pas été prise en considération dans les modèles de simulation utilisés. Dans ce contexte, notre approche paraît pertinente car elle permet de concevoir des modèles de simulation des systèmes de production qui prennent en compte la fatigue des opérateurs et permet de comparer différents aménagements de machines.

3.2 Présentation du modèle de simulation

Nous suggérons dans cette section d'étudier le même type d'atelier de production avec les mêmes caractéristiques que dans le premier cas d'étude. En effet, il s'agit quasiment du même exemple.

Les positions géographiques des machines dans le système, ont été supposées fixes dans l'exemple précédent, alors qu'ici la position doit être variable pour pouvoir tester différents agencements de machines.

Nous supposons ici que la pénibilité ne dépend pas uniquement du bruit généré par la machine sur laquelle l'opérateur est affecté, mais elle dépend également du bruit ambiant. Ainsi, nous utilisons en plus de ses règles floues, les règles logiques définies dans la section (7.1) du chapitre précédent.

Nous supposons ici que les opérateurs appliquent la règle SPT pour sélectionner les machines où travailler. Nous utilisons donc la stratégie d'affectation SPT qui se trouve dans la base de connaissances de notre agent.

3.3 Expérimentation

Tout comme l'exemple précédent, le système considéré ici est également composé de cinq machines hétérogènes et trois différents types de produits ayant divers gammes de fabrication. Cependant, nous considérons seulement trois opérateurs polyvalents dans cet exemple.

L'architecture de l'atelier de production est représentée par la figure (4.5). Nous avons cinq positions fixes réservées pour l'installation des machines (représentées par des croix dans la figure). Les distances séparant les différentes positions sont également données par la même figure.

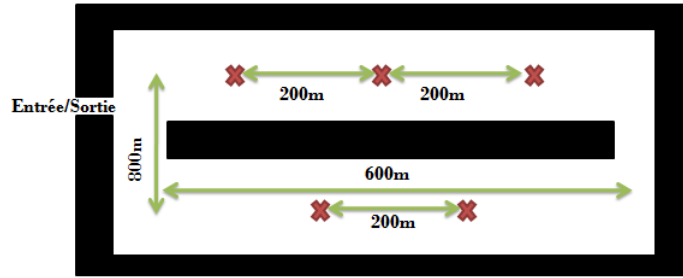


FIGURE 4.5 – Architecture du système considéré dans l'exemple 2.

$$\begin{array}{c}
 Q' \\
 \begin{array}{ccccc}
 & M0 & M1 & M2 & M3 & M4 \\
 Agent0 & \left(\begin{array}{ccccc}
 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 1 & 1
 \end{array} \right) \\
 Agent1 \\
 Agent2
 \end{array}
 \end{array}$$

Tableau 4.6 – Capacités de récupération considérées dans l'exemple 2.

	Agent 1	Agent 2	Agent 3
Capacité de récupération	0.5	0.7	0.4

Concernant les produits, nous considérons les mêmes caractéristiques que dans l'exemple précédent (c'est-à-dire mêmes poids, durées opératoires, gamme de fabrication, etc.). De même pour les horaires de travail et de pauses, nous considérons un travail journalier de 10 h entrecoupées par 2 h de pause.

Comme l'objectif est de comparer différents agencements de machines, nous suggérons de comparer les agencements A et B décrits, respectivement, par les figures (4.6) et (4.7). Les distances entre les machines du système (exprimées en mètre), pour chacun des agencement A et B sont données, respectivement, par les matrices D_A et D_B . Dans notre exemple, nous supposons qu'une machine est supposée à proximité d'une autre si et seulement si la distance euclidienne qui les sépare est inférieure ou égale à 200 m.



FIGURE 4.6 – Description de l'agencement A.

$$\begin{array}{c}
 D_A \\
 \begin{array}{ccccc}
 & M0 & M1 & M2 & M3 & M4 \\
 \begin{array}{c} M0 \\ M1 \\ M2 \\ M3 \\ M4 \end{array} & \left(\begin{array}{ccccc}
 0 & 200 & 400 & 800 & 1000 \\
 200 & 0 & 200 & 1000 & 1000 \\
 400 & 200 & 0 & 1000 & 800 \\
 800 & 1000 & 1000 & 0 & 200 \\
 1000 & 1000 & 800 & 200 & 0
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \end{array}$$

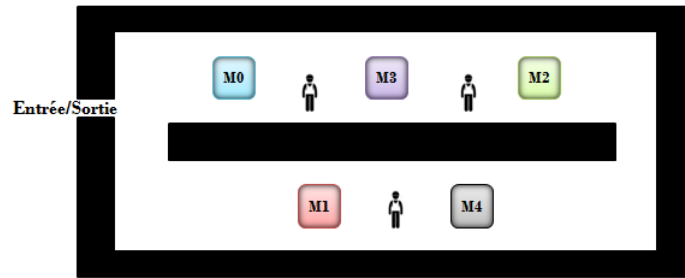


FIGURE 4.7 – Description de l'agencement B.

$$\begin{array}{c}
 D_B \\
 \begin{array}{ccccc}
 & M0 & M1 & M2 & M3 & M4 \\
 \begin{array}{c} M0 \\ M1 \\ M2 \\ M3 \\ M4 \end{array} & \left(\begin{array}{ccccc}
 0 & 800 & 400 & 200 & 1000 \\
 800 & 0 & 1000 & 1000 & 200 \\
 400 & 1000 & 0 & 200 & 800 \\
 200 & 1000 & 200 & 0 & 1000 \\
 1000 & 200 & 800 & 1000 & 0
 \end{array} \right)
 \end{array}
 \end{array}$$

3.4 Résultats et discussions

Les résultats de simulation, en termes de MFT, sont donnés dans le tableau (4.7). Nous pouvons remarquer qu'en termes de performance de l'atelier, l'agencement B est meilleur que l'agencement A. Ces résultats peuvent être expliqués par la présence de la machine M1, qui est une machine bruyante, à proximité des machines M0 et M2. En effet, les opérateurs 1 et 2, qui sont qualifiés pour travailler sur ces trois machines, sont souvent exposés à des niveaux de bruit importants ce qui peut conduire à l'accumulation rapide de leur fatigue et par conséquent à la détérioration des durées des tâches ce qui explique l'augmentation importante de la valeur du MFT.

En revanche, dans l'agencement B, la machine bruyante est éloignée ce qui permet aux opérateurs 1 et 2 de travailler parfois dans un milieu calme ce qui leur permet d'accumuler moins de fatigue. En outre, les distances que ces opérateurs parcourent pour se déplacer entre les machines M0 et M2 sont courtes ce qui peut favoriser leur récupération de la fatigue.

Ainsi, dans notre cas d'exemple, si les responsables de production cherchent à minimiser le MFT, il est pertinent de choisir l'agencement B. Toutefois, s'ils cherchent à améliorer le bien-être de leur opérateurs, ils doivent regarder les tendances d'évolution de fatigue, obtenus pour chacun des agencements A et B.

Les figures (4.8) et (4.9) représentent les courbes qui décrivent comment la fatigue des opérateurs évolue pendant cinq jours de travail, respectivement, dans l'agencement A et B. D'après ces résultats, nous pouvons remarquer que, particulièrement pour l'agencement A, l'opérateur 3 paraît généralement moins fatigué que les deux autres opérateurs. En effet, le niveau de fatigue de cet opérateur est souvent inférieur à 0.6 pendant la période simulée. Ces résultats sont logiques parce que l'opérateur 3 travaille dans un milieu calme et la distance qui sépare les machines M3 et M4

sur lesquelles il/elle est qualifié(e) est courte ce qui lui permet de récupérer de la fatigue en changeant de machine.

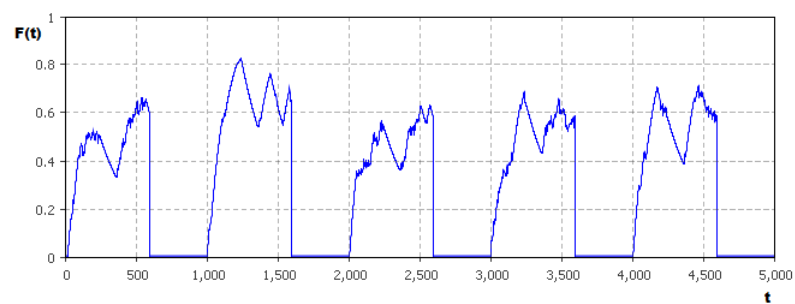
Tableau 4.7 – Résultats de MFT.

	Moyenne du MFT
Agencement A	2627,5
Agencement B	1574,3

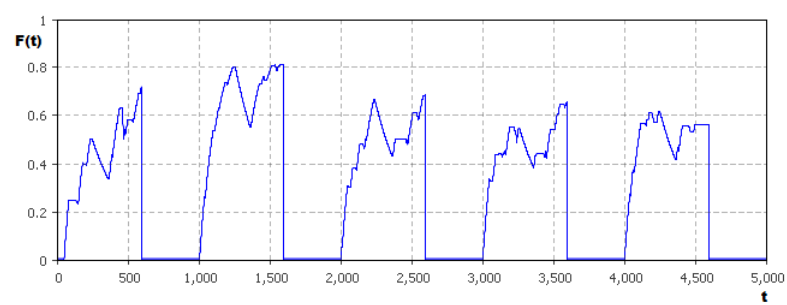
En revanche, nous pouvons remarquer que les niveaux de fatigue des opérateurs 1 et 2 ont même atteint la valeur 0.8 pendant le deuxième jour de travail. D'après la figure (4.8), il semble que le travail durant ce jour-là était le plus fatigant pour les deux premiers travailleurs. Cette résultat peut être dû à la fluctuation des demandes clients qui varie également d'un jour à un autre.

Par ailleurs, c'est la troisième journée de travail qui était la plus fatigante pour l'opérateur 3. En effet, le niveau de fatigue de cet opérateur a atteint une valeur environ 0.7 vers la fin de cette journée. Une explication possible pour ce résultat est que l'opérateur 3 a subi les conséquences de la quantité de travail réalisée par des opérateurs 1 et 2 pendant la deuxième journée de travail. En effet, nous avons remarqué que les opérateurs 1 et 2 ont été épuisés pendant cette dernière journée, il est donc raisonnable de supposer que la quantité de travail était importante et qu'ils ont produit beaucoup de pièces. Comme les pièces traitées de type $P1$ et $P2$ passent dans leur processus de fabrication, respectivement, par les machines $M0$ et $M2$, ensuite par les machines $M4$ et $M3$ et comme la stratégie d'affectation utilisée est SPT (qui favorise les tâche courtes (voir la figure 4.2), le nombre de pièces de type $P2$ à traiter le lendemain par l'opérateur 3 devrait être importante ce qui explique le niveau important de fatigue atteint pendant cette journée de travail.

Opérateur 1



Opérateur 2



Opérateur 3

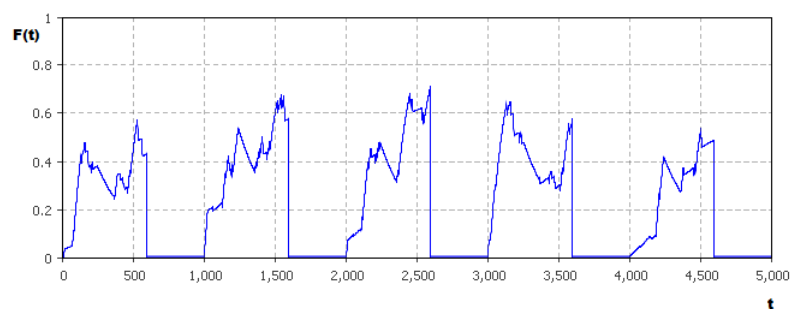


FIGURE 4.8 – Évolution de la fatigue des opérateurs dans l'agencement A.

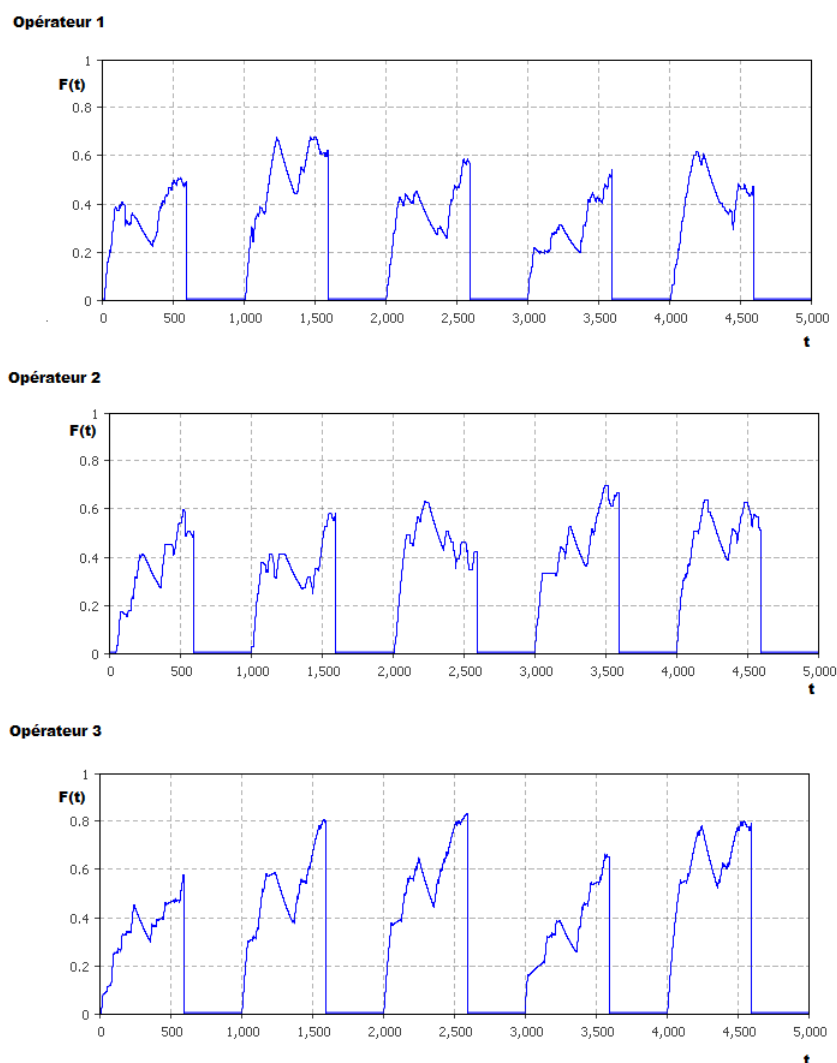


FIGURE 4.9 – Évolution de la fatigue des différents opérateurs dans l'agencement B.

Comme la machine M1 est bruyante et elle est placée à proximité des machines M0 et M2 sur lesquelles les opérateurs 1 et 2 sont qualifiés, nous pouvons constater que ces derniers travaillent dans un environnement bruyant (où le bruit ambiant est de 100 dB). Il est donc normal que ceci entraîne une accumulation plus rapide de la fatigue durant le travail. Par ailleurs, l'opérateur 3 opère tout seul deux machines (M3 et M4) et, bien qu'il/elle paraît souvent le moins fatigué, il travaille sur la

machine M3 sur laquelle se traite la plus longue tâche dans le système. La fatigue excessive de cet opérateur peut conduire à l'accumulation des pièces dans la file d'attente de la machine M3 qui peut devenir un goulot d'étranglement.

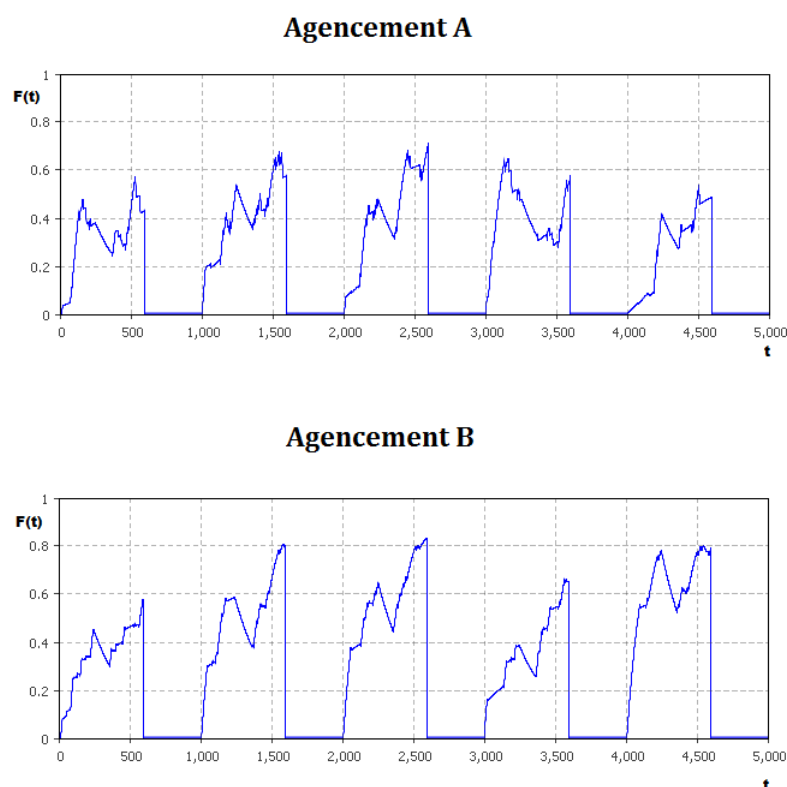


FIGURE 4.10 – Comparaison de la fatigue de l'opérateur 3 dans les 2 scénarios.

Dans la figure (4.10), nous remarquons que l'opérateur 3 est beaucoup plus fatigué dans l'agencement B par rapport à son état dans le premier scénario. En effet, dans trois journées sur cinq simulée, le niveau de fatigue de ce dernier a atteint la valeur 0.8. Cette augmentation du niveau de fatigue est en effet dû à la distance entre les machines M3 et M4 qui est devenue importante dans le deuxième scénario et qui conduit par conséquent à l'accumulation de la fatigue. En outre, comme la machine bruyante (M1) est maintenant placée à proximité de la machine M4, les

tâches réalisées sur cette dernière machine deviennent plus pénibles ce qui peut aussi entraîner une augmentation du niveau de fatigue de l'opérateur 3.

Concernant les deux autres opérateurs, il est clair que le deuxième scénario leur induit moins de fatigue. D'après la figure (4.9), leurs niveaux de fatigue ont rarement atteint la valeur 0.6 pendant la période simulée. Si nous comparons la tendance d'évolution de fatigue pendant les deux agencements, nous pouvons noter que, particulièrement dans le premier scénario, la courbe relative à l'opérateur 1 a beaucoup oscillé. Ceci signifie que la fréquence des récupérations était importante. En revanche, il semble que les récupérations n'étaient pas assez importantes, en termes d'intensité. Ceci peut être expliqué par les distances de déplacement que l'opérateur 1 a parcouru pour se déplacer entre les machines sur lesquelles il/elle est qualifié. Comme ces distances peuvent être courtes et/ou raisonnables dans ce scénario (inférieur à 400 m), il est donc raisonnable de constater que les récupérations indiquées ont été reportées pendant que le travailleur marche.

Pour résumer, il est clair que dans notre exemple l'agencement B est plus pertinent que l'agencement A. D'abord, il est plus efficace en termes de minimisation de MFT. Ensuite, nous remarquons que l'agencement B permet de faire un peu d'équilibre de fatigue entre les opérateurs ce qui peut être pertinent pour leur bien-être au travail.

4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu concrétiser notre travail par deux cas d'étude qui témoignent de l'applicabilité de notre approche à résoudre différents types de problèmes industriels. Les résultats de simulation obtenus dans les deux exemples ont permis d'illustrer l'efficacité et par conséquent l'intérêt de notre approche dans divers contextes de production. En effet, les résultats expérimentaux montrent qu'il

est possible d'obtenir des connaissances pertinentes sur l'état et les performances de l'atelier étudiée ainsi que sur l'état de fatigue de ses opérateurs durant le travail.

Contrairement à ce qui existe dans la littérature où Salum et Araz (2009) ont montré que la règle d'affectation SPT est la plus performante en terme de minimisation de MFT, nous avons pu montrer à travers le premier cas d'étude et dans le cadre de l'exemple traité que la règle LNQ est la plus performante lorsque la fatigue des opérateurs est prise en compte dans l'affectation dynamique.

Particulièrement dans le deuxième cas d'étude, nous avons pu montré que l'agencement B peut être meilleur que l'agencement A. D'une part, il peut contribuer à réduire le MFT dans le système. D'autre part et en termes de tendances d'évolution de fatigue des opérateurs durant le travail, il semble que l'agencement B peut également être moins fatiguant que l'agencement A pour la plupart des opérateurs (opérateurs 1 et 2).

Conclusion générale et perspectives

Les cas de burn-out, de fatigue chronique et du taux d'absentéisme sont très courants dans les industries. D'après une étude du cabinet Mozart Consulting publiée en 2017, les arrêts maladie coûtent chaque année à l'économie des milliards d'euros. Ce n'est pas donc étonnant que de nombreuses entreprises aient décidé de se retroucher les manches et de mener des actions de prévention pour limiter ce manque à gagner, améliorer la productivité et le bien-être de leurs salariés.

A travers l'état de l'art du Chapitre 1, nous avons pu constater que la fatigue est un phénomène très complexe et sujet à plusieurs interprétations. Nous avons pu également constater qu'il dépend fortement de la pénibilité au travail. En effet, la notion de la pénibilité dans les systèmes industriels est aussi très complexe. C'est parce qu'elle est multidimensionnelle, imprécise et difficile à mesurer.

Nous avons également pu constater que la fatigue a une incidence forte sur le bien-être des opérateurs. Les performances humaines sont particulièrement touchées par la fatigue ce qui peut, par conséquent, conduire à une dégradation des performances industrielles.

Si les managers cherchent à améliorer les performances de leurs systèmes et le bien-être de leurs salariés, il est donc nécessaire qu'ils améliorent l'organisation de l'atelier et/ou du travail. Nous avons vu dans le deuxième chapitre que les paradigmes de simulation, notamment la simulation à événement discret, sont largement utilisés dans la littérature pour étudier les performances des ateliers de production.

Particulièrement dans les cas où les systèmes sont caractérisés par un comportement fluctuant, la simulation joue un rôle crucial car elle est capable de représenter de façon assez réaliste le comportement dynamique et complexe de divers types de systèmes.

Or, il s'avère que ce potentiel de la simulation reste pour l'instant limité parce que nous sommes pas capables avec les approches de simulation existantes et avec les logiciels disponibles de construire des modèles de simulation des systèmes de production qui prennent en compte la fatigue des opérateurs. C'est parce que l'accent est souvent mis sur des dimensions techniques dans les modèles de simulation utilisés pour étudier les systèmes manufacturiers. Toutefois, les dimensions humaines, précisément la fatigue des opérateurs, sont malheureusement très insuffisamment prises en considération.

La pénibilité au travail a été souvent réduite uniquement à la tâche réalisée, c'est-à-dire à sa durée et à l'effort musculaire à exercer. Toutefois, les autres facteurs de pénibilité, que nous avons identifié dans le chapitre 1, ne sont pas pris en considération. D'ailleurs, il n'y a pas une méthode qui permet d'exprimer la pénibilité au travail. En outre, nous n'avons pas toujours de données exactes et précises sur comment l'exprimer en fonction de ses différents facteurs.

L'état de l'art du Chapitre 2 témoigne du besoin d'une approche générique qui permet la simulation des ateliers de production tout en prenant en compte la fatigue des opérateurs. De même, cet état de l'art nous a incité à aborder le problème de modélisation et de simulation des systèmes manufacturiers tout en intégrant les opérateurs et leur fatigue. En effet, nous avons proposé en premier lieu un cadre conceptuel qui combine les paradigmes de modélisation de simulation à événement discret, de simulation continue, d'intelligence artificielle et de la logique floue. Détaillée au niveau du Chapitre 3, son objectif était d'arriver à concevoir des modèles de simulation qui intègrent les opérateurs, leur fatigue et la pénibilité au travail.

Ensuite, nous avons proposé une implémentation logicielle avec le simulateur ANY-LOGIC pour mettre en oeuvre le cadre conceptuel proposé.

Afin d'évaluer le véritable potentiel d'une telle approche ou, autrement dit dans quelle mesure elle représente une aide pour certains problèmes de production, le Chapitre 4 s'est consacré à la concrétiser par des exemples. Ces derniers représentaient des contextes différents, ce qui montre que l'approche proposée a vocation à être appliquée à un large spectre de problèmes et de systèmes de production. Ceci est principalement grâce à l'utilisation des paradigmes de simulation. Les exemples de modèles de simulation implémentés peuvent apparaître simples parce que nous avons fait beaucoup d'abstractions, néanmoins, ils restent plus proches de la réalité que les modèles de simulation qui ne prennent pas en compte la fatigue.

Par ailleurs et dans tous les cas étudiés, nous avons pu fournir une aide effective à la prise de décisions. Nous avons vu que l'application de l'approche proposée dans l'étude des systèmes de production a également vocation à fournir des connaissances pertinentes non seulement sur les performances des systèmes (par exemple le MFT et la machine goulot) mais aussi sur l'état de fatigue des opérateurs durant le travail. Nous avons également pu montrer la réutilisabilité de notre approche logicielle à travers les exemples traités dans le quatrième chapitre.

Pour arriver à quantifier la fatigue des opérateurs, nous avons exploité les résultats des recherches scientifiques en ergonomie et nous avons utilisé l'indicateur de Konz (2000) parce qu'il est le plus utilisé dans la littérature. Toutefois, nous avons pu constater, à travers l'analyse bibliographique réalisée dans le chapitre 2 sur les modèles de quantification de la fatigue, qu'il n'y a pas un modèle générique. Ceci reste ainsi une question de recherche très importante qui doit être abordée par les ergonomes.

Néanmoins, il est important de noter que grâce à la façon dont nous avons modélisé les opérateurs, il est possible d'introduire des nouveaux modèles de quantification de la fatigue sans changer les principes clé de notre approche de modélisation. Il suffit tout simplement d'adapter les équations différentielles et les règles floues dans la base de connaissances de l'agent avec le nouveau modèle utilisé pour la quantification de la fatigue des opérateurs.

Les travaux détaillés dans cette thèse ouvrent de nombreuses perspectives et permettent de souligner plusieurs directives de recherche. Rappelons que nous avons adressé les problèmes d'affectation dynamiques des opérateurs et le problème d'agencement de machines. Une première perspective à très court terme concerne donc l'applicabilité de notre approche pour aborder d'autres problèmes de production, tels que la répartition de pauses, la planification des horaires de travail et l'ordonnement de tâches tout en prenant en considération la fatigue des opérateurs. Évaluer l'impact des changements du cycle circadien des opérateurs sur l'évolution de leur fatigue et sur les performances de leur système pourrait représenter une perspective de recherche très intéressante.

Une autre perspective consiste à mieux prendre en compte les différents objectifs au sein des systèmes industriels en traitant les problèmes abordés dans le chapitre 4 dans une optique multi-objectif. Ceci permettrait notamment d'utiliser les modèles de simulation construits pour évaluer les performances du système dans une approche d'optimisation multi-objectif basée sur la simulation.

Outre que la détérioration des durées opératoires des tâches, il est important de prendre en considération l'incidence de la fatigue des opérateurs sur la qualité des pièces fabriquées. Ainsi, l'intégration dans notre approche de l'impact de la fatigue sur la dégradation de la qualité des pièces fabriquées pourrait représenter une perspective de recherche intéressante.

Une autre perspective mais à moyen terme consiste à construire un système multi-agent. En effet et pour des raisons de simplifications dans les exemples étudiés dans le chapitre précédent, les travailleurs ont été considérés comme indépendants les uns des autres. Il n'y avait aucune sorte de communication entre eux. Par exemple, il n'y a pas un partage de tâches ni une collaboration ou une compétition entre les agents du système. Cependant, la communication décrit l'aspect social des opérateurs qui nécessite d'être modélisées afin de bien étudier leur comportement dans les systèmes de production. Dans ce contexte-là, la modélisation d'agent intelligent proposée dans ce travail peut être étendue pour une architecture multi-agent.

Une autre perspective cette fois-ci à long terme consiste à prendre en considération différents types de fatigue, telle que la fatigue mentale.

Enfin, une autre perspective intéressante se présente sur le long terme. Bien que nous avons déjà illustré l'efficacité et le potentiel de notre approche sur des exemples, la complexité de ces derniers reste limitée. Ainsi, l'étude de cas plus complexes et d'un cas réel pourrait valider la pertinence de notre approche à grande échelle ou indiquer plus clairement des difficultés restant à traiter.

Bibliographie

- Adam, E., 2000. *Modèle d'organisation multi-agent pour l'aide au travail coopératif dans les processus d'entreprise : application aux systèmes administratifs complexes*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis. 87
- Al-Zuheri, A., L. Luong et K. Xing, 2016. Developing a multi-objective genetic optimisation approach for an operational design of a manual mixed-model assembly line with walking workers. *Journal of intelligent manufacturing*, 27(5) :1049–1065. 37, 38
- Ammar, A., H. Pierreval et S. Elkosantini, 2014. Une approche d'affectation dynamique des opérateurs dans un contexte de demande stochastique et changeante, basée sur topsis et l'optimisation via simulation. Dans *MOSIM 2014, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation*. 112, 114
- Ammar, A., H. Pierreval et S. Elkosentini, 2013. Workers assignment problems in manufacturing systems : A literature analysis. Dans *Industrial Engineering and Systems Management (IESM), Proceedings of 2013 International Conference on*, pages 1–7. IEEE. 111, 112
- Badler, N. I., C. B. Phillips et B. L. Webber, 1993. *Simulating humans : computer graphics animation and control*. Oxford University Press. 63

- Baines, T. et J. Kay, 2002. Human performance modelling as an aid in the process of manufacturing system design : a pilot study. *International journal of production research*, 40(10) :2321–2334.
- Baines, T., S. Mason, P.-O. Siebers et J. Ladbroke, 2004. Humans : the missing link in manufacturing simulation ? *Simulation Modelling Practice and Theory*, 12(7-8) :515–526. 76, 77
- Barker, L. M. et M. A. Nussbaum, 2011. Fatigue, performance and the work environment : a survey of registered nurses. *Journal of advanced nursing*, 67(6) :1370–1382. 23
- Barthe, B., Y. Quéinnec et F. Verdier, 2004. L’analyse de l’activité de travail en postes de nuit : Bilan de 25 ans de recherches et perspectives. *Le travail humain*, 67(1) :41–61. 30
- Bénabès, J., E. Poirson, F. Bennis et Y. Ravaut, 2011. Démarche intégrée pour l’optimisation d’agencement d’espace : application à l’aménagement d’un shelter. Dans *12ème Colloque National AIP PRIMECA*. 128
- Berrah, L., G. Mauris et F. Vernadat, 2004. Information aggregation in industrial performance measurement : rationales, issues and definitions. *International Journal of Production Research*, 42(20) :4271–4293. 80, 84
- Boenzi, F., S. Digiesi, G. Mossa, G. Mummolo et V. Romano, 2013. Optimal break and job rotation schedules of high repetitive–low load manual tasks in assembly lines : an ocra–based approach. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(9) :1896–1901. 40
- Bonabeau, E., 2002. Agent-based modeling : Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(suppl 3) :7280–7287. 82

- Borg, G., 1998. *Borg's perceived exertion and pain scales*. Human kinetics. 52
- Borshchev, A., 2013. *The big book of simulation modeling : multimethod modeling with AnyLogic 6*. AnyLogic North America Chicago. 105, 107
- Boujelben, M. A., Y. De Smet, A. Frikha et H. Chabchoub, 2011. A ranking model in uncertain, imprecise and multi-experts contexts : The application of evidence theory. *International journal of approximate reasoning*, 52(8) :1171–1194. 80
- Bubb, H., F. Engstler, F. Fritzsche, C. Mergl, O. Sabbah, P. Schaefer et I. Zacher, 2006. The development of ramsis in past and future as an example for the cooperation between industry and university. *International Journal of Human Factors Modelling and Simulation*, 1(1) :140–157. 63
- Bugand, L., F. Caser, G. Huyez, M. Parlier et N. Raoult, 2009. Les bonnes pratiques des entreprises en matière de maintien et de retour en activité professionnelle des seniors. *Rapport d'étude ANACT*. 25
- Castagna, P., N. Mebarki et R. Gauduel, 2001. Apport de la simulation comme outil d'aide au pilotage des systemes de production-exemples d'application. Dans *Proceedings of the 3e Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation «Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels» MOSIM'01*. 75
- Chaffin, D. B., 1969. A computerized biomechanical model-development of and use in studying gross body actions. *Journal of biomechanics*, 2(4) :429–441. 63
- Cheikh, S. B., S. Hajri-Gabouj et S. Darmoul, 2016. Manufacturing configuration selection under arduous working conditions : A multi-criteria decision approach. Dans *Proceedings of the 2016 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. 25, 32, 33, 34, 35

- Corlett, E., S. MADELEY et I. Manenica, 1979. Posture targeting : a technique for recording working postures. *Ergonomics*, 22(3) :357–366. 50
- Corlett, E. N. et R. Bishop, 1976. A technique for assessing postural discomfort. *Ergonomics*, 19(2) :175–182. 52
- Coutrot, T. et N. Sandret, 2015. Pilotage du travail et risques psychosociaux. *Dares Analyses*, 3 :1–10. 26
- Cuny-Guerrier, A., S. Caroly, F. Coutarel et A. Aublet-Cuvelier, 2015. Quelle prévention des tms dans l’activité de l’encadrement de proximité en sous-traitance interne ? un cas dans le secteur de la découpe de viande. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé*, (17-2). 45
- Dababneh, A. J., N. Swanson et R. L. Shell, 2001. Impact of added rest breaks on the productivity and well being of workers. *Ergonomics*, 44(2) :164–174. 39
- Damsgaard, M., J. Rasmussen, S. T. Christensen, E. Surma et M. De Zee, 2006. Analysis of musculoskeletal systems in the anybody modeling system. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 14(8) :1100–1111. 63
- Dawson, D., Y. I. Noy, M. Härmä, T. Åkerstedt et G. Belenky, 2011. Modelling fatigue and the use of fatigue models in work settings. *Accident Analysis & Prevention*, 43(2) :549–564. 46
- Dembe, A. E., J. B. Erickson, R. G. Delbos et S. M. Banks, 2005. The impact of overtime and long work hours on occupational injuries and illnesses : new evidence from the united states. *Occupational and environmental medicine*, 62(9) :588–597. 46

- Digiesi, S., A. A. Kock, G. Mummolo et J. E. Rooda, 2009. The effect of dynamic worker behavior on flow line performance. *International Journal of Production Economics*, 120(2) :368–377. 24, 41, 42, 65, 103, 124
- Digiesi, S., G. Mossa, G. Mummolo et P. Bari, 2006. Performance measurement and " personnel-oriented " simulation of an assembly line. Dans *the International Workshop on Applied Modelling and Simulation-AMS*. 41, 43, 65
- Ding, J., A. S. Wexler et S. A. Binder-Macleod, 2000a. Development of a mathematical model that predicts optimal muscle activation patterns by using brief trains. *Journal of applied Physiology*, 88(3) :917–925. 56
- Ding, J., A. S. Wexler et S. A. Binder-Macleod, 2000b. A predictive model of fatigue in human skeletal muscles. *Journal of Applied Physiology*, 89(4) :1322–1332. 56, 63
- Dode, P., M. Greig, S. Zolfaghari et W. P. Neumann, 2016. Integrating human factors into discrete event simulation : a proactive approach to simultaneously design for system performance and employees' well being. *International Journal of Production Research*, 54(10) :3105–3117. 13, 24, 44, 56, 62, 66, 67
- Doukidis, G. I. et M. C. Angelides, 1994. A framework for integrating artificial intelligence and simulation. *Artificial Intelligence Review*, 8(1) :55–85. 76
- Drira, A., H. Pierreval et S. Hajri-Gabouj, 2007. Facility layout problems : A survey. *Annual reviews in control*, 31(2) :255–267. 128, 130
- Dubois, V. et A. Cornet, 2012. La perception de la pénibilité au travail dans les métiers du social. 25, 26
- Eklund, J. A., 1995. Relationships between ergonomics and quality in assembly work. *Applied Ergonomics*, 26(1) :15–20. 44

- El Mouayni, I., A. Etienne, A. Siadat, J. Dantan et A. Lux, 2016. A simulation based approach for enhancing health aspects in production systems by integrating work margins. *IFAC-PapersOnLine*, 49(12) :1697–1702. 14, 60, 68, 69
- Elkosantini, S., 2007. *Contribution à la modélisation de la dynamique du comportement d'opérateurs humains*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II. 83, 84, 96, 99, 100
- Elkosantini, S., 2015. Toward a new generic behavior model for human centered system simulation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 52 :108–122. 70
- Elkosantini, S. et D. Gien, 2009. Integration of human behavioural aspects in a dynamic model for a manufacturing system. *International Journal of Production Research*, 47(10) :2601–2623. 23, 45, 70, 77, 88, 98
- Elmaraghy, W., O. Nada et H. A. ElMaraghy, 2008. Quality prediction for reconfigurable manufacturing systems via human error modelling. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21(5) :584–598. 45
- Elsawah, S., J. H. Guillaume, T. Filatova, J. Rook et A. J. Jakeman, 2015. A methodology for eliciting, representing, and analysing stakeholder knowledge for decision making on complex socio-ecological systems : From cognitive maps to agent-based models. *Journal of environmental management*, 151 :500–516. 82
- Ferjani, A., A. Ammar, H. Pierreval et S. Elkosantini, 2017. A simulation-optimization based heuristic for the online assignment of multi-skilled workers subjected to fatigue in manufacturing systems. *Computers & Industrial Engineering*, 112 :663–674. 43, 54, 65, 80, 112, 113, 124
- Ferjani, A., A. Ammar, H. Pierreval et A. Trabelsi, 2015. A heuristic approach taking operators' fatigue into account for the dynamic assignment of workforce

- to reduce the mean flowtime. Dans *International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE45*. 43, 65, 80, 113
- Fishman, G. S., 1978. Principles of discrete event simulation.[book review]. 75
- Forrester, J. W., 1995. The beginning of system dynamics. *McKinsey Quarterly*, pages 4–17.
- Franklin, S. et A. Graesser, 1996. Is it an agent, or just a program? : A taxonomy for autonomous agents. Dans *International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages*, pages 21–35. Springer. 82
- Giat, Y., J. Mizrahi et M. Levy, 1993. A musculotendon model of the fatigue profiles of paralyzed quadriceps muscle under fes. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 40(7) :664–674. 57
- Gien, D. et S. Jacquemart, 2005. Design and simulation of manufacturing systems facing imperfectly defined information. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13(6) :465–485. 83
- Givi, Z., M. Jaber et W. Neumann, 2015. Modelling worker reliability with learning and fatigue. *Applied Mathematical Modelling*, 39(17) :5186–5199. 44, 101
- Goldman, S. L., R. N. Nagel et K. Preiss, 1995. *Agile competitors and virtual organizations : strategies for enriching the customer*, tome 8. Van Nostrand Reinhold New York. 16
- Gorecky, D., M. Schmitt, M. Loskyll et D. Zühlke, 2014. Human-machine-interaction in the industry 4.0 era. Dans *Industrial Informatics (INDIN), 2014 12th IEEE International Conference on*, pages 289–294. Ieee. 17
- Grosse, E. H., C. H. Glock, M. Y. Jaber et W. P. Neumann, 2015. Incorporating human factors in order picking planning models : framework and research oppor-

- tunities. *International Journal of Production Research*, 53(3) :695–717. 41, 58, 59, 60
- Group, V. R. *et al.*, 2004. Technical report for project virtual soldier research. *Center for Computer-Aided Design, the University of IOWA*. 63
- Gruat-La-Forme, F. A., V. Botta-Genoulaz et J.-P. Campagne, 2007. Problème d’ordonnancement avec prise en compte des compétences : résolution mono critère pour indicateurs de performance industriels et humains. *Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA)*, 41(5) :pp–617. 37
- Haesen, B., 2009. Betterlift-introducing a semi-automatic exhaust manipulator to reduce a high absenteeism rate. *Int Assessment, elimination and substantial reduction of occupational risks-European Agency for Safety and Health at Work (Eu-OSHA) pp*, pages 36–43. 63
- Hosseini-Nasab, H., S. Fereidouni, S. M. T. F. Ghomi et M. B. Fakhrazad, 2018. Classification of facility layout problems : a review study. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94(1-4) :957–977. 128
- Imbeau, D., B. Farbos *et al.*, 2006. Percentile values for determining maximum endurance times for static muscular work. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(2) :99–108. 13, 31, 38, 39, 53, 54
- Imbeau, D. *et al.*, 2009. Comparison of rest allowance models for static muscular work. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(1) :73–80. 13, 31, 55, 56
- Jaber, M., Z. Givi et W. Neumann, 2013. Incorporating human fatigue and recovery into the learning–forgetting process. *Applied Mathematical Modelling*, 37(12-13) :7287–7299. 24, 46, 53, 54, 59, 60, 80, 96

- Jaber, M. Y. et W. P. Neumann, 2010. Modelling worker fatigue and recovery in dual-resource constrained systems. *Computers & Industrial Engineering*, 59(1) :75–84. 39, 41, 56
- Jacob, G. et M. Natanson, 2010. La fatigue au travail, la fatigue du travail. *Imaginaire & Inconscient*, (1) :167–186. 22
- Jacquenot, G., 2010. *Méthode générique pour l’optimisation d’agencement géométrique et fonctionnel*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes (ECN). 128
- Jahangirian, M., T. Eldabi, A. Naseer, L. K. Stergioulas et T. Young, 2010. Simulation in manufacturing and business : A review. *European Journal of Operational Research*, 203(1) :1–13. 75
- Jones, G., M. Hocine, J. Salomon, W. Dab et L. Temime, 2015. Demographic and occupational predictors of stress and fatigue in french intensive-care registered nurses and nurses’ aides : A cross-sectional study. *International journal of nursing studies*, 52(1) :250–259. 23
- Jones, J., C. Huxtable et J. Hodgson, 2005. Self-reported work-related illness in 2003/2004 : Results from the labour force survey. *London : Health & Safety Executive*.
- Kaneko, K. et K. Sakamoto, 2001. Spontaneous blinks as a criterion of visual fatigue during prolonged work on visual display terminals. *Perceptual and Motor Skills*, 92(1) :234–250. 57
- Kleijnen, J. P., 2015. Design and analysis of simulation experiments. Dans *International Workshop on Simulation*, pages 3–22. Springer. 61

- Komura, T., Y. Shinagawa et T. L. Kunii, 1999. Calculation and visualization of the dynamic ability of the human body. *The journal of visualization and computer animation*, 10(2) :57–78. 57
- Komura, T., Y. Shinagawa et T. L. Kunii, 2000. Creating and retargetting motion by the musculoskeletal human body model. *The visual computer*, 16(5) :254–270. 57
- Konz, S., 2000. Work/rest : Part ii- the scientific basis (knowledge base) for the guide 1. *Ergonomics Guidelines and Problem Solving*, 1 :401. 38, 57, 58, 60, 68, 72, 80, 96, 101, 143
- Kostreva, M., E. McNelis et E. Clemens, 2002. Using a circadian rhythms model to evaluate shift schedules. *Ergonomics*, 45(11) :739–763. 36
- Law, A. M., 2015. *Simulation Modeling and Analysis 5e*. McGraw-Hill Boston. 61, 83
- Law, A. M., W. D. Kelton et W. D. Kelton, 1991. *Simulation modeling and analysis*, tome 2. McGraw-Hill New York. 61, 75
- Li, G. et P. Buckle, 1999. Current techniques for assessing physical exposure to work-related musculoskeletal risks, with emphasis on posture-based methods. *Ergonomics*, 42(5) :674–695. 28, 49, 51
- Lim, L. L., G. Alpan et B. Penz, 2017. A simulation-optimization approach for sales and operations planning in build-to-order industries with distant sourcing : Focus on the automotive industry. *Computers & Industrial Engineering*, 112 :469–482. 62

- Lodree Jr, E. J., C. D. Geiger et X. Jiang, 2009. Taxonomy for integrating scheduling theory and human factors : Review and research opportunities. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(1) :39–51. 23, 41, 43
- Ma, L., D. Chablat, F. Bennis et W. Zhang, 2009. A new simple dynamic muscle fatigue model and its validation. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(1) :211–220. 45, 49, 51, 52, 55, 59, 60, 64
- Ma, L., D. Chablat, F. Bennis, W. Zhang, B. Hu et F. Guillaume, 2011a. Fatigue evaluation in maintenance and assembly operations by digital human simulation in virtual environment. *Virtual Reality*, 15(1) :55–68. 13, 63, 64
- Ma, L., D. Chablat, F. Bennis, W. Zhang, B. Hu et F. Guillaume, 2011b. A novel approach for determining fatigue resistances of different muscle groups in static cases. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41(1) :10–18. 54, 55
- Macal, C. et M. North, 2014. Introductory tutorial : Agent-based modeling and simulation. Dans *Proceedings of the 2014 winter simulation conference*, pages 6–20. IEEE Press. 82, 87, 88
- Macal, C. M., 2016. Everything you need to know about agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, 10(2) :144–156. 82
- Macal, C. M. et M. J. North, 2010. Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of simulation*, 4(3) :151–162. 82
- Marcora, S. M., W. Staiano et V. Manning, 2009. Mental fatigue impairs physical performance in humans. *Journal of applied physiology*, 106(3) :857–864. 24
- Michalos, G., S. Makris et D. Mourtzis, 2011. A web based tool for dynamic job rotation scheduling using multiple criteria. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 60(1) :453–456. 37

- Michalos, G., S. Makris, L. Rentzos et G. Chryssolouris, 2010. Dynamic job rotation for workload balancing in human based assembly systems. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(3) :153–160. 37
- Mitschke, F., 2016. Decibel units. Dans *Fiber Optics*, pages 313–316. Springer. 102
- Mixter, S., S. E. Mathiassen et D. Hallman, 2018. Alternations between physical and cognitivetasks in repetitive work—effect of cognitive task difficulty on fatigue development. *Ergonomics*. 40
- Mummolo, G., G. Mossa et S. Digiesi, 2004. Learning and tiredness phenomena in manual operation performed in lean automated manufacturing systems : a reference model. Dans *International IMS Intelligent Manufacturing Systems Forum*, pages 341–346. 41, 42, 43, 65
- Nedjah, N. et L. de Macedo Mourelle, 2005. *Fuzzy systems engineering : theory and practice*, tome 181. Springer Science & Business Media. 99
- Ouzrout, Y., M. M. Savino, A. Bouras et C. Di Domenico, 2009. Supply chain management analysis : a simulation approach to the value chain operations reference (vcor) model. *International Journal of Value Chain Management*, 3(3) :263–287. 62
- Padgham, L. et P. Lambrix, 2000. Agent capabilities : Extending bdi theory. Dans *AAAI/IAAI*, pages 68–73. 88, 90
- Perez, J., M. De Looze, T. Bosch et W. Neumann, 2014. Discrete event simulation as an ergonomic tool to predict workload exposures during systems design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(2) :298–306. 13, 14, 17, 41, 51, 53, 56, 67, 68, 69, 79

- Phillips, R. O., 2015. A review of definitions of fatigue—and a step towards a whole definition. *Transportation research part F : traffic psychology and behaviour*, 29 :48–56. 24
- Pierreval, H., 2006. Simulation combinée discret/continu : étude du cas d’une fonderie. Dans *6 ème Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation—MOSIM’06*. 61, 76, 81
- Potter, G. D., D. J. Skene, J. Arendt, J. E. Cade, P. J. Grant et L. J. Hardie, 2016. Circadian rhythm and sleep disruption : causes, metabolic consequences, and countermeasures. *Endocrine reviews*, 37(6) :584–608. 36
- Priel, V. Z., 1974. A numerical definition of posture. *Human Factors*, 16(6) :576–584. 49
- Raina, S. M. et C. R. Dickerson, 2009. The influence of job rotation and task order on muscle fatigue : A deltoid example. *Work*, 34(2) :205–213. 28, 40
- Rose, L., M. Ericsson, B. Glimskar, B. Nordgren et R. Ortengren, 1992. Ergo-index. development of a model to determine pause needs after fatigue and pain reactions during work. *Computer applications in ergonomics, occupational safety and health*, pages 461–468. 55
- Salum, L. et Ö. U. Araz, 2009. Using the when/where rules in dual resource constrained systems for a hybrid push-pull control. *International Journal of Production Research*, 47(6) :1661–1677. 113, 114, 123, 140
- Schaub, K., K. Landau, R. Menges et K. Grossmann, 1997. A computer-aided tool for ergonomic workplace design and preventive health care. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 7(4) :269–304. 63

- Sirovetnukul, R. et P. Chutima, 2010. The impact of walking time on u-shaped assembly line worker allocation problems. *Engineering Journal*, 14(2) :53–78. 37
- South, T., 2013. *Managing noise and vibration at work*. Routledge. 101, 102
- Sowa, J. F. et al., 2000. *Knowledge representation : logical, philosophical, and computational foundations*, tome 13. Brooks/Cole Pacific Grove, CA. 88
- Stanton, N. A., 2004. Human factors and ergonomics methods. Dans *Handbook of human factors and ergonomics methods*, pages 27–38. CRC press. 52
- Thiéry, L. et P. Canetto, 2009. Evaluer et mesurer l'exposition professionnelle au bruit. *brochure ED*, 6035. 102
- Van Broekhoven, E. et B. De Baets, 2006. Fast and accurate center of gravity defuzzification of fuzzy system outputs defined on trapezoidal fuzzy partitions. *Fuzzy sets and systems*, 157(7) :904–918.
- Van Cauter, E., K. Spiegel, E. Tasali et R. Leproult, 2008. Metabolic consequences of sleep and sleep loss. *Sleep medicine*, 9 :S23–S28. 45
- Van Harmelen, F., V. Lifschitz et B. Porter, 2008. *Handbook of knowledge representation*, tome 1. Elsevier. 88
- Wald, L., 1998. A european proposal for terms of reference in data fusion. Dans *Commission VII Symposium " Resource and Environmental Monitoring"*, tome 32, pages 651–654. 83
- Walters, B., J. French et M. J. Barnes, 2000. Modeling the effects of crew size and crew fatigue on the control of tactical unmanned aerial vehicles (tuavs). Dans *Simulation Conference, 2000. Proceedings. Winter*, tome 1, pages 920–924. IEEE.

- Wang, Q., S. Lassalle, A. R. Mileham et G. W. Owen, 2009. Analysis of a linear walking worker line using a combination of computer simulation and mathematical modeling approaches. *Journal of manufacturing systems*, 28(2-3) :64–70. 37
- Wexler, A. S., J. Ding et S. A. Binder-Macleod, 1997. A mathematical model that predicts skeletal muscle force. *IEEE transactions on biomedical engineering*, 44(5) :337–348. 56, 63
- Williamson, A., D. A. Lombardi, S. Folkard, J. Stutts, T. K. Courtney et J. L. Connor, 2011. The link between fatigue and safety. *Accident Analysis & Prevention*, 43(2) :498–515. 46
- Williamson, A. M., A.-M. Feyer et R. Friswell, 1996. The impact of work practices on fatigue in long distance truck drivers. *Accident Analysis & Prevention*, 28(6) :709–719.
- Wright, T. P., 1936. Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of the aeronautical sciences*, 3(4) :122–128. 41, 42
- Xu, J., X. Xu et S. Xie, 2011. Recent developments in dual resource constrained (drc) system research. *European Journal of Operational Research*, 215(2) :309–318. 112
- Yeow, J. A., P. K. Ng, K. S. Tan, T. S. Chin et W. Y. Lim, 2014. Effects of stress, repetition, fatigue and work environment on human error in manufacturing industries. *Journal of Applied Sciences*, 14 :3464–3471. 24
- Zadeh, L. A., 1975. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning ?i. *Information sciences*, 8(3) :199–249. 83
- Zadeh, L. A., 1976. A fuzzy-algorithmic approach to the definition of complex or imprecise concepts. Dans *Systems Theory in the Social Sciences*, pages 202–282. Springer. 83

Zadeh, L. A., 1988. Fuzzy logic. *Computer*, 21(4) :83–93. 70

Zelano, N., 2014. *Pénibilité au travail : élaboration d'un guide diagnostique méthodologique*. Thèse de doctorat. 13, 22, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 33, 34

Zhu, T., J. Balakrishnan et C. H. Cheng, 2017. Recent advances in dynamic facility layout research. *INFOR : Information Systems and Operational Research*, pages 1–29. 128