



HAL
open science

Développement d'une méthode outillée pour l'amélioration des aspects santé-sécurité dès les premières phases de la conception des systèmes de production par la prise en compte des marges de manœuvre temporelles

Ismail El Mouayni

► To cite this version:

Ismail El Mouayni. Développement d'une méthode outillée pour l'amélioration des aspects santé-sécurité dès les premières phases de la conception des systèmes de production par la prise en compte des marges de manœuvre temporelles. Génie des procédés. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2017. Français. NNT : 2017ENAM0042 . tel-01680219

HAL Id: tel-01680219

<https://pastel.hal.science/tel-01680219>

Submitted on 10 Jan 2018

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

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

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'ingénieur

Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Génie industriel "

Présentée et soutenue publiquement par

Ismail EL MOUAYNI

le 7 décembre 2017

Proposition d'une méthode outillée pour améliorer les aspects santé-sécurité dès les premières phases de conception des systèmes de production par la prise en compte des marges de manœuvre temporelles

Directeur de thèse : **Ali SIADAT**

Co-encadrement de la thèse : **Alain ETIENNE, Jean-Yves DANTAN et Aurélien LUX**

Jury

M. Eric LEVRAT , Professeur, CRAN, Université de Lorraine	Président
M. François PERES , Professeur, ENIT, Université de Toulouse	Rapporteur
M. Damien TRENTESAUX , Professeur, LAMIH, UVHC	Rapporteur
Mme. Flore BARCELLINI , Professeur, CRTD, Cnam	Examinatrice
M. Antonio BRANDAO MONIZ , Professeur, ITAS, Karlsruhe Institute of Technology	Examineur
M. Ali SIADAT , Professeur, LCFC, Arts et Métiers ParisTech	Examineur
M. Alain ETIENNE , Maître de conférences, LCFC, Arts et Métiers ParisTech	Examineur
M. Jean-Yves DANTAN , Professeur, LCFC, Arts et Métiers ParisTech	Examineur
M. Aurélien LUX , Chargé d'études, CPI, Institut National de Recherche et de Sécurité	Invité

**Arts et Métiers ParisTech- Campus de Metz
Laboratoire de Conception Fabrication Commande**

Remerciements

C'est avec un immense plaisir que je rédige ces derniers lignes durant les jours qui précèdent l'évaluation de ce mémoire. Ceci clôture trois ans de travail et de dévouement. J'éprouve une vive émotion vis-à-vis les multiples événements, à la fois personnels et professionnels, qui ont jalonné cet aventure.

La période pendant laquelle j'ai entrepris mes études doctorales a fortement marqué ma vie. La nature transverse du sujet traité m'a permis d'acquérir des nouvelles connaissances et en particulier, celles en lien avec l'ergonomie et le positionnement de l'Homme au travail. J'ai eu l'occasion de participer à deux conférences internationales et d'échanger avec des personnes de disciplines différentes. J'ai pu faire des nouvelles connaissances et tisser des liens forts avec des personnes qui ont marqué ma vie et contribué à leur manière, à l'aboutissement de cette thèse. Cette partie leur est consacrée.

A ce titre, j'aimerais remercier les professeurs **François PERES** et **Damien TRENTESAUX** qui évalueront ce mémoire. J'aimerais également remercier les professeurs **Eric LEVRAT**, **Flore BARCELLINI** et **Antonio BRANDAO MONIZ** qui compléteront le jury devant lequel je défendrai ces travaux de thèse.

Je présente mes remerciements à mes encadrants, maître de conférences **Alain ETIENNE**, professeurs **Jean-Yves DANTAN** et **Ali SIADAT** pour leur supervision et leur aide. J'aimerais exprimer mes sincères remerciements au Professeur **Patrick MARTIN** et au Docteur **Xavier GODOT** pour leurs conseils et leur support. J'exprime ma gratitude envers l'INRS qui a participé au financement de ces travaux et dont les membres ont contribué à la réussite de ce travail. En particulier Mr. **Aurélien LUX**, chargé d'étude au sein CPI et Mr. **Jacques MARSOT** responsable du laboratoire CPI de l'INRS. J'exprime également mon grand remerciement à la région Grand Est qui, à côté de l'INRS, a cofinancé ces travaux de thèse.

J'aimerais également remercier mes collègues au sein du LCFC, avec qui j'ai partagé les meilleurs moments de ma vie, **Nicholas, Paul, Marc, Jelena, Mohammad, Mohammed, Zhicheng, Uzair, Edoh, Meryem, Jean-François** et **Gabriel**. J'exprime ma gratitude envers le personnel de l'ENSAM, **François, Jean-François, Jean-Luc, Corinne, Lala, Maryline, Samantha, Dominique, Florence**, à tous ceux qui ont été là pour m'apporter l'aide et le support nécessaire.

J'exprime ma gratitude envers mes parents, mes deux frères et ma sœur pour la patience dont ils ont fait preuve pendant ces trois ans. Enfin, j'aimerais accorder mon remerciement à tous ceux qui, de proche ou loin, ont contribué à la réussite de ces travaux de thèse.

Liste des abréviations

TMS	Troubles Musculosquelettiques
RPS	Facteurs de Risque Psychosociaux
SPT	Système de Production de Toyota
PAC	Processus d'Amélioration Continue
MSP	Maîtrise Statistique des Procédés
JAT	Juste-A-Temps
MTQ	Mangement Total de la Qualité
TSOM	Technique de Séquencement Opérationnel de Maynard
STMP	Systèmes des Temps de Mouvements Prédéterminés
EFH	Evaluation de la Fiabilité Humaine
PEH	Probabilité d'Erreur Humaine
TEREH	Technique d'Evaluation et de Réduction de l'Erreur Humaine
CPE	Conditions Productrice d'Erreurs

Glossaire

Mot d'origine	Traduction proposée	Définition
Fishbone flow	Flux en arête de poisson	Principe d'enchaînement du travail selon lequel les pièces sont amenées à la ligne principale à partir de lignes transversales (C.I.R.P., 2011)
Reflective production system	Système de production réfléchi	Système adapté à la variabilité de la situation de travail par la mise en parallèle des flux et le développement des compétences des opérateurs par un apprentissage holiste (Ellegard, 1997)
Lean production system	Système de production Lean	Système basé sur l'efficacité économique en réduisant tout type de gaspillage ou d'activité sans valeur ajoutée par le biais d'un Processus d'Amélioration Continue (Constanze, 2005)
Cyber-physical system	Système cyber-physique	Un système envisageable permettant de manier les opérations dans le monde physique en exploitant des données avancées et des modèles de simulation dans la dimension cybernétique (Babiceanu and Seker, 2016)
System Under Investigation (SUI)	Système Sous Investigation (SSI)	Système réel ou en cours de conception dont on cherche à évaluer le comportement par la simulation. Cette appellation a été utilisée dans (Arbez and Birta, 2007)
Status Change Specification (SCS)	Spécification de Changement de Statut (SCS)	Groupe de variables qui forme une expression dont le changement instantané de sa valeur est associé à un événement de changement d'état d'une entité (Arbez and Birta, 2007)
Activity Based Conceptual modeling (ABCmod)	Modélisation Conceptuelle basée sur les Activités (modCBA)	Méthode de conception proposée par (Arbez and Birta, 2007) qui considère deux vues : la structure et le comportement. Ce dernier est décrit en termes d'activités réalisées par les entités du système

<p>Conceptual Models of the Mission Space (CMMS)</p>	<p>Modèles Conceptuels des Missions d'Espace (MCME)</p>	<p>Méthodologie outillée développée par L'Office de la Modélisation et la Simulation pour la Défense aux Etats-Unis d'Amérique, dans l'objectif de résoudre les problèmes d'interopérabilité dans les projets de simulation. Elle est articulée sur quatre composantes : un modèle conceptuel orienté mission d'espace ; une méthode de travail ; un système de management des données ; des outils de supports, des utilitaires et des guides d'utilisation (Robinson et al., 2010)</p>
<p>Defense Conceptual Modeling framework (DCMF)</p>	<p>Méthodologie de la Modélisation Conceptuelle pour la Défense (MMCD)</p>	<p>Basée sur la méthode MCME, la méthode MMCD est développée par l'Agence suisse de Recherche pour la Défense. Elle étend la méthode MCME et se focalise sur l'acquisition des connaissances, leur représentation et leur réutilisation (Robinson, 2011)</p>
<p>Ant Colony Optimization (ACO)</p>	<p>Optimisation par Colonies de Fourmis (OCF)</p>	<p>Approche métaheuristique pour la résolution des problèmes combinatoires en s'inspirant des colonies de fourmis. En particulier, l'emploi de la phéromone comme moyen indirecte de communication. Par analogie, OCF utilise des fourmis artificielles (des agents) qui exploitent une phéromone artificielle (donnée numérique) pour trouver une solution. Elles en déposent pour partager l'expérience acquise lors de l'exploration de l'espace des solutions (Dorigo and Stützle, 2003)</p>
<p>Iterated Local Search Optimization (ILSO)</p>	<p>Optimisation par Recherche Locale Itérative (ORLI)</p>	<p>Méthode de recherche stochastique locale qui applique des perturbations itératives sur une solution donnée par une méthode de recherche classique. Ces perturbations engendrent une exploration aléatoire de l'espace d'un optimum local, qui visent à améliorer la qualité de la solution obtenue par la méthode de base (Glover and Kochenberger, 2003)</p>

Greedy Randomized Adaptive Search Optimization (GRASO)	Optimisation par Recherche Gloutonne Aléatoire Adaptative (ORGA)	Métaheuristique avec multiples points de départ dans laquelle chaque itération est composée en deux phases : construction d'une solution faisable et exploration du voisinage afin de trouver un minima local (Glover and Kochenberger, 2003)
Evolutionary Algorithms (EA)	Algorithmes Evolutionnaires (AE)	Des algorithmes qui imitent les principes d'évolution naturelle pour constituer une procédure de recherche et d'optimisation. Ces approches traitent une population de solution qui évolue au cours de la recherche. Elles sont donc différentes des algorithmes classiques, qui mettent à jour une solution à chaque itération (Deb and Kalyanmoy, 2001)
Stress	Stress	Selon l'approche ingénierie, le stress est défini comme étant une caractéristique stimulante de l'environnement. Elle est perçue d'habitude comme le niveau de charge ou de demande subi par un individu, ou des éléments aversifs ou néfastes de cet environnement (Cox, 1993)
Strain	Tension	Réponse au stress subi par l'individu et qui dépend de ses caractéristiques personnelles. Généralement réversible, dans certains cas, elle peut ne pas l'être (Cox, 1993)
Goal setting theory	Théorie de définition des buts	Théorie qui stipule que le comportement conscient de l'humain est basé sur l'intention et qu'il est régulé par les buts individuels fixés (Latham and Locke, 1991)
Achievement theory	Théorie de la réalisation	Une théorie qui vise à évaluer la motivation en considérant quatre bases de mesure : le motif, l'espérance de la réussite, l'incitateur (Atkinson et al., 1960)

Job characteristics model	Modèle des caractéristiques de l'activité	Une théorie qui cherche à évaluer la motivation en se basant sur cinq caractéristiques de l'activité : variété des compétences requises, signification, identité, autonomie et retour sur la performance (Treville and Antonakis, 2006)
Task	Tâche	Une ou plusieurs procédures prescrites à réaliser par un ou plusieurs opérateurs, sous certaines conditions et objectifs (C.I.R.P., 2011)
Job	Activité	L'élément central organisateur et structurant les composantes de la situation de travail (Vézina, 2001). Elle est souvent associée à des tâches qui représentent des objectifs à atteindre sous certaines conditions. L'activité est le résultat de la réponse non-passive de l'opérateur aux demandes et aux exigences d'une ou d'un ensemble de tâches (Karwowski, 2006)
Maynard Operation Sequence Technique (MOST)	Technique de Séquencement Opérationnel de Maynard (TSOM)	Méthode permettant d'estimer le temps normal de réalisation d'une tâche (temps standard) en utilisant un modèle générique de décomposition basé sur le mouvement des objets manipulés (Zandin, 2002)
Predetermined Motion Time Systems (PMTS)	Systèmes des Temps de Mouvements Prédéterminés (STMP)	Systèmes dont la finalité vise à estimer les temps standards des tâches. Ils consistent à trouver une décomposition des mouvements réalisés en éléments de base, et d'associer une unité de temps à chacun d'eux (Genaidy et al., 1989)
Just-In-Time system (JIT)	Système Just-A-Temps (JAT)	Pilier majeur dans le Système de Production de Toyota, le système Just-A-temps est une (ou plusieurs) solution sociotechnique permettant de produire les unités nécessaires, avec les quantités nécessaires aux bons moments (Monden, 2011)

Total Quality Management (TQM)	Management Total de la Qualité (MTQ)	MTQ est la coopération mutuelle de toutes les parties prenantes et des collaborateurs d'une organisation afin de produire de la valeur et le service qui répondent aux besoins et aux attentes des clients. Elle s'appuie sur huit principes définis dans la norme BS EN ISO 9000 : être centré sur le client ; leadership ; avoir une approche participative ; approche processus ; management par une approche système ; amélioration continue ; approche factuelle pour la prise de décision ; bénéfice mutuel entre entreprise-fournisseurs (Dale, 2015)
Human Reliability Assessment (HRA)	Evaluation de la Fiabilité Humaine (EFH)	Discipline visant à évaluer l'erreur humaine dans les systèmes et réduire sa probabilité si l'estimation de celle-ci s'avère élevée (Kirwan, 1996)
Human Error Probability (HEP)	Probabilité d'Erreur Humaine (PEH)	Valeur permettant d'évaluer la chance d'occurrence d'une erreur de la part d'un humain (opérateur) (Kirwan, 1996)
Human Reliability Qualification Techniques	Techniques de Qualification de la Fiabilité Humaine	Ensemble de techniques qui cherchent à caractériser la fiabilité humaine dans des systèmes de travail (Kirwan, 1996)
Human Error Assessment and Reduction Technique (HEART)	Technique d'Evaluation et de Réduction de l'Erreur Humaine (TEREH)	Ensemble de techniques de qualification de la fiabilité humaine. Elle est caractérisée par une bonne applicabilité. Elle s'appuie sur une classification générique des tâches, leur associant des probabilités nominales qui sont impactées par des Conditions Productrices d'Erreurs (Kirwan, 1996)
Error Producing Conditions (EPC)	Conditions Productrices d'Erreur (CPE)	Selon la méthode TEREH, se sont des conditions qui viennent amplifier la probabilité d'erreur nominale et favoriser par la suite l'occurrence d'une erreur humaine dans un système de travail (Kirwan, 1996)

Avant-propos

Ce travail de recherche a été réalisé dans le cadre du laboratoire mixte LC2S (Laboratoire de Conception de Systèmes Sûrs) créé sous la collaboration du LCFC (Laboratoire de Conception Fabrication Commande - lfc.ensam.eu), laboratoire rattaché aux Arts et Métiers, centre Metz et l'équipe CPI (Conception, équipements de Protection et Interface homme-machine) de l'INRS.

Les travaux du LCFC visent à développer des modèles, des démarches et des outils d'aide à la décision pour la conception, la fabrication de produits, la conception et la commande des moyens de production, ainsi que l'organisation et l'amélioration des systèmes de production. Les contributions du LCFC visent à assurer une productivité soutenue des systèmes, une sûreté fonctionnelle des moyens et la préservation de l'intégrité des opérateurs humains.

L'INRS est l'un des partenaires stratégiques du LCFC. Sa mission consiste à développer et promouvoir une culture de la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles. Ceci, tout en répondant aux exigences sociales, politiques et économiques. Pour réussir sa mission, l'INRS articule ses actions selon quatre axes majeurs : identification, analyse, diffusion et promotion. Ses actions sont destinées aux spécialistes de la prévention, aux entreprises et aux salariés du régime général de la sécurité sociale. Ainsi, le LC2S combine à la fois, la mission du LCFC et celle de l'INRS, à savoir la formulation des connaissances, des outils et des méthodes de conceptions des systèmes et qui intègrent la sécurité et la prévention des risques professionnels.

C'est dans ce cadre de forte collaboration que s'inscrivent ces travaux de thèse. La problématique abordée est spécifique aux systèmes de production : le développement d'une méthode outillée permettant la prise en considération des marges de manœuvre dès les premières phases de conception. Le déficit en termes de marges de manœuvre des opérateurs a été identifié par plusieurs ergonomes comme contribuant dans la genèse de certaines maladies professionnelles. Ce travail vise à apporter une approche outillée permettant au concepteur d'évaluer les marges de manœuvre des opérateurs tout en considérant la productivité du système et repenser la conception de telle sorte à combiner productivité et sécurité.

Table des matières

Remerciements.....	1
Liste des abréviations.....	2
Glossaire	3
Avant-propos	8
Table des matières	9
Liste des figures	13
Liste des tableaux	16
Chapitre 1 : Contexte et problématique.....	19
1.1. Fin de la production artisanale.....	21
1.2. Taylorisme.....	22
1.3. Système Fordiste	23
1.4. Système de production de Toyota.....	24
1.5. Système de production réfléchi : usine d’Uddevalla de Volvo.....	26
1.6. Systèmes agiles, flexibles et usines du futur	27
1.7. Formulation de la problématique.....	29
Chapitre 2 : Etat de l’art.....	32
2.1. L’Homme dans les systèmes de production	34
2.1.1. Prévention contre les risques biomécaniques.....	34
2.1.2. Prévention contre les risques psychosociaux	36
2.1.3. Concept de marge de manœuvre.....	38
2.1.4. Allocation des marges de manœuvre.....	40
2.1.5. Intégration des facteurs humains	41
2. Conception des systèmes de production	52
2.2.1. Architectures des systèmes de production.....	54
2.2.2. Méthodes de conception et d’évaluation des choix de conception.....	57
2.2.3. Evaluation de la performance d’un système de production	72

2.3. Conclusions	74
Chapitre 3 : Approche proposée.....	77
3.1. Développement d'indicateurs d'évaluation : productivité et conditions de travail.....	78
3.1.1. Evaluation de la marge de manœuvre temporelle dans une situation de travail....	79
3.1.2. Evaluation de la productivité	82
3.1.3. Evaluation de la robustesse	84
3.2. Structure de la simulation	85
3.2.1. Contexte d'utilisation de la simulation	85
3.2.2. Architecture de l'outil de simulation développé	86
3.2.3. Paradigme pour la construction du modèle conceptuel de la simulation	87
3.2.4. Exécutif de la simulation	88
3.2.5. Approche globale pour la construction du modèle conceptuel de simulation	89
3.3. Modélisation structurelle générique d'un système de production.....	89
3.3.1. Niveau d'abstraction élevé.....	90
3.3.2. Niveau de modélisation détaillé	91
3.4. Modélisation comportementale d'un système de production.....	103
3.4.1. Niveau d'abstraction élevé.....	103
3.4.2. Niveau d'abstraction détaillé	109
3.5. Conclusions	112
Chapitre 4 : Cas d'étude.....	115
4.1. Vérification expérimentale.....	117
4.1.1. Paramétrage de l'outil de simulation	118
4.1.2. Résultats et discussion.....	119
4.2. Vérification des marges de manœuvre temporelle dans un système de production	121
4.2.1. Paramétrage de l'outil de simulation	123
4.2.2. Résultats et discussion.....	124
4.3. Etude de la structure organisationnelle : politique de pause	129
4.3.1. Paramétrage de l'outil de simulation	130

4.3.2. Résultats et discussion.....	132
4.4. Bilan des cas d'étude.....	134
Conclusions générales	137
A. Choix de l'approche.....	137
B. Contributions.....	138
C. Vérification et mise en pratique de l'approche.....	139
D. Limitations.....	140
E. Perspectives	141
Bibliographie	142
Annexes.....	155
Annexe 1 : Les tableaux des temps de récupération (Kanawaty and International Labour Office, 1992).....	155
1.1. Nombre de points en fonction de la force appliquée	155
1.2. Posture	157
1.3. Vibrations.....	157
1.4. Temps de cycle	158
1.5. Habillement restrictif	158
1.6. Concentration – anxiété.....	159
1.7. Monotonie.....	159
1.8. Tension visuelle.....	160
1.9. Bruit	160
1.10. Conversion de la somme des points en pourcentage.....	161
Annexe 2 : Fichier d'entrée du simulateur.....	162
2.1. Structure globale.....	162
2.2. Déclaration d'un opérateur	162
2.3. Déclaration d'un moyen du transfert.....	163
2.4. Déclaration d'un poste de travail manuel.....	163
2.5. Déclaration d'un produit.....	164

TABLE DES MATIÈRES

2.6.	Déclaration des capacités de base.....	164
2.7.	Déclaration des facteurs de stress.....	164
2.8.	Déclaration des compétences.....	165
2.9.	Déclaration d'une tâche.....	165
2.10.	Déclaration d'une activité.....	166
Annexe 3 : Mode d'emploi de l'outil AEN-PRO.....		166
3.1.	Prérequis.....	166
3.2.	Charger une conception.....	167
3.3.	Lancement d'une simulation.....	168
3.4.	Résultats de la simulation.....	169

Liste des figures

Figure 1 : Ligne d'assemblage Ford du magnéto de démarrage (1913). Une fragmentation des tâches léguée du système taylorien et une standardisation du système de production introduite par Ford (McKenzie, 2015).....	23
Figure 2 : Synthèse des pratiques dans le système de production Lean.	25
Figure 3 : Cellule de travail à poste unique / poste de charge (C.I.R.P., 2011).....	28
Figure 4 : Système de production cyber-physique.	28
Figure 5 : Relations existantes entre exigences de travail, marges de manœuvre et TMS (Lanfranchi and Duveau, 2008).	40
Figure 6 : Processus de la méthode TEREH.	51
Figure 7 : Etapes de mise en place d'un système de production (Rodde, 1989).....	53
Figure 8 : Agencement linéaire (flow-shop).....	54
Figure 9 : Architecture en arête de poisson (C.I.R.P., 2011).....	55
Figure 10 : Agencement en cellules fonctionnelles (job-shop).....	56
Figure 11 : Agencement en ilots.....	56
Figure 12 : Approche FBS (Gero and Kannengiesser, 2004).	57
Figure 13: Méthodes d'analyse d'un système de production (Rooda and Vervoort, 2007).	61
Figure 14: Principe de la simulation numérique.....	62
Figure 15: Mécanisme de simulation par planification des événements.....	66
Figure 16: Mécanisme de simulation par interactions de processus.	67
Figure 17 : Mécanisme de simulation par trois phases.	69
Figure 18: Architecture MAGMA.....	71
Figure 19 : Modélisation à base des états élémentaires d'une machine-outil.....	74
Figure 20 : Illustration de l'écart capacité opérateur exigence du travail dû à la variabilité.	75
Figure 21 : Paramétrage temporel du séquençement de travail.....	79
Figure 22 : Relation entre les paramètres physiques du poste de travail, le flux physique (TMEE) et les marges de manœuvre temporelles.	80
Figure 23 : (a)- Conception non valide (b)-conception qui vérifie le critère développé.	81

Figure 24 : Modélisation comportementale basée sur les états élémentaires.	83
Figure 25 : Contexte d'utilisation de la simulation.	86
Figure 26 : Architecture de l'outil de simulation.	87
Figure 27: Paradigme adopté pour la construction du modèle.	88
Figure 28: Mécanisme de simulation.	88
Figure 29 : Modèle conceptuel générique pour la simulation des systèmes de production.	90
Figure 30 : Classe PSAgent du modèle de simulation.	91
Figure 31 : Modélisation d'une activité et prise en compte de l'accoutumance et la motivation.	92
Figure 32 : Prise en compte des capacités de bases et des compétences dans le modèle d'activité.	95
Figure 33 : Modélisation d'une séquence de travail.	96
Figure 34 : Phases d'une séquence de travail.	97
Figure 35 : Modélisation du physique de l'agent humain et intégration de la fatigue.	98
Figure 36: Impact de changement tâche sur la fatigue.	99
Figure 37 : Classe Entité fixe.	101
Figure 38 : classe Entité Mobile et Produit.	103
Figure 39 : Classes d'états élémentaires.	104
Figure 40 : Classes des comportements d'agents.	104
Figure 41 : Modélisation du comportement de l'agent opérateur.	105
Figure 42 : machine à états finis modélisant un poste de travail manuel.	107
Figure 43 : Machine à états finis modélisant le moyen de transfert.	108
Figure 44 : Modélisation des comportements de l'agent stock.	109
Figure 45 : Modélisation structurelle de la tâche en phases.	110
Figure 46 : (a)-décomposition de la phase (Gt) (b)- décomposition de la phase (Pt).	111
Figure 47 : Approche FBS (Gero and Kannengiesser, 2004).	116
Figure 48 : (a) Schéma du banc expérimental utilisé (b) Photo du banc expérimental.	117
Figure 49 : Modélisation sous AEN-PRO du banc d'expérimentation.	119
Figure 50 : Variation des temps de séquences du travail selon l'expérimentation et l'outil AEN-PRO.	120

Figure 51 : Variation de l'indicateur N_m lors de l'expérience et son estimation par l'outil de simulation.....	120
Figure 52 : Distribution des états élémentaires des agents « Opérateur » et « Moyen de Transfert ».....	121
Figure 53 : Une conception préliminaire de la ligne d'assemblage.....	123
Figure 54 : Modélisation d'une ligne de production simple sous AEN-PRO.....	124
Figure 55 : Estimation de l'évolution de la fatigue des opérateurs.....	125
Figure 56 : Variation du temps opératoire.....	125
Figure 57 : variation de l'indicateur N_m	126
Figure 58 : Distribution des états élémentaires des agents du système.....	127
Figure 59 : Conception améliorée.....	127
Figure 60 : Variation de l'indicateur N_m dans la conception améliorée.....	128
Figure 61 : Agencement linéaire simulé.....	129
Figure 62 : Agencement en îlots parallèle.....	130
Figure 63 : (a)-Fatigue dans l'agencement linéaire (b)-Fatigue dans l'agencement en îlots avec pause planifiées.....	132
Figure 64 : Evolution de la fatigue dans l'agencement en îlots avec pauses autonomes.....	132
Figure 65 : (a)- Indicateur de la marge de manœuvre temporelle dans la configuration linéaire (b)- Indicateur de marge de manœuvre temporelle dans l'agencement en îlots avec pause planifiées.....	133
Figure 66 : Indicateur de marge de manœuvre temporelle dans l'agencement en îlots avec pauses autonomes.....	134
Figure 67 : Approche globale proposée dans ces travaux de thèse (basée sur l'ontologie FBS).....	139
Figure 68 : Interface de l'outil AEN-PRO.....	167
Figure 69 : Opération de chargement d'un fichier de conception.....	168
Figure 70 : Lancement de la simulation.....	168

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse d'études épidémiologiques qui établit le lien entre facteurs biomécaniques et TMS (Lanfranchi and Duveau, 2008)	34
Tableau 2 : Synthèse d'études épidémiologiques montrant le lien entre les facteurs de risques psychosociaux et le stress (Lanfranchi and Duveau, 2008).....	36
Tableau 3: Synthèse des études épidémiologiques montrant le lien entre les risques psychosociaux et les TMS (Lanfranchi and Duveau, 2008)	37
Tableau 4 : Dimensions des marges de manoeuvre (Durand et al., 2011)	39
Tableau 5: Capacités de base susceptible d'impacter la performance de l'individu (Fleishman, 1967)	41
Tableau 6: Facteurs de stress causant la fatigue (Kanawaty and International Labour Office, 1992)	44
Tableau 7: Exemples de modèles statiques de la fatigue musculaire.....	45
Tableau 8: Vieillesse et variation de la performance physique (Boenzi et al., 2015).....	49
Tableau 9 : Aperçu de la classification générique des tâches proposée par TEREH.....	51
Tableau 10 : Aperçu de quelques conditions productrices d'erreurs proposées par la méthode TEREH	51
Tableau 11 : Problèmes classiques d'équilibrage de ligne d'assemblage simple	59
Tableau 12 : Principes de décomposition pour modéliser un système manufacturier	63
Tableau 13 : Exemple de phases proposées par la Technique de Séquencement d'Opérations de Maynard pour modéliser une séquence de travail (Zandin, 2002).....	64
Tableau 14 : Comparatif des différents mécanismes de simulation.....	70
Tableau 15: Les conditions de transition relatives à la MEF modélisant le comportement opérateur.	106
Tableau 16: Conditions de transitions relatives à la machine à états finis modélisant l'agent poste de travail manuel.	107
Tableau 17 : Conditions de transitions relatives à la machine à états finis modélisant le comportement d'un agent moyen de transfert.....	108
Tableau 18 : Intensité des facteurs de stress	118
Tableau 19 : Résultats de l'expérimentation et de la simulation	119

Tableau 20 : Opérations élémentaires pour montage d'un mixeur.....	122
Tableau 21 : Temps de traitement des tâches et la force moyenne appliquée par l'opérateur...	123
Tableau 22 : Facteurs de stress présents dans la phase traiter des différentes tâches ainsi que leurs intensités.....	123
Tableau 23 : Les facteurs de stress présents en phases « Appréhender » et « Mettre » des trois tâches	124
Tableau 24 : Les sorties de système sur une journée de travail.....	126
Tableau 25 : Valeurs de l'indicateur N_m pour les différents opérateurs.	128
Tableau 26 : Intensités des facteurs de stress présents dans l'aménagement linéaire.....	130
Tableau 27 : Intensités des facteurs de stress présents dans l'aménagement en îlots.....	131
Tableau 28 : Configuration des paramètres de la simulation.....	131
Tableau 29 : Indicateur de marge de manœuvre temporelle dans l'aménagement linéaire.....	133
Tableau 30 : Indicateur de marge de manœuvre temporelle pour l'aménagement en îlots avec pauses planifiées	133
Tableau 31 : Indicateur de marge de manœuvre dans l'aménagement en îlots avec pauses autonomes	134
Tableau 32 : Productivité des trois configurations.....	134
Tableau 33 : Points accordés au facteur « force appliquée » lorsque le stress est bas.....	155
Tableau 34 : Nombre de points accordés suite à l'application d'une force lorsque le stress est modéré.....	156
Tableau 35 : Nombre de points accordés pour l'application d'une force donnée avec un stress élevé	156
Tableau 36 : Points accordés selon la nature de posture du travail.....	157
Tableau 37 : Nombre de points accordés à une tâche selon la nature des vibrations présentes.	157
Tableau 38 : Nombre de points accordés à une tâche selon son temps de cycle moyen	158
Tableau 39 : Nombre de points accordés à une tâche selon la nature d'habillement de l'opérateur	158
Tableau 40 : Points accordés à une tâche selon le niveau de concentration demandé ou/et l'anxiété présente.....	159
Tableau 41 : Points accordés à une tâche selon la monotonie	160

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 42 : Points à accorder selon la tension visuelle.....	160
Tableau 43 : Points à accorder selon le bruit présent dans la situation du travail	161
Tableau 44 : Tableau de conversion de la somme cumulée des points en pourcentage	161
Tableau 45 : Fichiers Matlab pour le traçage des courbes.....	169

Chapitre 1 : Contexte et problématique

[...] « Taylorisme a conduit à la naissance d'une nouvelle profession, d'une nouvelle élite d'experts, les ingénieurs industriels, responsables d'étudier les temps et les mouvements dans le travail et qui, pendant les années 1920s, sont devenus les protecteurs du Graal sacré des structures tayloristes-fordistes » [...]

(Constanze, 2005)

Résumé

Le but de ce chapitre est d'introduire le contexte et la problématique soulevée dans ces travaux de thèse. Par le biais d'une synthèse de l'évolution des systèmes de production le long du dernier siècle, l'analyse du paradigme de travail d'aujourd'hui est établie. Les limites de certains choix de conception légués du « Taylorisme », du système « Fordiste » et du « Toyotisme » face à la variabilité et la complexité de la situation de travail sont mises en exergue. Ces limites peuvent éventuellement aboutir à des situations à facteurs de risque et en particulier à risques dits psychosociaux, qui sont nuisibles à la santé mentale et physique de l'opérateur. Par ce fait, ce chapitre introduit un besoin en terme d'approche outillée de conception des systèmes de production qui tiennent compte de ces variabilités et qui mettent en place les dispositifs permettant de les manager : les marges de manœuvre.

Pendant le siècle dernier, les systèmes de production ont connu des changements radicaux suite aux avancées scientifiques et technologiques. Des systèmes sociotechniques innovants, reposant sur des nouveaux paradigmes de travail ont vu le jour. En partant des principes tayloristes (Voss, 1995) (Taylor, 1998), en passant par les systèmes « Fordistes » (Constanze, 2005), le « Toyotisme » (Treville and Antonakis, 2006), les systèmes réfléchis (Ellegard, 1997) et les systèmes agiles (Raouf and Ben-Daya, 1995), pour arriver aux systèmes intelligents et l'émergence d'une usine hyper connectée : l'usine 4.0 (Becker and Stern, 2016), les systèmes industriels ont significativement évolué.

Cette évolution résulte à la fois d'une volonté interne d'amélioration et d'une réponse aux exigences externes auxquelles les systèmes de production sont soumis, notamment la forte augmentation de la demande due à la croissance économique des années 80s, ainsi que l'environnement concurrentiel résultant de la mondialisation. Avec ces changements, des modifications au niveau de la performance et en particulier les conditions de travail des opérateurs sont ressenties par ces derniers, et observées sur tous les niveaux hiérarchiques au sein des entreprises industrielles.

Face à l'évolution des systèmes de production et plus profondément, à l'évolution du paradigme de travail, la question de la santé de l'opérateur est souvent soulevée. Grâce aux moyens technologiques mis en place dans les systèmes de production modernes, le travail d'aujourd'hui est devenu moins physique. Cependant les contraintes psychosociales subies par l'opérateur sont de plus en plus fortes.

Toutefois, les approches de prévention intégrées, à part quelques travaux récents (Neumann and Medbo, 2009) (Jaber et al., 2013) (Givi et al., 2015), se concentrent principalement sur les facteurs de risques biomécaniques présents dans une situation de travail. Ainsi, plusieurs systèmes d'évaluation visant à évaluer la charge mécanique subie par les opérateurs ont été développés. Parmi les systèmes les plus employés, peuvent-être cités, le système RULA (McAtamney and Corlett, 1993), le système OCRA (Occhipinti, 1998) et le système REBA (Hignett and McAtamney, 2000). Ces systèmes peuvent être utilisés pendant les premières phases de conception, par le biais d'outils technologiques comme la simulation par mannequins numérique, par les plateformes de la réalité virtuelle, ou en utilisant des techniques d'analyse comme la programmation linéaire.

Selon (European Agency for Safety and Health at Work, 2010), les Troubles Musculosquelettiques (TMS) représentent la majorité des maladies professionnelles recensées dans l'industrie. Il existe différents groupes de facteurs de risque comprenant les facteurs physiques et biomécaniques, mais aussi des facteurs de risque organisationnels, psychosociaux et personnels qui peuvent contribuer dans la genèse des TMS (Koukoulaki, 2014). (Tuncel et al., 2008) ont évalué des interventions qui visent à réduire les TMS dans des systèmes industriels.

Les résultats de l'étude vis-à-vis de l'efficacité de ces interventions sont non concluants. Par la suite, ils ont conclu à l'importance de considérer à la fois les aspects physiques et psychosociaux pour assurer une prévention efficace contre les TMS et les maladies professionnelles en général. Dans (Lanfranchi and Duveau, 2008), l'état de l'art épidémiologique proposé permet d'établir le lien potentiel entre des facteurs de Risque Psychosociaux (RPS), le stress et les TMS. La pression temporelle, une charge de travail élevée, un faible support social et la monotonie, combinés à des exigences de travail élevées, la latitude décisionnelle et non contrôle de la situation de travail, représentent des exemples de ces facteurs de risque.

Par conséquent, ce chapitre introductif se focalise sur les aspects organisationnels et physiques qui, dans certaines conditions de travail, peuvent potentiellement mener à des RPS. Il est indispensable de bien comprendre l'évolution des systèmes de production et ses retombées sur le paradigme de travail actuel. La façon de travailler aujourd'hui résulte d'un siècle d'évolution dont certaines hypothèses, éléments de modèle de travail voire même des solutions organisationnelles et structurelles persistent aujourd'hui. A travers les modèles-types qui ont marqué l'histoire des systèmes de production, ce chapitre mène un diagnostic des choix de conception organisationnelles et physiques visant à augmenter la productivité. Leurs retombés sur les conditions de travail et en particulier la santé au travail sont mise en exergue. D'autre part, face à des tentatives de repositionnement de l'opérateur et son bien-être, notamment dans le Toyotisme (section 1.2) et le système Réfléchi (section 1.5), ce chapitre met l'accent sur le besoin en termes d'outils d'aide à la conception et d'un cadre méthodologique permettant de prendre en considération les facteurs humains, en particulier, les aspects psychosociaux et ceci, durant les premières phases de conception.

1.1. Fin de la production artisanale

La production artisanale marque son déclin en 1800 par l'introduction des pièces interchangeables dans la fabrication des armes à feu en Amérique de nord (Constanze, 2005). Cette interchangeabilité de pièces est atteinte par une standardisation des armes et ses constituants qui se fabriquent jusqu'à cette époque d'une manière unique dans des petits ateliers artisanaux. Cette standardisation et les possibilités de production en masse qui en découlent a donné naissance à ce qui sera connu dans la suite par les « systèmes manufacturiers américains » (Hounshell, 1985).

Cette standardisation des pièces a impacté d'une manière significative la productivité des ateliers et la qualité des produits réalisés. Concrétisée par des documents de spécification, elle représente une externalisation des connaissances détenues auparavant par les artisans qualifiés. Ceci, limitera les rôles de ces derniers dans les futurs systèmes de production et aboutira à un changement sociétal profond. La standardisation a également ouvert la porte à l'utilisation des machines spéciales et la réduction de la dépendance de la force ouvrière, l'amélioration de la

cadence de fabrication et la capacité du processus pour répondre à une demande de plus en plus croissante.

Cette production standardisée s'est naturellement propagée par la suite dans d'autres industries ouvrant ainsi, des nouvelles possibilités d'amélioration. Des nouvelles formes d'organisation sont apparues dans le but de répondre à une demande de plus en plus croissante. Le « Taylorisme » verra le jour, marquant ainsi, la fin de la production artisanale et le début de l'ère de la production de masse et la naissance des systèmes « Tayloristes-Fordistes ».

1.2. Taylorisme

Le déclin de la production artisanale et la croissance de la demande a impliqué la transformation du modèle de travail en atelier vers des grandes structures de travail. Par conséquent, l'organisation du travail est devenue plus rigoureuse afin d'assurer une productivité soutenue. Ainsi, par le biais d'une fragmentation des tâches et des compétences, le taylorisme a été introduit pour assurer un flux de production plus stable et rendre le travail plus efficace (Gartman, 1986).

Les principes de management scientifique du travail proposés par Taylor représentent des standards permettant d'identifier la relation entre l'opérateur et le travail. Ces standards consistent à décomposer le travail en éléments de mouvements séquentiels, permettant une amélioration de la performance de l'opérateur par l'analyse scientifique en regard de chaque élément (Drucker, 2008). Selon (Constanze, 2005), les idées de Taylor sont inspirées du travail de (Smith and Krueger, 2003) et (Babbage, 1992) Celles-ci peuvent se résumer en deux idées principales :

- La division et la fragmentation du travail et des compétences requises en ses composantes les plus réduites ;
- Spécialisation des tâches et la séparation entre le travail mental et physique. La standardisation du travail concernait deux dimensions du travail : son contenu et sa performance (façon de le réaliser).

Le but visé est de trouver la « meilleure façon » de faire (Taylor, 1998). Ceci est en conflit total avec l'ancienne idée qui stipule qu'un travailleur peut réguler sa propre façon de réaliser le travail. Aujourd'hui, elle est défendue par plusieurs ergonomes contemporains pour ses bienfaits sur la santé et le bien-être au travail (Caroly et al., 2010) : ce concept est baptisé marges de manœuvre.

Améliorer la performance en se basant sur les principes tayloristes a abouti à des tâches répétitives et fragmentées. Il est assumé que, moins la tâche est complexe, plus l'accoutumance de l'opérateur est élevée, tout comme sa rapidité dans l'exécution, sa précision et la qualité obtenue. Cette fragmentation a causé une chute de la qualification requise pour la réalisation du

travail. Autre hypothèse sur laquelle se base le taylorisme est le fait de considérer que l'unique but du travailleur est la rémunération et que l'employeur cherche un travail à coût bas. Ceci est concrétisé par une politique qui vise à récompenser les ouvriers les plus performants et qui, par ailleurs est reprise par Ford dans sa politique de 5 dollars le jour, une rémunération très compétitive à l'époque.

1.3. Système Fordiste

Dans un contexte de révolution technologique, Ford a combiné les principes tayloristes et l'avancement technologique (Braverman, 1998) pour former le premier système de production de masse, le Highland Park à Détroit (Hounshell, 1985). En plus de la standardisation du processus de travail, Ford proposait de standardiser les composantes structurelles du système de production, notamment le système du transfert, les stocks et l'aménagement. Dès lors, non seulement le contenu de travail et sa performance sont sujets à l'amélioration au sens de Taylor, mais c'est aussi le cas pour l'aménagement et les moyens de production. Par conséquent, l'éventualité de réduire des marges de manœuvre en lien avec des paramètres spatiaux.

Le cœur du système « Fordiste » réside dans une ligne d'assemblage mobile introduite au printemps du 1913. Inspirée de l'industrie agroalimentaire, elle a permis un travail en flux continu dans lequel les postes de travail sont standards, dont la tâche consiste à assembler des pièces standards, d'une manière standard, sur des châssis standards. Cette transformation a participé à la réduction de la responsabilité des ouvriers, qui a débuté avec le Taylorisme, en transférant les tâches de manutention de l'opérateur humain vers les machines industrielles (les convoyeurs) et donc, l'appauvrissement de la tâche (Figure 1).



Figure 1 : Ligne d'assemblage Ford du magnéto de démarrage (1913). Une fragmentation des tâches léguée du système taylorien et une standardisation du système de production introduite par Ford (McKenzie, 2015).

Il faut noter qu'un des éléments déterminants dans la réussite de système Fordiste est le choix de ne traiter qu'un unique produit standard : le modèle T. Ceci a facilité le travail de standardisation de grande échelle pour atteindre une production de masse (Hounshell, 1985).

Toutefois, le système Fordiste représentait un changement du paradigme de travail critiquable à l'époque. Selon (Badham and Jurgens, 1998), le modèle Fordiste conduit à des conditions de travail qui brident l'expression, la créativité ; l'ouvrier a le sentiment d'être dans un système "Alien". Les résultats sont sans équivoque : un taux d'absentéisme journalier colossal (10 % sur les 13667 ouvriers) et un turnover de 370%. Par conséquent, Ford a tenté d'influencer le comportement des ouvriers en mettant en place des incitatifs comme le fameux "cinq dollars le jour" et en instaurant un département psychosocial à l'usine de Ford. Ces moyens n'ont nullement abouti aux fins visées. Cependant, il faut reconnaître que le système Fordiste assurait une productivité sans précédent, rendant la voiture un produit accessible grâce à un coût de revient compétitif, ce qui a abouti à un développement à l'international et notamment au Japon, où naîtra un nouveau paradigme de travail : le « Toyotisme ».

1.4. Système de production de Toyota

En opposition avec le système « Fordiste » de production de masse qui a évolué pendant la période de croissance économique, le Système de Production de Toyota (SPT) ou le « toyotisme » proposait une autre approche basée sur l'efficacité économique face à des ressources très limitées. Le cœur de la réflexion du SPT est de réduire tout type de gaspillage ou d'activité sans valeur ajoutée par le biais d'un Processus d'Amélioration Continue (PAC) (Constanze, 2005). Ainsi ce système sera baptisé système de production « Lean » pour le différencier du système de production en masse, apparu dans l'occident (Krafcik, 1988). Selon (Treville and Antonakis, 2006), l'objectif du système de production Lean est de mettre en place un flux continu tout en cherchant perpétuellement à réduire le gaspillage et libérer par la suite des ressources. Le Lean ne vise pas un but spécifique de réduction, mais cherche à faire du PAC le long du cycle de vie du système. Ainsi, chaque amélioration conduit à une mise à jour des objectifs (Monden, 2011).

Comme l'illustre la Figure 2 deux pratiques en Lean sont à noter : la réduction des encours E_C et la maximisation des taux d'utilisation U des ressources (Treville and Antonakis, 2006). Selon la loi de Little appliquée à un poste de travail, le nombre des encours est proportionnel au temps de cycle T_C selon la formule suivante (Hopp and Spearman, 2001) :

$$E_C = P.T_C \quad (1)$$

Où P est la production par unité de temps. Comme le temps de cycle est proportionnel à la taille du lot, une des solutions consiste alors à réduire sa taille, voire passer à une production unitaire et en Juste-A-Temps (JAT). Pour cela, il faut adopter un aménagement spatial approprié et chercher en parallèle à réduire la variabilité. Celle-ci peut être observée dans la matière première et les produits en provenance des sous-traitants. Par conséquent, le Lean s'appuie sur le Management Total de la Qualité (MTQ) par lequel, tous les associés au système, les

fournisseurs, les sous-traitants mais également les ouvriers, auxquels on a délégué un certain niveau d'autonomie (*Jidoka*), participent à l'assurance qualité.

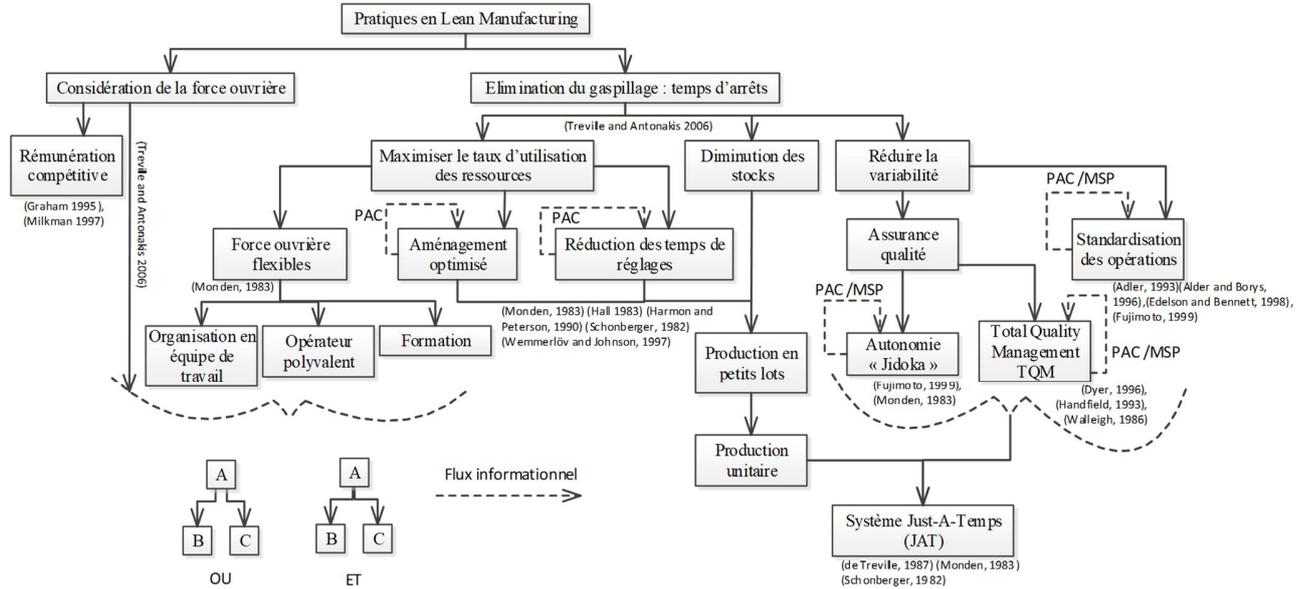


Figure 2 : Synthèse des pratiques dans le système de production Lean.

Un autre aspect de la variabilité concerne les opérations. A l'instar du Fordisme, le Toyotisme préconise le recours à la standardisation pour réguler l'activité de travail à deux différences près : d'abord les standards sont sujets au PAC. Deuxièmement, contrairement au « Fordisme » où les standards sont instaurés d'une manière purement horizontales, par des ingénieurs industrialisation avec une vision « la meilleure façon de faire », en « Toyotisme », la mise en place des standards est faite d'une manière participative, avec deux rôles clés: le « *Kumicho* », qui représente le leader du groupe d'opérateurs, et le « *Hancho* », qui est un cadre supérieur scientifique, qui peut être occupé notamment par un ingénieur (Constanze, 2005).

La maximisation du taux d'utilisation demande des opérateurs polyvalents pour contrer la fluctuation de la force ouvrière, un aménagement spatial adapté (donc sujet au PAC) à l'affectation organisationnelle des opérateurs et la nature du flux. La maximisation des taux d'utilisation revient également à minimiser les temps de réglage et les temps d'attente, obtenu par la minimisation de la taille des lots.

La réduction des encours implique le risque de blocage du flux en cas de problèmes de production. Face à ça, il faut que les opérateurs soient fortement engagés dans l'entreprise, ayant l'autonomie nécessaire pour résoudre les problèmes, voire participer à l'amélioration. Pour cette raison, le Lean Manufacturing met en avant le respect de l'opérateur. Une première pratique consiste à les motiver par le renforcement du travail en équipe. L'organisation dans le Toyotisme est principalement basée sur des équipes de travail qui sont responsables de l'atteinte des

objectifs de production et opèrent d'une manière relativement autonome, collaborative (collaboration par « andon »), voire agile (Adler, 1993) (Barker, 1993) (Graham, 1995) (Kenney and Florida, 1993) (Rinehart et al., 1997). Une autre mesure héritée du système occidental et qui est apparue avec le Fordisme est l'utilisation de système de rémunération compétitif : selon (Graham, 1995) et (Milkman, 1997), les opérateurs des systèmes Lean gagnent plus d'argent en comparaison avec des ouvriers des systèmes de production classiques. Cependant, une telle organisation augmente les contraintes socio-professionnelles au sein du système de production qui doit faire face à une variabilité. Celle-ci peut aboutir à des RPS. Ces risques ont poussé les ingénieurs à repenser la façon de travailler pour qu'elle soit plus philanthropique, donnant ainsi la naissance au système réfléchi de Volvo.

1.5. Système de production réfléchi : usine d'Uddevalla de Volvo

Le système dit réfléchi a vu le jour dans une nouvelle usine créée par Volvo à Uddevalla dans l'objectif de résoudre les limites des systèmes précédents face à la variabilité de la situation du travail. Selon (Engström et al., 1996), les méthodes de Lean pour limiter la variabilité demeurent théoriques et ne représentent qu'une abstraction très limitée de la réalité complexe des systèmes de production. Par conséquent, elles n'ont pas pu permettre une accommodation de la variabilité inter et intra opérateur, causant ainsi des temps d'arrêts, de reprise de produits (suite à un incident de qualité) et du blocage du flux physique, voire des situations anormales favorisant des maladies professionnelles par des RPS (Lanfranchi and Duvéau, 2008). D'autant plus que, selon (Constanze, 2005), quand les entreprises occidentales ont recopié le système Lean, elles ont transposé des solutions organisationnelles et structurelles propre au système de production de Toyota, au lieu de considérer plutôt le paradigme de travail, et de développer des solutions adaptées au tissu socio-économique occidental. Pire, selon (Koukoulaki, 2014), certaines entreprises utilisent les mesures du système Lean pour faire uniquement des économies en libérant des ressources, notamment des opérateurs.

Le système réfléchi contourne ces limites par le biais de deux composantes (Ellegard, 1997):

- Un système technique permettant un flux parallèle ;
- Une organisation du travail qui met l'Homme au centre du système en favorisant le développement des compétences par le renforcement de la notion d'apprentissage holiste.

Pour atteindre un flux parallèle, six ateliers parallèles ont été créés dans une usine à Uddevalla. Chaque atelier est composé de quatre groupes de travail qui sont constitués de deux opérateurs et de quatre stations de travail mises en parallèle. Chaque groupe était donc responsable d'assembler un quart de voiture. Les pièces à assembler étaient envoyées en quatre kits d'assemblage préparés selon un système d'information mise en place. Cependant, au début, quelques problèmes sont apparus :

- La variation des temps d'assemblage entre les équipes nécessitait la mise en place d'une zone tampon ;
- Le passage d'une voiture d'un groupe vers un autre impliquait une forte perte d'information générant des problèmes de qualité ;
- Beaucoup de déplacements de voiture d'un atelier vers un autre.

Face à ces problèmes, un réaménagement des ateliers a été fait. Chaque groupe de travail devenait responsable de l'assemblage de toute une voiture, et le flux entre les stations au sein du même atelier est devenu en série, ce qui a permis d'éliminer les déplacements et les zones tampon entre les différents groupes.

Le système de production réfléchi est venu avec une idée totalement opposée aux principes « Fordiste-Tayloristes » et du système Lean. Par conséquent, il est considéré comme un nouveau système-type s'appuyant sur un nouveau paradigme : un flux fortement parallèle et une reconsidération de l'opérateur par le biais d'un travail enrichi. Ceci a impacté positivement la performance. La nouvelle usine mise en place permettait d'assembler une voiture en 32h en comparaison avec l'aménagement classique qui lui donnait un délai de production de 42h (Ellegard, 1997).

En ce qui concerne la qualité, une amélioration de celle-ci est obtenue grâce au travail holiste où l'assemblage se fait en considération de tout le produit. L'enrichissement de la tâche adopté (contrôle qualité, tâche administrative en lien avec le suivi des produits...) a permis de varier la nature des sollicitations au sein d'un poste de travail et limite par conséquent les risques liés au travail hautement répétitif. De plus, les opérateurs sont devenus polyvalents, ce qui a permis de mieux gérer la fluctuation de la force. Le modèle mis en place a également permis de réduire les charges en comparaison avec le système de production de masse, grâce aux économies faites en termes de moyen de production. Le flux en parallèle a ainsi amélioré la flexibilité au travail en éliminant la dépendance entre ateliers. Il est devenu de plus en plus facile de moduler la capacité du système en fermant un atelier en cas de baisse de la demande. Les conditions de travail sont devenues meilleures : les travailleurs au sein de chaque groupe décidaient eux même le moment de recevoir une voiture, ce qui a réduit les contraintes temporelles du travail.

1.6. Systèmes agiles, flexibles et usines du futur

Le passage vers les systèmes réfléchis a marqué les systèmes de production par la complexification des tâches. L'opérateur est devenu un coordinateur de plusieurs stations de travail, ce que (Cheurfa, 2005) a appelé un poste de charge. Cette complexification du travail est rendue possible grâce à l'introduction de nouvelles technologies comme les machines numériques, les robots capables de traiter plusieurs variantes de produits et une technologie de groupes qui s'appuie sur des systèmes d'information en entreprise (Neto et al., 2010), permettant d'avoir une

certaines traçabilités des produits. Ces systèmes sont caractérisés par un aménagement en cellules qui permet de regrouper les ressources traitant la même famille de produits (Figure 3).

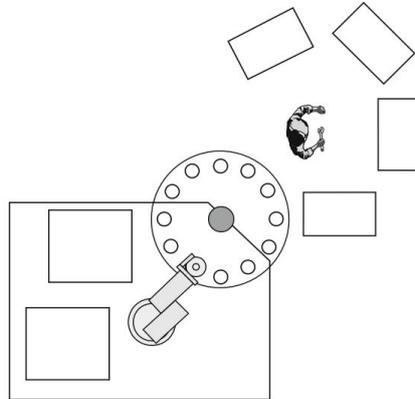


Figure 3 : Cellule de travail à poste unique / poste de charge (C.I.R.P., 2011)

Les cellules dites flexibles utilisent des moyens automatiques et polyvalents de production (robots, centre d'usinage, machines à commande numérique) reliés par un système de transfert de pièces (robots ou convoyeurs) et contrôlés par des ordinateurs et des opérateurs humains (Buzacott and Yao, 1986). Ces systèmes permettent de combiner productivité et flexibilité (Raouf and Ben-Daya, 1995) par l'application des technologies innovantes.

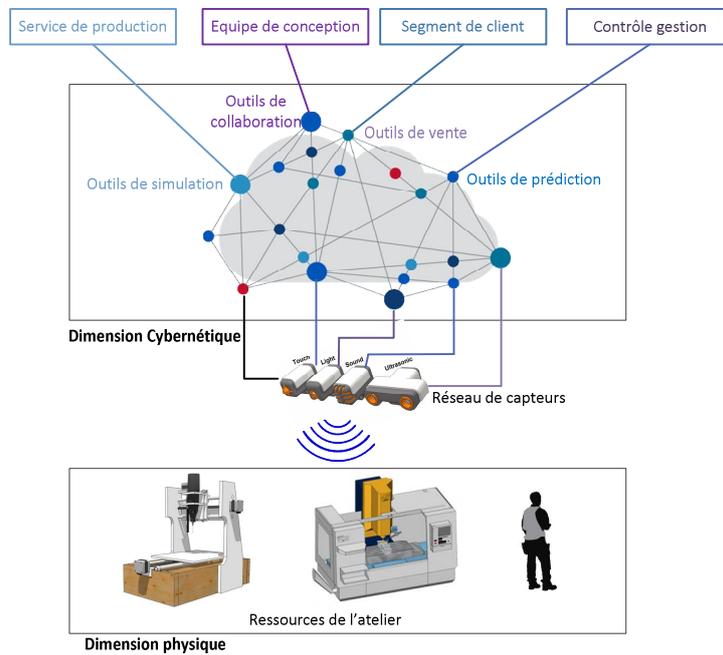


Figure 4 : Système de production cyber-physique.

Par ailleurs, l'application d'autres technologies nouvelles dans le domaine manufacturier a ouvert la voie à l'industrie du futur. Hyper connectée, celle-ci utilise des technologies de communication, de l'industrialisation et de digitalisation pour superviser le système physique de l'usine dite Système de Production Cyber-Physique (Monostori, 2014) (Babiceanu and Chen, 2006). Selon (Babiceanu and Seker, 2016), comme l'illustre la Figure 4, le « Clouding » et le « Big Data » sont deux technologies qui aboutiront à l'usine du futur. Grâce à ces technologies, l'usine est désormais plus agile, réactive et polyvalente. L'opérateur est souvent superviseur d'un ensemble de moyens de production intelligents et dispose d'informations relatives à l'état de système via des terminaux dédiés. Ce paradigme implique un enrichissement de la tâche, cependant, l'agilité du système implique l'augmentation du nombre d'événements à gérer. Si l'interface (informatique et physique) entre l'opérateur et le système n'est pas suffisamment ergonomique, ceci peut éventuellement aboutir à des situations de travail stressantes, avec de la pression temporelle, du manque de visibilité, tous considérés comme des RPS.

1.7. Formulation de la problématique

Cette étude de l'évolution des systèmes de production met en évidence la limite des systèmes de production face à la variabilité de la situation de travail. Les systèmes « Fordiste-Tayloriste » cherchant une productivité soutenue par le biais de la standardisation, de l'optimisation au sens de Taylor, et du cadencement de travail « fordiste » par la mise en place des moyens de transfert, ignorent la réalité complexe de la situation de travail et ses formes de variabilité. Par ailleurs, le travail cadencé et monotone qui devient stressant en cas de variabilité, représente une situation de travail à risque (Lanfranchi and Duveau, 2008).

D'autres part, en cherchant à éliminer des formes de gaspillage, le Lean tend à diminuer voire éliminer les stocks. Ceux-ci ont un rôle majeur dans la désynchronisation entre les postes de travail. Les approches visant à éliminer la variabilité peuvent être incomplètes face à certaines situations de travail. Par conséquent, disposer de moyens de temporisation, notamment des stocks avec un certain niveau, peut être justifié dans le but de réduire les contraintes temporelles entre les postes de travail. Le même constat peut être généralisé pour inclure des activités dites sans valeur ajoutée.

Les aspects en lien avec le paradigme « Tayloriste », « Fordiste » et celui de Toyota persistent encore dans les entreprises d'aujourd'hui. Cependant, le contexte économique d'aujourd'hui est plus contraignant que celui des années 80s : les systèmes de production d'aujourd'hui traitent plusieurs variétés de produit, voire plusieurs options du même produit, la demande est variable avec des délais de production réduits. Le résultat direct d'une telle situation est l'amplification de la variabilité. Garder la même rigidité des systèmes Tayloriste-Fordiste et du Lean, met l'opérateur sous contraintes psychosociales considérables, qui se retrouve à absorber tous les aspects de variabilité.

Le système Réfléchi de Volvo propose une vision totalement différente des paradigmes précédents. Il propose une désynchronisation des groupes de travail pour réduire les contraintes psychosociales de l'organisation, en adoptant un flux parallèle. Il cherche à limiter les tâches répétitives par l'enrichissement du travail. Cependant, les ingénieurs de Volvo adoptèrent une approche totalement empirique basée sur l'essai-expérimentation (Constanze, 2005) pour mettre en place le système de production Réfléchi.

Les retombées de ces situations de travail à risque, sont observables dans les milieux de travail actuels. Selon (Neumann and Medbo, 2009), le coût des maladies professionnelles est estimé à 4% du PIB mondial. Celles-ci affectent la santé des opérateurs mais également la performance des entreprises. L'organisation « Health & Safety Executive » a estimé en 1996, que le stress est responsable de la perte de 6.5 million de journées de travail par an au Royaume-Uni, causant ainsi la perte de près de 350 millions GB£ (HSE, 1999). Aux Etats-Unis, plus de 120 millions de jours de travail sont perdus à cause des maladies professionnelles. En France, 5415 nouveaux cas de maladie professionnelle sont déclarés en 2012 (INRS, 2015), avec un coût de 787 millions d'euros couverts par les contributions sociales.

Il est ainsi important de se doter des modèles et d'outils d'aide à la conception, permettant de concevoir des systèmes qui respectent les limites biomécaniques et psychologiques de l'opérateur, et de s'assurer du niveau de productivité. Ces outils permettront d'étudier des nouvelles formes d'organisation sur lesquelles une connaissance suffisante n'est pas encore atteinte. Ce besoin est encore plus important car les entreprises restent réticentes face à l'approche réfléchie de Volvo de crainte de perte de productivité (Neumann and Medbo, 2009).

Par conséquent, la problématique traitée dans ces travaux de thèse, peut se formuler de la façon suivante : Comment peut-on évaluer la productivité et les conditions de travail dans un système de production ? Un premier point de départ de la thèse a été de considérer le concept de marge de manœuvre. Comme indiqué dans la section 1.2, plusieurs ergonomes lient la genèse de certaines maladies professionnelles, en l'occurrence les TMS, à des déficits de marges de manœuvre dont disposent des opérateurs dans un système de production. Ainsi, les sous problématiques suivantes découlent de l'interrogation principale :

- 1) Qu'est-ce qu'une « marge de manœuvre » ? Ce concept mérite d'être approfondi.
- 2) Comment évaluer les marges de manœuvre dont disposent les opérateurs dans un futur système de production afin d'éviter des situations de travail à risque ?
- 3) Comment combiner cette évaluation avec des critères d'évaluation de productivité ?

Dans ce mémoire de thèse qui se décompose en quatre chapitres et dont la structure est décrite en dessous, des réponses à ces questions sont proposées :

- Le chapitre 2 reprend l'état de l'art concernant la prise en compte des facteurs humains, concernant le concept de marge de manœuvre et la conception des systèmes de production. Un intérêt particulier est accordé à une dimension spécifique de ces marges : marges de manœuvre temporelles. Le but ce chapitre est de bien appréhender le concept, l'intégrer dans une démarche de conception des systèmes de production, tout comme les facteurs humains et leurs effets.
- Le chapitre 3 présente la méthodologie proposée. Il s'agit d'une approche basée sur la simulation. Le chapitre présente également l'outil développé pour réaliser l'évaluation.
- Le chapitre 4 illustre deux cas d'application. Le premier vise évaluer la performance d'un système de production : productivité et marges de manœuvre temporelles. Le deuxième cas d'application vise à étudier l'impact d'instauration de la flexibilité organisationnelle sur les marges de manœuvre temporelle et la productivité du système. A travers ces exemples, l'interaction entre marges de manœuvre, productivité et risques portant atteinte à la santé des opérateurs est mise en évidence. Ce rapport est conclu par un retour critique des travaux effectués au cours de ces trois années de thèse et s'ouvre sur des perspectives détaillant la suite des travaux dans ce domaine.

Chapitre 2 : Etat de l'art

Résumé

Ce chapitre est constitué des briques bibliographiques nécessaires pour le développement d'une proposition par rapport à la problématique introduite dans le chapitre 1. L'étude bibliographique commence par un état de l'art concernant le positionnement de l'Homme dans les systèmes de production. Le long de cette partie, les approches de prévention et en particulier le concept de marge de manœuvre sont introduits. La modélisation des facteurs humains et leurs impacts sur la performance opérationnelle sont également abordés. Dans une deuxième partie, ce chapitre donne un aperçu sur les techniques et les approches pour concevoir un système de production. Le but est de sélectionner une technique permettant d'intégrer le concept de marge de manœuvre dans le processus de conception des systèmes de production.

Par le biais du chapitre introductif, certaines limites du paradigme de travail moderne, qui a gardé certains principes des systèmes Tayloristes, Fordistes et Lean, ont été discutées. La variabilité dans une situation de travail notamment la présence des aspects stochastiques, le traitement de plusieurs modèles, les exigences de réactivité et les facteurs humains ne sont pas compatibles avec la rigidité qui caractérise les systèmes Tayloriste-Fordiste et les systèmes Lean.

En effet, le système Lean a essayé d'apporter des approches pour réduire la variabilité dans les systèmes de production, afin de pouvoir travailler en flux tiré et par conséquent, garder certains principes Tayloristes-Fordistes. Des solutions sociotechniques étaient adoptées, comme la standardisation des modes opératoires. Celle-ci permet de limiter la variation des temps opératoires. La Maîtrise Statistique des Processus était également employée pour identifier les variations aléatoires et les événements singuliers, afin d'identifier les domaines de fonctionnement les plus robustes (Bennett and Edelson, 1998). Le Management Total de la Qualité permet de réduire la variabilité dans la matière première, en adoptant des pratiques de management destinées aux fournisseurs (Dyer, 1996). En ce qui concerne les facteurs humains, le recours à la formation des opérateurs permet de réduire les fluctuations de la force ouvrière, causée par les absences ou les blessures (Rinehart et al., 1997). D'autres techniques qui permettent de lisser le flux au sein du système Lean étaient également employées (Monden, 2011).

Cependant ces méthodes demeurent incomplètes pour éliminer totalement cette variabilité (Engström et al., 1996), devenue de plus en plus présente dans les systèmes de production modernes. Par conséquent, il faut assurer une certaine flexibilité par le biais des « Marges de Manœuvre ». Ces dispositifs permettent une adaptation de la situation de travail et la capacité de l'opérateur, elle aussi variable. Ainsi, les facteurs de risque comme le stress, la monotonie ou le manque de visibilité dans la situation de travail sont limités. De même, une meilleure productivité est assurée par une limitation des situations de blocage.

Pour atteindre cet objectif, ce chapitre apporte les éléments de littérature nécessaires pour construire une approche visant à introduire le concept de marge de manœuvre dans un processus de conception d'un système de production. Ainsi, il est articulé sur deux parties :

- 1) L'Homme dans les systèmes de production : cette partie vise à traiter la littérature concernant la considération des facteurs humains et leurs impacts sur le système de production. Le concept de marge de manœuvre est alors introduit, en s'appuyant sur la littérature du domaine de l'ergonomie.
- 2) Méthodes de conception des systèmes de production : les méthodes et les techniques utilisées durant la conception des systèmes de production sont passées en revue afin d'identifier celles qui sont adaptées à l'étude des marges de manœuvre.

Il est important de noter que l'apport principal de la thèse, réside dans la proposition d'une approche qui marie les deux domaines, souvent traités séparément (Neumann et al., 2006).

2.1. L'Homme dans les systèmes de production

Quand on s'intéresse au positionnement de l'Homme dans un système de production, l'ergonomie et la santé au travail sont les deux aspects qui émergent systématiquement. Le respect des limites biomécaniques et psychosociales de l'opérateur est important pour pouvoir assurer une performance à long terme et par la suite, la pérennité de l'entreprise. L'attrition des opérateurs, la restriction des postes de travail, suite à des maladies professionnelles et la détérioration de l'image de l'entreprise, sont parmi les retombées néfastes du non-respect des critères occupationnels.

Ces critères permettent d'évaluer les conditions de travail au sein d'un poste de charge et d'identifier les situations à risque. Sur ce point, la section suivante présente brièvement ces critères et en particulier leurs limites. Le concept de marge de manœuvre est ensuite présenté comme moyen de prévention complémentaire, permettant d'améliorer les conditions de travail, voir contribuer à la réduction des facteurs de risque et l'amélioration de la productivité opérationnelle.

2.1.1. Prévention contre les risques biomécaniques

Les premiers travaux en termes d'ergonomie et de santé au travail se sont concentrés sur les facteurs de risque biomécaniques (Tableau 1). Des systèmes d'évaluation de la sollicitation mécanique subie par l'opérateur ont été développés, afin d'identifier les seuils d'intensité-fréquence qui représentent un risque sur la santé des travailleurs.

Tableau 1 : Synthèse d'études épidémiologiques qui établit le lien entre facteurs biomécaniques et TMS (Lanfranchi and Duveau, 2008)

	(Putz-Anderson et al., 1997)	(NRC, 2001)	(Hoogendoorn et al., 2000)	(Ariëns et al., 2001)	(Van der Windt et al., 2000)
Cou	<ul style="list-style-type: none"> □ Posture articulaire et / ou statique * Répétition * Effort (40 études sélectionnées) 			<ul style="list-style-type: none"> * Flexion du cou * Vibration dans le bras * Effort et posture du bras * Durée de la position assise * Position articulaire du tronc (40 études) 	

Epaules	* Répétition * Posture articulaire (20 études sélectionnées)				Répétition ⊠ Vibration * Posture articulaire (29 études)
Coude	⊠ Combinaison effort + répétition effort + posture articulaire * effort (20 études sélectionnées)	⊠ Vibration ⊠ Combinaison effort + répétition effort + basse température * Effort * Répétition (42 études sélectionnées)			
Main/poignet, syndrome de canal carpien	⊠ Combinaison effort + répétition effort + posture articulaire * Répétition * Effort * Vibration (30 études sélectionnées)				
Tendinite	⊠ Combinaison de 2 facteurs ou plus * Répétition * Posture articulaire * Effort (8 études sélectionnées)				
Dos	⊠ Manutention manuelle ⊠ Vibration * Charge physique élevée * Posture articulaire (40 études sélectionnées)	⊠ Manutention manuelle ⊠ Vibration ⊠ Posture articulaire ⊠ Charge physique élevée (43 études sélectionnées)	⊠ Manutention manuelle des objets ⊠ Posture articulaire ⊠ Vibration * Maniement des patients * Charge physique élevée (31 études longitudinales)		

Notes : indice fort (⊠), indice moyen (*)

Comme exemples de ces systèmes d'évaluation des sollicitations biomécaniques, peuvent être cités le « Ovako Working posture Analysis System », qui a été développé en se basant sur une classification des postures de travail dans l'industrie de l'acier (Karhu et al., 1977). Le système «Rapid Upper Limb Assessment » a été proposé pour étudier des organisations où des troubles

au niveau des membres supérieurs sont reportés (McAtamney and Corlett, 1993). Quant à l'indice « Occupational Repetitive Actions », il est recommandé par les normes Européennes EN 1005-5 pour évaluer des facteurs de risque en lien avec les Troubles Musculosquelettiques (TMS) associés avec des mouvements répétitifs des membres supérieurs (Occhipinti, 1998). Chaque système d'évaluation est adapté à des sollicitations particulières, d'où cette multitude de systèmes.

Par le biais d'outils avancés, comme les mannequins numériques ou la réalité virtuelle, ces systèmes d'évaluation peuvent être employés pendant les phases de conception pour estimer les sollicitations biomécaniques subies par l'opérateur et détecter les situations à risque. Ceci peut être également fait lors des interventions cliniques pendant la phase d'exploitation d'un système de production (Durand et al., 2007).

Toutefois, (Tuncel et al., 2008) ont revu des interventions basées sur des approches de prévention biomécaniques visant à réduire les TMS. Celles-ci, représentent les maladies professionnelles les plus répondues dans le milieu industriel (European Agency for Safety and Health at Work, 2010). Cependant les résultats de l'étude menée n'étaient pas concluants vis-à-vis l'efficacité de l'approche biomécanique. Par la suite, ils ont mis en exergue l'importance d'une double dimension dans la prévention : physique – psychosociale.

2.1.2. Prévention contre les risques psychosociaux

Dans une étude menée par (Koukoulaki, 2014), différents groupes de facteurs de risque qui peuvent contribuer à la genèse des maladies professionnelles et en particulier les TMS sont considérés : des facteurs physiques et mécaniques, des facteurs organisationnels mais aussi des facteurs de Risque Psychosociaux (RPS), des facteurs individuels et personnels, peuvent être à l'origine des maladies professionnelles.

Tableau 2 : Synthèse d'études épidémiologiques montrant le lien entre les facteurs de risques psychosociaux et le stress (Lanfranchi and Duveau, 2008)

(Bongers et al., 1993) 31 études	(Putz-Anderson et al., 1997) 13 études	(Hoogendoorn et al., 2000) 13 études	(Linton, 2001) 13 études	(NRC, 2001) 59 études
*Monotonie *Support social *Combinaison Support social faible + fortes exigences *Symptômes de stress *Insatisfaction	*Pression temporelle *Charge de travail *Contrôle insuffisant de la situation de travail ⊠ Insatisfaction	⊠ Support social ⊠ Aucune latitude décisionnelle ⊠ Insatisfaction	⊠ Exigence de travail ⊠ Monotonie ⊠ Support social *Contrôle faible de la situation de travail *Pression temporelle ⊠ Insatisfaction	⊠ Exigence du travail ⊠ Pression temporelle ⊠ Monotonie ⊠ Support social *Contrôle insuffisant de la situation de travail ⊠ Stress ⊠ Insatisfaction

Notes : indice fort (⊠), indice moyen (*)

En ce qui concerne les RPS, (Lanfranchi and Duveau, 2008) ont établi une revue de la littérature et ont pu identifier un lien existant entre le stress et les RPS (Tableau 2), et entre les RPS et les TMS (Tableau 3). Comme exemple de ces facteurs de risque, peuvent être cités : un travail monotone, un support social limité, une pression temporelle, une charge de travail relativement élevée, un manque de visibilité dans la situation de travail, des fortes exigences de travail ou la combinaison d'un nombre de ces facteurs de risque.

Tableau 3: Synthèse des études épidémiologiques montrant le lien entre les risques psychosociaux et les TMS (Lanfranchi and Duveau, 2008)

	(Bongers et al., 1993) 28 études sélectionnées	(Putz-Anderson et al., 1997) 17 études sélectionnées	(Van der Windt et al., 2000) 29 études sélectionnées	(Ariëns et al., 2001) 29 études sélectionnées	(NRC, 2001) 28 études sélectionnées	(Bongers et al., 2002) 28 études sélectionnées
Cou	* Monotonie * Pression temporelle * Charge de travail * Combinaison de faible support social + exigences élevées	* Monotonie * Charge de travail * Contrôle sur la situation de travail * Support social		* Exigences du travail * Support social * Latitude décisionnelle		
Epaules	* Symptômes de stress		* Contrôle insuffisant * Monotonie	* Insatisfaction	* Exigences du travail * Stress	* Combinaison d'un contrôle insuffisant + exigences du travail + stress
Coude			* Insatisfaction		* Exigences du travail * Stress	* Combinaison d'exigences de travail + stress
Main/poignet					* Exigences du travail * Stress	* Stress * Exigences du travail * Combinaison exigences + stress

Notes : indice fort (⊠), indice moyen (*)

Contrairement aux facteurs de risques biomécaniques, pour lesquelles, un ensemble de systèmes d'évaluation ont été mis en place afin d'identifier les situations à risque. En ce qui concerne les

RPS, la littérature ne donne pas d'outils équivalents. Selon (Coutarel, 2004), les TMS ou tous autre type de maladies professionnelles ne peut se résumer par une pathologie d'articulation et de tissu biologique. Plusieurs facteurs psychosociaux entrent en jeu. Selon le même auteur, ces maladies reflètent des pathologies d'organisation, des déficits de perception du contrôle de la situation de travail, i.e. des déficits des marges de manœuvre des opérateurs. Ces marges leur permettent de réguler leurs activités, de répondre aux exigences de travail et préserver leurs santés.

2.1.3. Concept de marge de manœuvre

En ce qui concerne la prévention des TMS et en général, des maladies professionnelles, il existe, selon (Coutarel et al., 2005), deux visions. La première considère que les maladies professionnelles résultent d'une exposition à une combinaison des facteurs externes pathogéniques qui peuvent être de nature biomécanique ou psychologique. Les recherches faites dans ce sens visent à évaluer la contribution de chaque facteur dans la genèse des maladies professionnelles. Par conséquent, les approches de prévention basées sur cette vision, consistent à réduire la présence de ces facteurs dans une situation de travail.

La deuxième position considère que la santé au travail est soumise à la subjectivité de l'individu. L'humain, étant un organisme qui déborde de subjectivité, a besoin d'avoir la main sur son environnement de travail, afin de préserver sa santé. Ceci, en le modifiant légèrement et en l'adaptant selon ses propres besoins. Par conséquent, les organisations de travail contraignantes, en termes de planification des tâches, de leurs séquençements et des fois même en termes de gestes de travail, sont incompatibles avec cette nature humaine mais également avec les variations inhérentes à toute situation de travail. Ces deux positions introduites ne sont pas nécessairement en contradiction et peuvent éventuellement se compléter pour assurer une prévention plus efficace (Lanfranchi and Duveau, 2008).

Basé sur la seconde position, le concept de marge de manœuvre a été introduit par plusieurs ergonomes (Caroly et al., 2010). Elle consiste à établir un certain niveau de flexibilité, permettant à l'opérateur de développer ses façons de faire, compatibles avec ses spécifiées et ses besoins, mais également lui donner l'agilité nécessaire pour mieux répondre aux contraintes de travail tout en préservant sa santé (Durand et al., 2011). Ces marges sont observables selon deux dimensions (Tableau 4) : au niveau de l'activité de travail et selon la dimension personnelle du travailleur. En ce qui concerne l'activité de travail, les marges de manœuvre mises en place instaurent de la flexibilité au niveau de la technique de travail, au niveau de l'organisation et de la coopération au sein de l'entreprise. Elles offrent également la possibilité de changer la posture de travail, la position et le cadencement. En tant que concepteur de systèmes de production, nous nous focaliserons sur les marges en lien avec l'activité de travail. Un intérêt particulier est accordé à la dimension temporelle.

Tableau 4 : Dimensions des marges de manœuvre (Durand et al., 2011)

Dimension	Composants
Personnelle	Représentation : <ul style="list-style-type: none"> • Perception de la santé, de la maladie ou de la blessure • Perception du traitement • Perception du travail • Aspiration en termes de performance • Auto-efficacité Capacité : <ul style="list-style-type: none"> • Physique • Cognitive • Adaptation Situation de vie : <ul style="list-style-type: none"> • Support social • Bénéfice socio-économique • Stress familial • Relations interpersonnelles
Activité de travail	Facteurs de risque Ajustement de travail : <ul style="list-style-type: none"> • Flexibilité de la technique de travail • Flexibilité de l'organisation du travail • Management de la pénibilité • Coopération et collaboration entre travailleurs • Ajustement en posture / position • Flexibilité en cadence du travail

Dans (Lanfranchi and Duveau, 2008), un modèle explicatif concernant la genèse des TMS et la contribution des marges de manœuvre dans la prévention est proposé (Figure 5). Il stipule que les situations à risque sont dues à un déséquilibre entre les exigences de travail et la capacité de l'opérateur à y répondre et en particulier, la charge de travail. Ce déséquilibre peut donner lieu par la suite, à du stress et éventuellement des RPS (Tableau 2). Toutefois, il n'existe pas d'étude permettant de valider cette proposition. Par conséquent, elle est prise comme hypothèse principale de ces travaux de thèse :

H1 : Un système de production qui ne met pas à disposition des opérateurs les marges de manœuvre nécessaires pour faire face à la variabilité des situations de travail est un système qui représente des risques pour la santé-sécurité des opérateurs (stress, RPS ...).

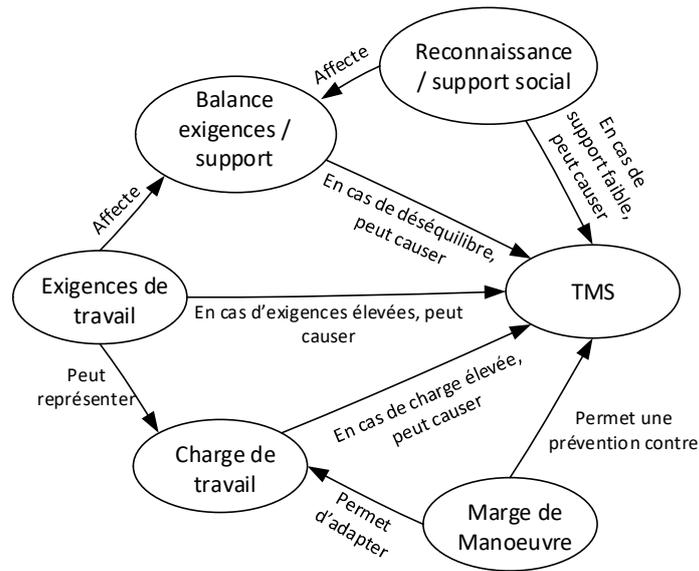


Figure 5 : Relations existantes entre exigences de travail, marges de manœuvre et TMS (Lanfranchi and Duveau, 2008).

En outre, il n'existe pas d'indicateur quantifiable permettant d'évaluer les marges de manœuvre dont dispose un opérateur dans une situation de travail. Disposer d'un tel indicateur peut permettre d'évaluer le risque dans une situation de travail et de repenser la conception d'un poste de travail, ou même la structure globale du système et de son organisation, afin de mettre à disposition des opérateurs, des marges de manœuvre suffisantes pour faire face à des variabilités de la situation de travail. Ce travail de réflexion peut s'effectuer sur plusieurs niveaux, comme le décrit la section suivante.

2.1.4. Allocation des marges de manœuvre

Selon (Coutarel et al., 2005), pour assurer des marges de manœuvre dans un système de production, il est possible d'intervenir à deux niveaux :

- Au niveau de la conception des systèmes de production pour déterminer au plus tôt, les anomalies causées par des défauts de conception, à savoir : des postes surchargés en termes de cadence, d'effort cognitif, afin de repenser la conception et de répartir au mieux les marges de manœuvre sur l'ensemble des postes ;
- Au niveau opérationnel, en mettant un ensemble de dispositifs pour améliorer les marges de manœuvre de l'opérateur (afficheur de cadence, étiquette sur les encours, sur les kanbans, meilleures collaborations entre opérateurs etc.)

En pratique, l'allocation des marges de manœuvre dans les milieux de travail et en particulier dans les systèmes de production se fait souvent pendant la période d'exploitation, par le biais d'approches cliniques d'intervention (Durand et al., 2007), limitant ainsi les possibilités

d'amélioration. En effet, il est plus intéressant de pouvoir agir dès les premières phases de conception d'un système de production afin d'intégrer, dès le départ, les contraintes en lien avec la prévention des maladies professionnelles et notamment, l'allocation des marges de manœuvre. Par conséquent, en ce qui concerne ces travaux de thèse, nous nous focalisons sur le premier niveau d'intervention (la conception).

2.1.5. Intégration des facteurs humains

La section précédente met en évidence l'importance de l'équilibre entre capacité de l'opérateur et les exigences de travail. Ceci permet d'éviter des situations à risque. La capacité de l'opérateur peut varier à cause d'un ensemble de facteurs humains comme la fatigue, l'accoutumance et la motivation. De même, les exigences de travail peuvent fluctuer à cause d'un ensemble d'éléments stochastiques présents dans les situations de travail. Il est indispensable de pouvoir caractériser ces variabilités afin de pouvoir intégrer des marges de manœuvre. Dans cette optique, cette section identifie l'état de l'art en lien avec les facteurs humains et présente des modèles qui permettent de caractériser la variabilité inhérente à l'opérateur. Elle commence par la littérature qui traite la différence au niveau de la performance observée d'un opérateur à un autre. Cette variation interindividuelle est expliquée par le biais de caractéristiques personnelles dites capacité de base. La performance du même opérateur est susceptible de varier elle aussi au cours du temps suite aux phénomènes de fatigue, d'accoutumance et de motivation, à court terme, mais aussi à long terme, par vieillissement.

A. Les capacités élémentaires et leur impact sur la performance de l'opérateur

La compétence peut être considérée comme un résultat d'un ensemble de caractéristiques sous-jacentes de l'individu qui sont en lien de causalité avec sa performance dans une situation spécifique (Spencer and Spencer, 1993). Ces caractéristiques (trait de caractère, connaissance, motif, le concept du soi ...) amènent à un certain comportement dans la réalisation de l'action, ce qui aboutit à une performance. Pour mesurer cette performance, autrement dit, le niveau de compétence d'un travailleur, (Fleishman, 1967) a proposé de considérer des « capacités élémentaires ». Ces capacités sont développées par l'individu le long de sa vie, qui le rendent plus ou moins apte à réaliser une tâche donnée. L'auteur a expérimenté 20 capacités psychomotrices de base pour démontrer l'impact de celles-ci sur la performance des individus. Le Tableau 5 résume ces capacités :

Tableau 5: Capacités élémentaires susceptible d'impacter la performance de l'individu (Fleishman, 1967)

Capacité de base	Signification
Précision de contrôle	C'est une capacité requise par des tâches qui demandent un ajustement musculaire fin et hautement contrôlé, en particulier quand plusieurs groupes musculaires sont impliqués. Cette capacité devient plus critique lorsqu'il faut

	fournir de la rapidité dans le contrôle.
Coordination des membres	Cette capacité relève la prédisposition de l'individu à coordonner plusieurs membres simultanément (utilisation de plusieurs pédales, leviers ...).
Orientation de la réponse	Capacité de réagir à une discrimination visuelle dans des tâches qui demande une discrimination directionnelle et d'orientation du mouvement. Cela inclut la capacité à sélectionner le mouvement correct face à un stimulus donné.
Temps de réaction	Elle représente la rapidité avec laquelle l'individu est capable de répondre à un stimulus quand il apparaît. Des indicateurs démontrent que cette capacité de base ne dépend pas de la nature du stimulus (auditoire au visuel), ni de la nature de la réponse à fournir. Cependant, quand il faut effectuer un choix alternatif, ceci implique d'autres capacités.
Vitesse de mouvement des bras	Représente la rapidité avec laquelle l'individu peut faire un gros, mouvement de bras sans grande précision. Le temps de réaction est considéré comme une capacité de base particulière.
Taux de contrôle	Elle représente la capacité à ajuster d'une manière continue un contrôle en considérant la vitesse et la direction.
Dextérité manuelle	Concerne la capacité à bien utiliser ses mains et bras dans la manipulation des objets larges sous certaines conditions de vitesse.
Dextérité des doigts	Concerne la capacité de réaliser des manipulations contrôlées relatives à des petits objets en utilisant principalement les doigts.
Fermeté main-bras	Représente la capacité de l'individu à réaliser des mouvements de mains et bras précis et des mouvements de positionnement dans lesquels la force et la vitesse sont minimales.
Vitesse poignet-doigts	Concerne la vitesse avec laquelle l'individu peut faire un mouvement avec le doigt ou le poignet. Des tâches qui demandent l'utilisation des claviers peuvent être significativement impactées par cette capacité.
Viser	Capacité à effectuer un mouvement qui vise une cible donnée avec une vitesse donnée.
Souplesse statique	Capacité de faire fléchir au maximum possible le tronc ou le dos. Toutes les directions sont ici considérées.
Souplesse dynamique	Capacité de faire fléchir le tronc et le dos d'une manière répétitive avec une certaine vitesse et de résister à la fatigue musculaire accompagnée par ce mouvement.
Force statique	La force statique maximale que l'individu peut fournir.
Force dynamique	Capacité à fournir une force musculaire d'une manière répétitive et continue. Demande une endurance musculaire et une résistance à la fatigue.

Puissance	Capacité à générer le maximum d'énergie dans une seule action ou dans une série d'actions.
Force du tronc	Capacité à fournir une force dynamique spécifique aux muscles du tronc, en particulier les muscles abdominaux.
Grosse coordination du corps	Capacité à coordonner les différents membres lors d'un gros mouvement du corps.
Equilibre du corps	Capacité de l'individu à maintenir l'équilibre de son corps sous l'effet de forces déséquilibrantes.
Endurance cardio-vasculaire	Capacité à fournir le maximum effort pendant une période prolongée.

La plupart de ces capacités motrices sont physiques. Cependant, il est tout à fait possible d'étendre ce modèle en considérant des capacités élémentaires cognitives comme la « Prise de choix multiples » ou « la capacité de mémorisation ». En se basant sur ces capacités, qui représentent des caractéristiques individuelles, il est possible d'évaluer la performance d'un individu et le différencier d'un autre. Il est aussi possible de mesurer l'adéquation entre l'individu et la tâche à réaliser.

Face à une tâche donnée, la performance d'un individu est différente d'un autre en considérant les caractéristiques évoquées en-dessus. De même et pour un individu donné, la performance est guère stable dans le temps. Elle est susceptible de varier suite à l'exposition à des facteurs du stress. La fatigue, la motivation, l'accoutumance et le vieillissement sont des phénomènes (mécanisme d'exposition à un facteur de stress, création d'une tension, impact sur le comportement) traités dans la littérature et qui peuvent impacter la performance de l'opérateur.

B. Phénomène de fatigue

La fatigue se manifeste selon une multitude de dimensions : le manque d'énergie, la somnolence, le malaise physique et la démotivation peuvent indiquer un état de fatigue excessif (Jaber et al., 2013). La fatigue est le résultat naturel causé par :

- La dépense d'énergie et la présence des facteurs de stress de nature physiques tels que l'application des forces, les déplacements, les postures lors de la réalisation du travail ;
- La présence de facteurs de stress mentaux tels que la monotonie, l'anxiété et l'observation visuelle ;
- La présence de facteurs de stress liés à l'environnement de travail tel que la température, l'humidité et la présence du bruit. Ces facteurs de stress sont donnés en détail dans le Tableau 6.

Plusieurs modèles décrivant l'évolution de la fatigue ont été proposés. Certains modèles dits énergétiques prédisent l'évolution de la fatigue en fonction de l'énergie dépensée par le

travailleur. Les modèles musculaires, dynamiques ou statiques décrivent l'évolution de la fatigue en fonction de l'intensité de la force fournie et sa durée. D'autres modèles exploitent la fréquence cardiaque pour décrire l'état de l'opérateur.

Tableau 6: Facteurs de stress causant la fatigue (Kanawaty and International Labour Office, 1992)

Tension physique due à la nature et au contenu du travail	Tension mentale due à la nature et au contenu du travail	Tension physique et mentale due à l'environnement du travail
<ul style="list-style-type: none"> • Force • Posture • Vibration • Nature du cycle • Habillage restrictif 	<ul style="list-style-type: none"> • Concentration/anxiété • Monotonie • Tension visuelle 	<ul style="list-style-type: none"> • Température et humidité • Ventilation • Fumée • Poussière • Présence de saletés • Environnement mouillé et trempé • Bruit

L'équation (2) donne un exemple de modèle énergétique proposé par (Murrell, 1965), où R est le pourcentage du temps de récupération dans le temps total de travail. B est la dépense énergétique en kcal/min. S_t est la dépense énergétique standard dans le travail. Elle est égale approximativement à 5 kcal/min pour un homme (4.2 kcal/min pour une femme). S_r est la dépense énergétique moyenne en repos et égale approximativement à 1.5 (kcal/min).

$$R = \frac{B - S_t}{B - S_r} \quad (2)$$

Pour calculer la dépense énergétique B , (Garg et al., 1978) propose la formule suivante :

$$\bar{E}_{job} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{pos-i} \cdot t_i + \sum_{i=1}^m E_{mov-i}}{T} \quad (3)$$

\bar{E}_{job} est la dépense énergétique moyenne par activité, E_{pos-i} est la dépense énergétique due au maintien de la position i pendant la durée t_i , E_{mov-i} est la dépense énergétique due au mouvement i . T est la durée totale de l'exécution, n est le nombre des postures et m est le nombre de mouvement réalisés pendant l'activité. E_{pos-i} (kcal/min) est égale à $0.023 \times BW$ pour la position assise, $0.024 \times BW$ pour la position debout, et égale à $0.028 \times BW$ en position courbée. BW est le poids du corps calculé en kg. Pour le calcul des E_{mov-i} , (Garg et al., 1978) proposent des formules pour la calculer en fonction du type du mouvement.

Les modèles statiques de la fatigue musculaire sont de la forme donnée par les équations (4) et (5) (El ahrache et al., 2006):

$$TEM = A \cdot f^{-\alpha} \quad (4)$$

$$TEM = B.e^{-\beta \cdot f} \quad (5)$$

Avec TEM est le Temps d'Endurance Maximal, qui représente le temps maximal pour fournir un effort mesuré par une fraction f de la Contraction Volontaire Maximale (CVM). A , B , α et β sont des paramètres du modèle et dépendent du groupe musculaire engagé comme illustré dans le *Tableau 7*.

Tableau 7: Exemples de modèles statiques de la fatigue musculaire

Type de modèle	Expression	Auteur
Général	$TEM = -1.5 + \frac{2.1}{f.CVM} - \frac{0.6}{f.CVM^2} + \frac{0.1}{f.CVM^3}$	(Rohmert, 1960)
	$TEM = 0.4167 \times (f.CVM - 0.14)^{-2.4}$	(Monod and Scherrer, 1965)
	$TEM = 0.3802 \times (f.CVM - 0.04)^{-1.44}$	(Sato et al., 1984)
Epaules	$TEM = 40.6094 \cdot e^{(-9.7 \times f.CVM)}$	(Erik Mathiassen and Åhsberg, 1999)
	$TEM = 0.5618 \times f.CVM^{-1.7551}$	(Garg et al., 2002)
Coude	$TEM = 20.6 \times e^{(-6.04 \times f.CVM)}$	(Rose et al., 2000)
	$TEM = 0.195 \times f.CVM^{-2.52}$	(Sato et al., 1984)

En ce qui concernent les modèles dynamiques, les équations (6) et (7) décrivent un modèle proposé par (Ma et al., 2015). Le paramètre $F_{cem}(N)$ représente la capacité motrice à l'instant t , $F_{load}(N)$ est la charge à l'instant t , k (min^{-1}) et R (min^{-1}) sont respectivement le taux de fatigue et de récupération.

$$\frac{dF_{cem}}{dt} = -k \cdot \frac{F_{cem}}{CVM} \cdot F_{load} \quad (6)$$

$$\frac{dF_{cem}}{dt} = R(CVM - F_{cem}) \quad (7)$$

Dans (Jaber et al., 2013), la fatigue est modélisée par une distribution exponentielle donnée par (8) et (9) :

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (8)$$

$$R(\tau_i) = F(t) e^{-\mu \cdot \tau_i} \quad (9)$$

Les paramètres λ et μ sont respectivement le taux de fatigue et de récupération, τ_i est la durée de pause, $R(\tau_i)$ est la fatigue résiduelle. Les paramètres λ et μ sont déterminés à partir des conditions de travail et les facteurs du stress présents, physiques, mentaux et ceux qui sont en lien avec l'environnement (voir *Tableau 6*).

Les modèles présentés au-dessus sont empiriques. Par conséquent, le choix d'un type de modèle dépend de son domaine de validité et en particulier, la situation à étudier. Par exemple, certains modèles énergétiques proposés dans la littérature prennent comme paramètre l'âge de l'opérateur. Ils ne peuvent pas être employés que pour une tranche d'âge sur laquelle la détermination empirique du modèle a été effectuée.

Cependant, ces modèles concernent des activités composées d'une seule tâche. Il n'existe pas dans la littérature des modèles qui prévoient la variation de la fatigue en changement de tâches, en particulier par le biais de rotations. Des travaux précédents, notamment (Michalos et al., 2013) considèrent une remise à 0 de l'indice de fatigue lorsqu'une rotation est réalisée. Cependant, elles sont rares les tâches qui sont disjointes en termes de sollicitations générant de la fatigue via une dimension donnée. Selon (Becker et al., 1996), un degré de similarité entre tâches impactant la variation de la fatigue doit être considéré.

C. Accoutumance

La courbe d'apprentissage est étudiée par de nombreux chercheurs dans différentes disciplines, notamment en ergonomie, en psychologie et en ingénierie industrielle. La notion d'apprentissage révèle un facteur humain qui englobe plusieurs dimensions : l'acquisition de la connaissance mais également l'acquisition des réflexes et de la rapidité dans le mouvement.

Plusieurs modèles ont été proposés, notamment le modèle de Wright (Wright, 1936), le modèle d'Apprentissage-Oubli-Réapprentissage de (Carlson and Row, 1976) et le Modèle Courbe d'Apprentissage-Oubli (MCAO) introduit par (Jaber and Bonney, 1997), qui représente une extension du modèle de Wright. Selon (Jaber et al., 2013), le modèle MCAO a été testé sur plusieurs cas pratiques et représente une bonne approximation des temps opératoires réels pour une large gamme de tâches. Ce modèle est décrit par les équations de (10) à (14) :

$$T_n = T_1(u_i + n_i)^{-b} \quad (10)$$

T_{ni} est le temps opératoire nécessaire pour produire n_i unités durant le cycle i . Le paramètre b est calculé en utilisant (11) :

$$b = - \frac{\log(LR)}{\log(2)} \quad (11)$$

LR est le taux d'accoutumance mesuré en pourcentage. Le terme u_i désigne l'expérience mesurée par le nombre entier représentant le nombre de répétitions mémorisées. Il diminue si l'opérateur s'arrête de travailler. Il est donné par (12) :

$$u_{i+1} = (u_i + n_i)^{1+f_i/b} (u_i + n_i + s_i)^{-f_i/b} \quad (12)$$

Initialement, $u(i=1)=u_i=0$. Le terme s_i représente le nombre d'unités qui pourraient être produites durant le cycle i s'il n'y a pas d'arrêt entre les cycles. Le paramètre f_i représente le taux d'oubli. s_i et f_i sont respectivement donnés par (13) et (14) :

$$s_i = \left[\frac{1-b}{T_1} \tau_i + (u_i + n_i)^{1-b} \right]^{1/(1-b)} - (u_i + n_i) \quad (13)$$

$$f_i = \frac{b(1-b)\log(u_i+n_i)}{\log(1+B/t(u_i+n_i))} \quad (14)$$

Le terme τ_i désigne la durée de la pause à la fin du cycle i . B est le temps de l'oubli total ($\tau_i \leq B$), $t(u_i+n_i)$ correspond au temps nécessaire pour produire u_i+n_i unités d'une manière continue.

D. Motivation

L'importance du management émotionnel dans les milieux de travail est de plus en plus reconnu (Ashkanasy, 2002). Cependant, selon (Game, 2007), la lassitude au travail reste un sujet insuffisamment traité dans la littérature. La lassitude peut être définie comme étant un état transitoire indésirable pendant lequel, le travailleur ressent un désintérêt vis-à-vis de son activité de travail (Fisherl, 1993). Elle est souvent accompagnée d'un sentiment d'irritation, d'agitation et le désir du changement de situation vers une autre plus intéressante. Elle peut avoir plusieurs impacts sur le milieu de travail, notamment l'absentéisme, la détérioration de la performance, le malaise au travail et même des accidents de travail (Azizi et al., 2010). Traditionnellement, il est reconnu que la lassitude est causée par des facteurs externes comme des tâches monotones, répétitives et non stimulantes. Cependant, des travaux récents montrent que la motivation peut varier d'une manière significative entre individus réalisant la même tâche (Azizi et al., 2010). Ces études démontrent également que la lassitude dépend de facteurs situationnels (Farmer and Sundberg, 1986).

Selon (Treville and Antonakis, 2006), la motivation peut être intrinsèque : le travailleur fourni plus d'effort grâce à la nature de la tâche elle-même, par pur intérêt. Comme elle peut être extrinsèque : le travailleur fournit l'effort nécessaire à la réalisation de la tâche en raison de facteurs externes, pour quelque forme de récompense ou pour éviter des pénalités. En ce qui concerne la motivation intrinsèque, différents modèles sont proposés. Des modèles théoriques comme la « théorie de la définition des objectifs » (Latham and Locke, 1991), la « théorie de réalisation » (Atkinson et al., 1960), et le « modèle des caractéristiques d'activité » (Hackman and Lawler, 1971) ont ainsi été développés.

Selon « la théorie de la définition des objectifs » le mécanisme de motivation-lassitude est expliqué par :

- La nature des objectifs de travail fixés par l'organisation (quels objectifs, leurs valeurs ou leurs intensités et sur quelles périodes) ;
- L'engagement du travailleur ;
- L'auto-gestion en termes de connaissances et de stratégie à partir de la perception de la situation de travail.

La théorie de la réalisation mesure la motivation par le biais du motif, l'espérance de la réussite et les incitatifs. Le modèle de caractéristiques d'activité mesure la motivation en considérant cinq dimensions : la variété des compétences requises par la réalisation du travail, l'identification de la tâche (visibilité de la contribution de la tâche dans le produit, ou dans le service), la signification de la tâche (importance), l'autonomie et la nature de retour obtenu à la réalisation de la tâche.

Pour modéliser la motivation, (Azizi et al., 2010) ont proposé un modèle exponentiel décrivant la variation du score de motivation. Ils considèrent que celle-ci commence à augmenter lorsque le travailleur change de tâche et commence à décroître après un certain temps comme le décrivent les équations (15), (16) et (17). Cependant, ce modèle ne considère nullement les caractéristiques de la tâche et part du principe que les tâches sont totalement différentes, ce qui n'est pas toujours vrai.

$$\begin{cases} M_{w,k+1}(t) = M^{max} - (M^{max} - M_{w,k}(t_{k+1})) \cdot e^{-\sigma_w \cdot (t-t_{k+1})} \\ M_{w,k+1}(t) = M^{UB} \text{ si } M_{w,k+1}(t) \geq M^{UB} / M^{UB} = M^{max} - \delta_1 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} M_{w,k+1}(t) = M_{w,k+1}(t_{w,k+1}^c) \cdot e^{-\theta_w \cdot (t-t_{mcd})} \\ M_{w,k+1}(t) = M^{LB} \text{ si } M_{w,k+1}(t) \leq M^{LB} / M^{LB} = M^{min} + \delta_2 \end{cases} \quad (16)$$

$$t_{mcd} = \max(t_{w,k+1}^c, D_{w,k+1} + t_{k+1}) \quad (17)$$

Ainsi, l'équation (15) décrit une variation exponentielle de la motivation à partir de la valeur $M_{w,k}(t_{k+1})$ qui désigne la motivation du travailleur w à l'instant t_{k+1} où le changement de la tâche k vers la tâche $k+1$ s'effectue. $M_{w,k+1}(t)$ désigne la motivation à l'instant t (actuel) qu'éprouve l'opérateur en étant sur la tâche $k+1$. Le paramètre σ_k désigne le taux d'augmentation de la motivation qui est considéré dépendant uniquement de l'opérateur. M^{max} est la motivation maximale théorique et M^{UB} est sa limite supérieure à partir de laquelle la motivation est considérée maximale. De même, la lassitude varie de la même façon, d'une manière exponentielle comme le montre l'équation (16) avec un taux θ_w , où le score de motivation commence à décroître (sans dépasser une limite inférieure M^{LB}) à partir de l'instant t_{mcd} , donné par (17). Le paramètre $t_{w,k+1}^c$ correspond au moment où la motivation atteint la limite supérieure M^{UB} . $D_{w,k+1}$ correspond à la durée nécessaire pour que la motivation atteigne M^{UB} en commençant par la valeur M^{LB} .

Le modèle proposé par (Azizi et al., 2010) représente le seul travail trouvé dans la littérature qui cherche à intégrer le facteur motivation. Les auteurs de l'article proposent une approche de planification des rotations qui tiennent compte de ce facteur. Cependant, le modèle ne considère pas les caractéristiques des tâches ni leurs similitudes, comme proposé dans les modèles théoriques de la motivation. Les caractéristiques de l'opérateur ne sont pas, non plus, prises en considération. Il est donc nécessaire d'améliorer ce modèle en considérant le travail théorique antérieur qui a porté sur la caractérisation de la motivation afin de mieux l'intégrer dans l'étude de la variabilité issue de l'opérateur.

Après avoir présenté l'état de l'art en lien avec les modèles de fatigue, de l'accoutumance et de la motivation, qui représentent des facteurs humains générateurs de la variabilité dans une situation de travail, la section suivante aborde la littérature en lien avec l'âge et son effet sur la performance de l'opérateur.

E. Vieillessement

Le vieillissement implique un déclin au niveau physiologique, physique et perceptuel, un déclin en capacité comme la force, la dextérité et l'endurance. Le Tableau 8 résume les résultats majeurs qui décrivent l'impact du vieillissement sur les capacités physiques de l'opérateur. Pour modéliser l'impact de l'âge sur la performance de l'opérateur, (Boenzi et al., 2015) ont considéré deux fonctions ρ et φ qui linéarisent le Tableau 8.

Tableau 8: Vieillessement et variation de la performance physique (Boenzi et al., 2015)

Domaine	Variation de la performance
Force musculaire	Atteint son apogée (100%) entre 25 et 30 ans. A l'âge de 40 ans ça baisse à 95%, puis à 85% à l'âge de 50 ans et à 75% à l'âge de 65 ans (Viitasalo et al., 1985) (Aoyagi and Shephard, 1992) (de Zwart et al., 1995) (Gall and Parkhouse, 2004).
Actions dynamiques avec force	Décline de 10% de plus par rapport au déclin de la force musculaire entre 20-80 ans (Kenny et al., 2008).
Endurance	<ul style="list-style-type: none"> • 10% de perte par décennie. Dans le travail cadencé avec machine industrielle, la cadence standard demande 80% de la capacité acrobatique soutenue d'un quarantenaire (Shephard, 1999). • Elle atteint son apogée dans la vingtaine, et commence à décroître de 1% par an (de Zwart et al., 1995). • A l'âge de 65 ans, elle représente 70% d'un âgé de 25 ans (Kowalski-Trakofler et al., 2005). • Elle décroît par 5-10% par décennie après l'âge de 25 ans, de 10-15% par décennie après 40 ans (Heath et al., 1981). • A l'âge 40 ans la sortie cardiaque est 95% de celle d'un âgé de 30 (Goldich, 1995).
Temps de réaction	Les personnes âgés de 66 ans ou plus sont 30% plus lents que celles

	dont l'âge est entre 18-30 ans (Tolin and Simon, 1968).
--	---

La fonction ρ représente le coefficient de réaction, et φ qui représente le facteur d'endurance. Ces deux fonctions affectent d'une manière multiplicative, le temps opératoire dit dynamique : influencé par les facteurs humains, en opposition avec le temps statique ou technique qui demeure inchangeable. Ces deux fonctions dépendent de l'âge de l'opérateur.

F. Fiabilité d'opérateur

L'un des impacts des facteurs humains mis en exergue dans la section précédente est l'occurrence d'erreurs. Celles-ci causent des imperfections au niveau du produit et affectent la qualité de production. Elles ont donc un impact significatif sur la performance du système. Selon (Akinçi et al., 2006), 50% des retouches réalisées sur des produits défectueux sont liés à des erreurs humaines. Par conséquent, l'Évaluation de la Fiabilité Humaine (EFH) traite de la probabilité d'une erreur humaine dans un système et met à disposition de l'analyste les outils nécessaires pour la gérer. Selon (Kirwan, 1996), l'EFH a trois fonctions principales :

- L'identification de l'erreur humaine, évaluation de sa probabilité en calculant la Probabilité d'Erreur Humaine (PEH) ;
- La réduction de son occurrence, si la PEH est considérée trop élevée.

D'une manière générale, la PEH dépend de la capacité de l'opérateur, de son expérience, de la nature de la tâche et de l'environnement de travail (Michalos et al., 2013). Dans (Givi et al., 2015), la PEH est modélisée en considérant la fatigue et l'accoutumance selon l'expression suivante :

$$PEH = (w_1 \cdot F + w_2 \frac{T_m}{T_1})^\alpha \quad (18)$$

Le paramètre T_m est le temps nécessaire pour réaliser le cycle i (calculé en utilisant (10)), T_1 est le temps opératoire de la première réalisation (sans aucune expérience), $F(t)$ est l'index de fatigue (donné par (8)). Le paramètre w_1 (w_2) est le facteur d'impact de la fatigue (d'accoutumance) sur l'occurrence de l'erreur. Le paramètre α sert pour la mise en échelle de la PEH, étant donnée qu'elle varie de 10^{-6} à 1 (Elmaraghy et al., 2008). Il dépend de la difficulté de celle-ci à être réalisée avec succès. Il est considéré dépendant uniquement de la tâche.

Pour déterminer les paramètres de PEH (w_1 , w_2 et α), (Di Pasquale et al., 2015) a proposé de faire un calibrage du modèle mathématique de l'erreur à base des Techniques de Qualification de la Fiabilité Humaine. Un intérêt particulier est donné à la Technique d'Évaluation et de Réduction d'Erreur Humaine (TEREH) (Kirwan, 1996). C'est une technique flexible et adaptée à une grande variété de tâches. La Figure 6 décrit les différentes étapes de la méthode TEREH.



Figure 6 : Processus de la méthode TEREH.

La première étape consiste à identifier la classe générique à laquelle appartient la tâche étudiée. Le Tableau 9 donne quelques classes proposées par la méthode TEREH et les probabilités d'erreur nominale PEH_n associées.

Tableau 9 : Aperçu de la classification générique des tâches proposée par TEREH.

Tâche générique	Probabilité d'erreur nominale proposée (limites entre 5 ^{ème} -95 ^{ème} quartile)
(A) Tâche non usuelle, réalisée en cadence modérée sans crainte de conséquences sur le système.	0.55 (0.35-0.97)
(B) Changement ou restauration du système vers un état nouveau sans procédures ni supervision.	0.26 (0.14-0.42)
(C) Une tâche complexe qui nécessite un haut niveau de compréhension et de compétences.	0.16 (0.12-0.28)
(D) Simple tâche réalisée rapidement ou avec peu d'attention.	0.09 (0.06-0.13)
(E) Tâche routinière, suffisamment pratiquée, tâche rapide qui ne demande pas des compétences élevées.	0.02 (0.007-0.045)
(F) Changement ou restauration du système vers un état nouveau avec procédures et quelques supervisions.	0.003 (0.008-0.007)

La deuxième étape consiste à spécifier si des Conditions Productrices d'Erreurs (CPE) (Tableau 10) sont présentes dans la situation de travail. Si oui, celles-ci viennent amplifier la probabilité d'erreur comme exprimé dans l'équation (19) :

$$HEP = \left(\prod_i [(s_i - 1) \cdot d + 1] \right) \cdot HEP_n \tag{19}$$

Avec s_i le multiplicateur associé à chaque CPE_i (voir Tableau 10), et d la proportion de la CPE ($0 < d \leq 1$).

Tableau 10 : Aperçu de quelques conditions productrices d'erreurs proposées par la méthode TEREH

Conditions Productrice d'Erreur CPE	Le changement nominal maximal de la probabilité d'erreur
Situations non-usuelles nouvel ou pas fréquente	×17
Besoin de renoncer à une technique et l'application d'une autre qui demande une philosophie opposée	×6
Opérateur non expérimenté	×3

Lorsque PEH_n et plusieurs points HEP sont identifiés, un calibrage entre le modèle mathématique donné par l'équation (18) et les points empiriques donnés par la méthode TEREH peut se faire pour trouver les valeurs associées aux paramètres du modèle proposé.

Après avoir présenté l'état de l'art en lien avec les facteurs humains et les marges de manœuvre, la section suivante traite de l'état de l'art en lien avec la conception des systèmes de production. Comme évoqué au début de ce chapitre, l'objectif derrière cette deuxième partie est de rapprocher ces deux domaines afin d'avoir une meilleure appréhension des facteurs humains, notamment la réduction des facteurs de risque par l'intégration des marges de manœuvre. Ceci, tout en assurant la performance productique exigée des systèmes de production modernes.

2. Conception des systèmes de production

Comme tout système, afin d'assurer une performance satisfaisante qui réponde aux exigences productiques mais également en termes de prévention des maladies professionnelles, une phase conceptuelle permettant de déterminer la structure du futur système ou de valider un futur changement est requise. Un système de production peut être défini selon ses trois dimensions :

- 1) Composition : on peut distinguer deux types de composante, les entités fixes et les entités mobiles ;
- 2) Aménagement : il s'agit de position spatiale des entités fixes ;
- 3) Organisation : c'est l'affectation des postes de charges aux opérateurs (Cheurfa, 2005).

En partant des spécifications du produit, formalisées en dessins de définition fournis par le bureau d'étude chargé de la conception, le bureau de méthodes établit les opérations de fabrication et d'assemblage et les spécifications nécessaires à leur réalisation. Ces opérations permettent de déduire les ressources nécessaires pour la réalisation du produit (Figure 7).

Comme l'illustre la Figure 7, après avoir déterminé les ressources nécessaires, une étude économique est établie pour valider la rentabilité du système en considérant les coûts d'exploitation et l'amortissement de l'investissement. L'étape suivante consiste à étudier l'agencement. Etant donné que la structure de système est bien définie à ce stade, une étude des aspects dynamiques est à faire afin de déterminer les niveaux de stocks, le nombre de kanbans,

de palettes ou de chariots en circulation, la vitesse des convoyeurs et les temps standards. Ces paramètres dépendent du flux physique et sa dynamique.

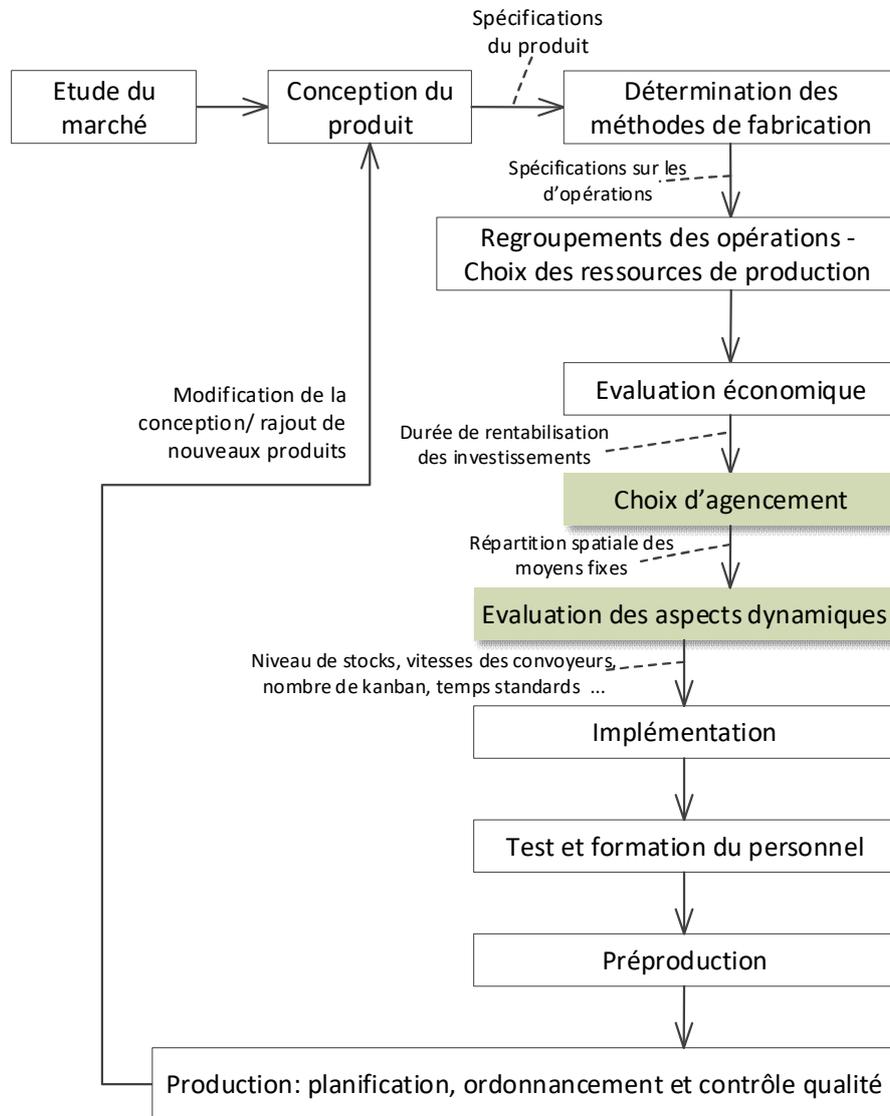


Figure 7 : Etapes de mise en place d'un système de production (Rodde, 1989).

L'étude des marges de manœuvre est liée à la variabilité, donc à la dynamique du système, ainsi qu'à la structure globale (composition et aménagement) qui impacte sa propagation. Par conséquent, dans ces travaux de thèse on se focalise sur ces trois étapes : le regroupement des opérations, l'agencement et l'étude de la dynamique du flux physique.

Lorsque l'aménagement et les paramètres des composants en lien avec les aspects dynamiques sont déterminés, l'implémentation physique du système est faite par la suite. Des tests de fabrication sont réalisés et la formation du personnel est faite. Une pré-production dans les conditions réelles est nécessaire pour observer le comportement du système. S'il s'avère que le

système respecte les exigences fonctionnelles du cahier des charges, la vraie phase de production peut débuter.

Dans le cas où des changements sont à apporter au système, suite à la modification d'un ou plusieurs modèles de produit, achat d'une nouvelle ressource ou modification du procédé de fabrication, le processus est repris pour réadapter la structure.

A la lumière de ce processus de conception qui vient d'être présenté, cette deuxième partie de ce livrable, commence par introduire les différentes architectures et aménagements types d'un système de production. Dans la suite, les techniques permettant de spécifier ou d'analyser une architecture donnée sont présentées. Elle se termine par la problématique de l'analyse de la performance et en particulier la construction d'indicateurs de performance permettant de juger entre deux architectures candidates.

2.2.1. Architectures des systèmes de production

En fonction de la variété, complexité des produits, ainsi que de la taille des séries, un aménagement avec une architecture spécifique peut être choisie. L'étape suivante consiste à utiliser une technique pour dimensionner l'architecture type choisie : nombre de postes et définition de leurs tâches. Dans cette section, les architectures types des systèmes de production sont brièvement présentées telles que : l'aménagement linéaire, l'aménagement en cellules fonctionnelles et l'aménagement en îlots. Le but est de mettre en exergue leurs caractéristiques respectives et en particulier, leurs comportements face aux variabilités.

A. Aménagement linéaire

L'aménagement linéaire est un agencement où chaque produit dans sa transformation utilise l'ensemble des ressources (regroupées en stations) dans le même ordre causant un flux linéaire. Le transfert entre les stations est souvent fait par le biais de convoyeurs (Rekiek and Delchambre, 2006), d'une manière synchrone ou asynchrone. Il est plus adapté pour une production de masse, peu diversifiée, avec un volume de production stable et peu d'encours (Figure 8).

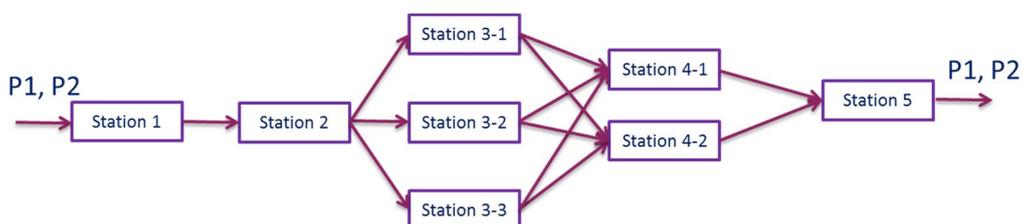


Figure 8 : Agencement linéaire (flow-shop).

Pour que cet agencement puisse fonctionner efficacement, il est important d'équilibrer la ligne afin de minimiser les encours. Ceci permet de minimiser les temps d'arrêts structurels et de

répartir la charge de travail entre les stations. Ce type de problème est dit « Problème Equilibrage de Ligne d'Assemblage Simple » (PELAS) (Scholl and Becker, 2006) ou Agencement Logique lorsqu'il s'agit de répartir des ressources (notamment des machines d'usinage et des convoyeurs) sur une ligne de production (Belmokhtar et al., 2006).

Ce type d'agencement permet d'avoir une manutention et un transfert du flux physique simple par rapport aux autres architectures. Son grand désavantage se situe dans sa rigidité : un arrêt dans une station cause l'arrêt total la ligne. En ce qui concerne les conditions de travail, cet agencement abouti à des tâches monotones et répétitives (Naseer et al., 2009).

Pour remédier à ces limites, il existe trois déclinaisons de l'architecture linéaire : la première consiste à mettre en parallèle certaines stations de travail afin d'avoir un flux parallèle. La deuxième consiste à mettre en place une architecture dite « arête de poisson » générant un flux croisé (Figure 9). La dernière déclinaison est une architecture en U.

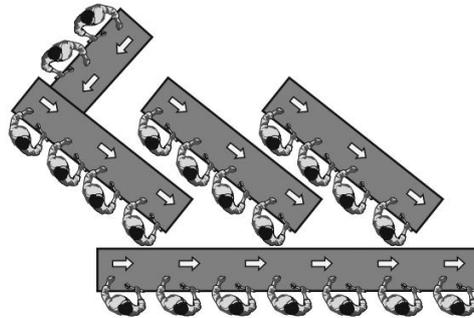


Figure 9 : Architecture en arête de poisson (C.I.R.P., 2011).

Mettre en parallèle deux stations est nécessaire quand le temps opératoire de celle-ci dépasse le temps de cycle. Cette solution permet également d'avoir une meilleure robustesse du système face à la variabilité (possibilité d'arrêt sans rupture de flux). Cependant, ceci complexifie le flux physique et la manutention. L'architecture en arête de poisson permet de mieux absorber la variabilité du système (Constanze, 2005). Elle est plus adaptée pour des produits modulaires où les sous-produits doivent être assemblés et testés avant d'être montés sur la pièce mère (Whitney, 2004). La structure en U permet d'améliorer la communication et la collaboration entre opérateurs. Elle permet également d'avoir un opérateur sur plusieurs postes afin de réduire la monotonie du travail.

B. Aménagement en cellules fonctionnelles

L'agencement en cellules fonctionnelles (Figure 10) est un aménagement où les ressources sont partagées par l'ensemble des produits et regroupées en cellules fonctionnelles. Les produits ne suivent pas un parcours linéaire causant un accroissement des encours et de la manutention. Sa

gestion est plus complexe incitant à une organisation par département, donc une main d'œuvre plus importante et un cycle de produit peu maîtrisé en comparaison avec l'agencement linéaire.

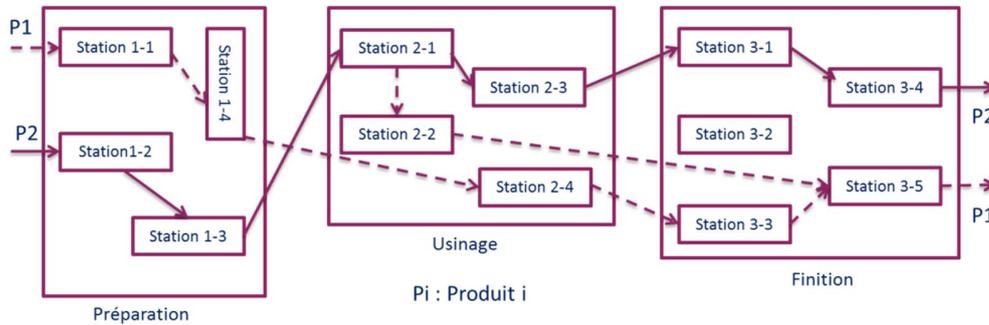


Figure 10 : Agencement en cellules fonctionnelles (job-shop).

En ce qui concerne les conditions de travail, les postes de charge sont souvent avec des tâches bien enrichies. L'opérateur travaille en général sur plusieurs moyens de production. Le travail est moins répétitif en comparaison avec l'aménagement linéaire, mais la présence de multitude de modèles de produits, des opérations de maintenances et le traitement de plusieurs tâches en même temps génère de la variabilité dans le système. Celui-là dispose en général de stocks assurant la temporisation nécessaire.

C. Agencement en îlots

L'agencement en îlots (Figure 11) est un aménagement orienté activité, où chaque îlot est responsable de la fabrication d'un ensemble réduit de produits. L'îlot ou la cellule, représente un regroupement de ressources hétérogènes pour réaliser l'ensemble des opérations relatives à un sous ensemble de produits. Au sein de la même cellule, les produits n'ont pas tous le même cheminement. Le principal apport de cette structure est le gain de flexibilité car cet aménagement supporte un nombre moyen de modèles de produits. Pour gagner de la productivité, des moyens technologiques comme la robotisation peuvent être employés.

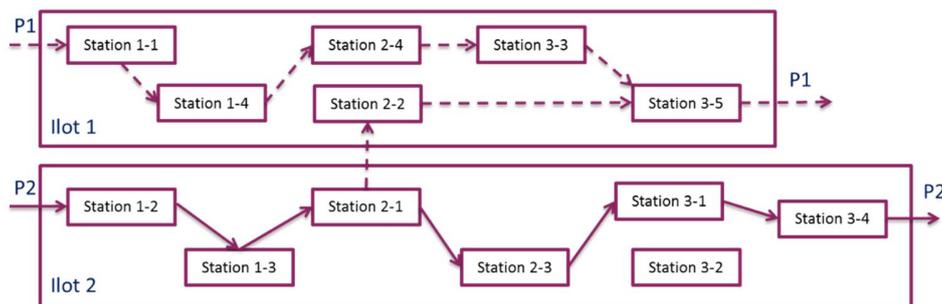


Figure 11 : Agencement en îlots.

Dans la section suivante, les méthodes utilisées pour dimensionner et caractériser ces aménagements sont introduites. Comme annoncé dans le début du chapitre, l'objectif est

d'identifier la méthode permettant d'intégrer les marges de manœuvre dans le processus de conception lors de l'étude de l'agencement d'un futur système de production.

2.2.2. Méthodes de conception et d'évaluation des choix de conception

Dans cette section, les différentes approches utilisées pour configurer une architecture-type d'un système de production sont introduites. Deux approches aux finalités différentes sont détaillées. Cependant, celles-ci peuvent être combinées comme il est expliqué dans la section 2.2.2-H. La première approche vise à avoir une configuration optimale vis-à-vis d'un critère d'optimisation. La deuxième vise plutôt à analyser une configuration et donner au concepteur, une base de comparaison entre plusieurs choix de conception.

A. Formalisation du processus de conception

Dans un processus de conception, le concepteur tente de construire une structure (S) d'un système de production à partir d'un ensemble d'exigences fonctionnelles (F). Celles-ci donnent sa raison d'être. Cette construction se fait par un passage par un comportement attendu (Be) : transition 1 et 2. La structure du système ainsi construite, à savoir les entités structurelles et les liens statiques qui les lient donne lieu à un comportement effectif (Bs) : transition 3.

L'étape 4 consiste à établir une comparaison entre le Bs obtenu et le Be cherché. En cas de nécessité, modifier la structure S (transition 6) pour s'approcher du comportement cherché Be . Ce processus de conception, souvent employé par les concepteurs sans être nécessairement formalisé, est dit approche FBS : Function-Behavior-Structure (Figure 12).

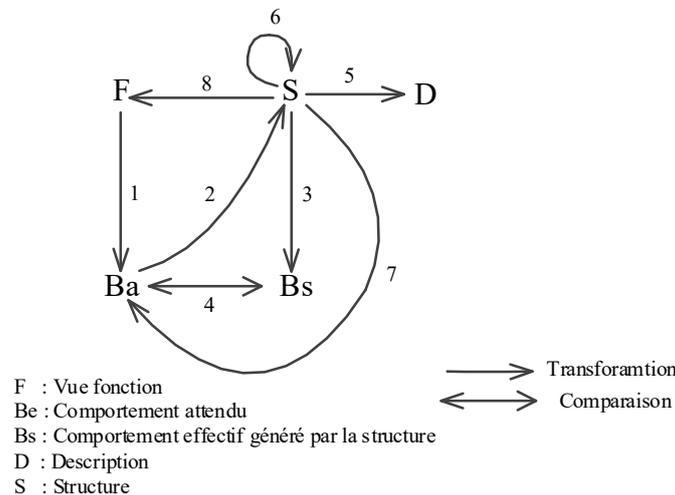


Figure 12 : Approche FBS (Gero and Kannengiesser, 2004).

La structure ainsi déterminée, donne lieu à une conception (D). Cependant, s'il n'est pas possible de déterminer une structure permettant de répondre totalement à des exigences fonctionnelles F

ou au comportement Ba permettant de les satisfaire. Une reformulation du domaine fonctionnel (transition 8) ou comportemental (transition 7) peut être faite.

Si le génie du concepteur réside dans sa capacité à déterminer une structure S à partir d'un comportement Be , il est autant difficile de prévoir le comportement effectif (Bs) de celle-ci. En particulier pour un système de production. En effet la plupart des systèmes au sens large, échappent du cadre de paradigme de la mécanique rationnelle (Le Moigne, 1994), i.e. le comportement d'un système n'est pas systématiquement déterminé à partir de la structure de celui-ci. Ainsi, il est difficile de valider un système puisqu'il n'est pas évident de prévoir son comportement lors des premières phases de conception.

Ainsi, il important se doter des outils et des techniques permettant :

1. De déterminer une structure (voire plusieurs structures candidates) à partir du domaine fonctionnel ;
2. De prédire le comportement effectif d'une structure d'un système et en particulier d'un système de production.

Par conséquent, dans la suite de ce chapitre, les techniques utilisées pour déterminer la structure d'un système de production (les stations de travail et leur agencement) sont présentées.

B. Approches d'optimisation par programmation linéaire

Pour réaliser le regroupement des opérations sous formes de stations de travail ou pour déterminer l'agencement d'un système de production (contenu des cellules et leurs positionnements), la programmation linéaire est souvent employée. Elle consiste à déterminer les paramètres de configuration (la structure) d'une architecture-type d'un système de production en :

- Exprimant les indicateurs de performance à optimiser, ainsi que les contraintes fonctionnelles et physiques sous forme d'un problème mathématique linéaire (rarement non-convexe) ;
- Solvant le problème linéaire ainsi posé, par une des techniques d'optimisation linéaire.

En ce qui concerne la mise en configuration linéaire (section 2.2.1-A) d'un système de production, l'objectif est d'équilibrer la ligne de production, en assurant une charge approximativement équivalente entre les différents postes de travail. Ainsi, le modèle mathématique d'optimisation posé exprime les contraintes suivantes (Jackson, 1956) :

- 1) La somme de toutes les opérations réalisées par chaque station n'excède pas un temps de cycle donné ;
- 2) Les relations de précédences entre les opérations doivent être respectées ;
- 3) La somme des temps d'arrêt structurel doit être minimisée.

D'autres contraintes peuvent être ajoutées, notamment celles en lien avec les facteurs humains, comme la linéarisation de l'index OCRA (Occhipinti, 1998) dans le modèle proposé par (Boenzi et al., 2016) ou l'index REBA (Hignett and McAtamney, 2000) dans (Yoon et al., 2016). D'autre part, la fonction objectif vise à optimiser un critère en lien avec la productivité, classiquement le temps de cycle, ou à minimiser le coût d'investissement en minimisant le nombre de stations (Tableau 11).

Tableau 11 : Problèmes classiques d'équilibrage de ligne d'assemblage simple

	Temps de cycle fixe	Temps cycle à minimiser
Nombre de station fixe	PELAS-F	PELAS-2
Nombre de station à minimiser	PELAS-1	PELAS-E

En ce qui concerne la formation des îlots et des cellules, la formulation mathématique se fait pour répondre à, ces deux contraintes :

- 1) Minimiser les coûts des déplacements intercellulaires, les encours, le nombre de stations ou d'autres critères selon les spécificités du système ;
- 2) Des contraintes comme le nombre minimal de duplication de postes pour assurer la demande requise ou le nombre maximal de station par îlot (Neto et al., 2010).

En ce qui concerne les autres architectures, la même approche peut être utilisée par le biais d'une formulation mathématique du critère à optimiser et des contraintes à respecter.

C. Approches d'optimisation par heuristiques

Les PELAS sont des problèmes d'une complexité Non Polynomiale (NP) (Queyranne, 1985). Les algorithmes itératifs exacts permettant l'allocation des opérations aux stations de travail aboutissent à des temps d'exécution non raisonnables. L'utilisation des heuristiques permet d'avoir des solutions proches de l'optimum avec un temps de calcul acceptable.

Selon (Scholl and Becker, 2006), ces heuristiques sont basées sur des techniques comme les règles de réduction, les règles de dominance ou les limites inférieure et supérieure de la solution, qui permettent de réduire le nombre d'itérations. Des techniques comme la programmation dynamique qui explore l'espace des solutions avec une stratégie donnée permettent également de réduire le nombre d'itérations. Comme exemple de ces heuristiques peuvent être citées l'optimisation par colonies de fourmis (Dorigo and Stützle, 2003), la recherche locale itérative (Stützle, 2006) ou la recherche gloutonne aléatoire adaptative (Feo and Resende, 1995). Dans la même catégorie, peuvent être incluses les approches évolutives où l'exploration de l'espace de solutions se fait par l'amélioration de la population des candidats-solutions. Les algorithmes génétiques sont un exemple de ce type d'approches qui sont utilisés dans la littérature, notamment dans (Asensio-Cuesta et al., 2012), (Carnahan et al., 2000), (Azizi et al., 2010) et dans (Ayough et al., 2012). Les techniques de construction quant à elles, permettent de

construire une solution de proche en proche en regroupant des tâches selon des règles de priorité (Scholl and Voss, 1997).

Toutefois, les modèles d'optimisation proposée dans la littérature et qui s'appuient sur les approches présentées ci-dessus ont plusieurs limites. En effet, ces modèles ne prennent pas en compte la possibilité d'exécuter des opérations en parallèle ; c'est en particulier le cas d'un problème d'Agencement Logique (Belmokhtar et al., 2006). Elles ne prennent pas en considération la variabilité liée aux opérations y compris celles liée aux facteurs humains comme la fatigue, l'accoutumance ou la motivation. Ces facteurs peuvent impacter significativement les temps opératoires. Ceci est d'autant plus observable dans le cas des opérations manuelles notamment les opérations d'assemblage.

Une autre limitation concernant les approches d'optimisation linéaire concerne la fonction objectif ou la fonction de fitness dans le cas d'une approche évolutionnaire (qui permettent d'évaluer une solution). Celles-ci sont construites d'une manière simple et risque de ne pas refléter la complexité de la réalité. Par conséquent, les aspects stochastiques et dynamiques qui interviennent dans la performance du système sont ignorés. Pour étudier ces aspects dynamiques et stochastiques, la technique de simulation (Banks, 1998) est plus adaptée (Galland et al., 1999) (Neumann and Medbo, 2009) pour ce genre d'étude, et complète les méthodes citées en dessus. Ainsi, la section suivante introduit cette technique ainsi que les méthodes permettant de simuler un système de production.

D. Techniques d'analyse des systèmes de production

Selon (Banks, 1998), les méthodes basées sur la programmation linéaire sont très limitées quand on ne dispose pas d'une expression mathématique explicite pour évaluer la performance de la solution ou lorsque le problème contient des aspects stochastiques. D'autres méthodes d'analyse permettent d'évaluer la performance de solution sont plus adaptées. Elles peuvent également être couplées à des méthodes d'optimisation.

Pour prendre en considération les aspects dynamiques et stochastiques, la théorie des files d'attente et des processus stochastiques peuvent être employées (Figure 13). Seulement, l'applicabilité de celles-ci reste restreinte face à des cas pratiques puisqu'elles requièrent des techniques mathématiques de modélisation notamment des techniques comme les chaînes de Markov (Dayar, 2012).

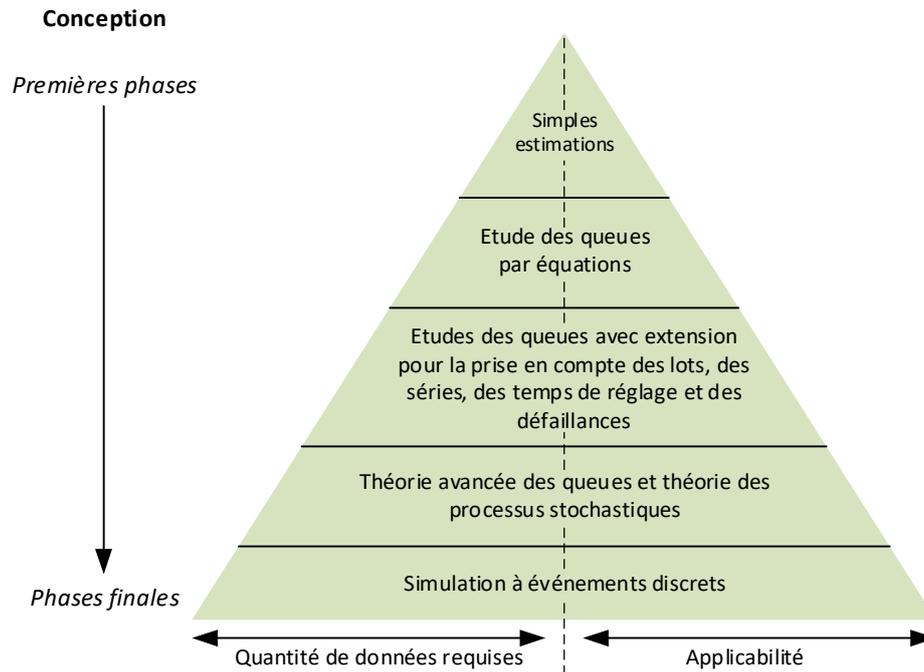


Figure 13: Méthodes d'analyse d'un système de production (Rooda and Vervoort, 2007).

La simulation permet de contourner cette limite par la reproduction du comportement d'un système sans passer par une modélisation mathématique explicite (Negahban and Smith, 2014). Elle est appliquée pour la conception et le management des systèmes de production mais aussi pour d'autres types de systèmes de travail, notamment pour les systèmes hospitaliers (Mielczarek and Uzialko-Mydlikowska, 2012), dans le marketing (Negahban and Yilmaz, 2014), dans la logistique (Terzi and Cavalieri, 2004) et dans le domaine militaire (Naseer et al., 2009). Selon (Neumann and Medbo, 2009), la simulation représente un outil adapté pour traiter les aspects opérationnels mais aussi les facteurs humains durant les phases de conception, afin de faire une amélioration sociotechnique des systèmes de production. Cependant, à part certains travaux récents (El Mouayni et al., 2016) (Perez et al., 2014) (Neumann and Medbo, 2009), il n'existe pas de méthodologie ou d'approche décrivant l'utilisation de cette approche pour traiter la problématique soulevée dans ces travaux de thèse, à savoir la limitation des facteurs de risque et la considération de la productivité.

Dans la section qui suit, les méthodes sur lesquelles se base la simulation sont présentées. L'objectif est d'identifier celles qui peuvent être adaptées afin de prendre en considération les facteurs humains en intégrant des marges de manœuvre dans un système de production. Comme présenté par la suite, deux aspects sont à considérer : la construction du Modèle Conceptuel de simulation et la technique d'exécution de la simulation.

E. Construction du modèle conceptuel de la simulation numérique

La simulation peut être définie comme étant la reproduction des opérations d'un processus ou d'un système réel ou système en cours de conception. Cette simulation permet de générer une « histoire » artificielle, permettant de juger les caractéristiques opérationnelles du système étudié, étant existant ou en cours de conception (Banks, 1998). Comme le montre la Figure 14, grâce au modèle conceptuel de simulation qui permet d'obtenir un ensemble de lois d'entrée-sortie, le comportement du système est décrit, souvent, d'une manière implicite. La construction de ce modèle conceptuel se base sur une théorie qui permet de spécifier le comportement du système. Il est implémenté par la suite dans un environnement numérique permettant d'exécuter la simulation.

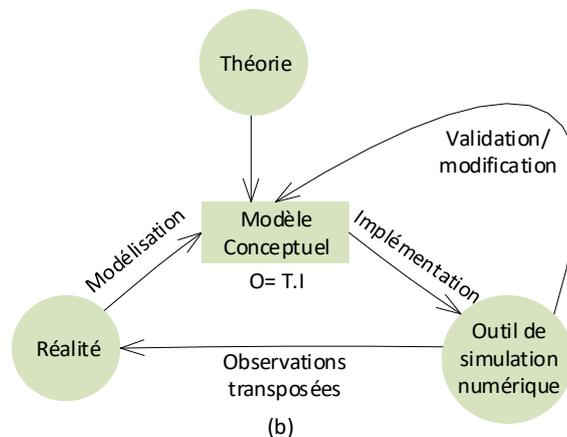


Figure 14: Principe de la simulation numérique.

Selon (Robinson, 2006), la construction du « modèle conceptuel » est une étape critique dans un projet de simulation. Dans la littérature, beaucoup de travaux se sont intéressés au processus de modélisation et différentes méthodologies ont été proposées. Parmi les méthodes proposées figure la méthode conique développée par (Nance, 1994). Cette méthode commence par la définition des entités du modèle, la définition des attributs de chaque entité pour arriver aux différentes interfaces entre entités qui supportent leurs interactions. (Arbez and Birta, 2007) ont proposé une méthodologie de modélisation basée sur une vue « activité » dénommée ABCmod (Activity-Based Conceptual modeling framework). La méthode propose un système de notation et une distinction claire entre la structure et le comportement. Ces deux derniers sont décrits selon deux niveaux d'abstraction : un niveau conceptuel élevé et un niveau détaillé. Le concept d'activité reste central dans la modélisation du comportement, cependant, il ne permet pas de couvrir tous les aspects, pour cette raison, le concept d'action a été ajouté.

La méthodologie KAMA est un deuxième exemple de méthodologie de construction du modèle conceptuel (Robinson, 2011). Elle considère quatre étapes pour effectuer sa construction :

- Acquisition de la connaissance afin d'identifier les limites de système à modéliser, en fonction des objectifs ;
- Définition du contexte en utilisant le diagramme de Mission d'Espace qui considère cinq entités : Mission, Rôle, Objectif, Mesure et Relation ;
- Développement du modèle en utilisant un diagramme d'ontologie d'entités et un diagramme entité-relation pour la modélisation de la structure. En ce qui concerne la modélisation du comportement, le diagramme flux de tâches est utilisé ;
- Vérification et validation.

Comme toutes les autres méthodologies, KAMA est itérative et utilise UML comme langage de modélisation. D'autres méthodologies ont été proposées comme la méthodologie "Federation Development and Execution Process" apparue dans la norme IEEE 1516.3TM-2003 et la méthodologie Douce. Les méthodologies « Modèles Conceptuels des Missions d'Espace » et « Modélisation Conceptuelle pour la Défense » (Robinson, 2011) peuvent être employées pour construire des modèles conceptuels de simulation spécifique à l'espace et à la défense.

Tableau 12 : Principes de décomposition pour modéliser un système manufacturier

Principe de décomposition pour la modélisation structurelle des systèmes manufacturiers	
I.	Entités internes et externes (limite du système)
II.	Entités mobiles et entités fixes
III.	Queues et serveurs
IV.	Entités intelligentes et entités non intelligentes
V.	Infrastructures, flux et activités
VI.	Modalité : éléments physiques, informationnels et éléments de contrôle
VII.	Aspects dynamiques : exécution d'activités

A part les méthodologies ABCmod et KAMA, les méthodologies présentées dans cette section ne proposent pas un langage de modélisation ou un système de notation, cependant, des travaux encouragent l'utilisation des langages UML et SysML (Robinson, 2011).

Les méthodologies proposées dans la littérature considèrent deux vues : la structure et le comportement du système. Plusieurs niveaux d'abstraction sont aussi considérés. Pour déterminer la structure, (Robinson, 2011) a proposé les principes de décomposition spécifiés dans le Tableau 12. Cependant, ces méthodologies ne considèrent pas les spécificités liées à la modélisation des facteurs humains. (Zhang et al., 2008) est le seul travail qui traite cet aspect et qui propose une méthodologie qui inclut la notion d'activité humaine. Ce type d'activité est modélisé à base d'une décomposition structurelle des tâches qui les composent. Des décompositions inspirées des Systèmes de Temps de Mouvement Prédéterminés (STMP) peuvent être utilisées pour modéliser ces activités, notamment la Technique de Séquencement d'Opérations de Maynard (Genaidy et al., 1989). Celle-ci, s'appuie sur la séquence du transfert

d'objet pour déterminer une décomposition structurelle d'une tâche sous forme de phases (Tableau 13). Cependant l'approche proposée par (Zhang et al., 2008) est centrée sur l'activité humaine et l'impact de celle-ci sur la performance du système.

Tableau 13 : Exemple de phases proposées par la Technique de Séquencement d'Opérations de Maynard pour modéliser une séquence de travail (Zandin, 2002).

Phase	Description
Appréhender (Gt)	Elle représente l'action qui consiste à aller chercher l'objet (produit, pièce ou outil). Elle est décomposée en trois éléments de mouvement : Action de distance (A), mouvement corporel (B) et gain de contrôle (Gc)
Mettre (Pt)	Elle représente l'opérateur mettant l'objet à traiter dans le moyen utilisé pour la transformation. Cette phase est composée des éléments A, B et un élément de mouvement de placement (Pl)
Réaliser un Mouvement Contrôlé (Mc)	Représente un mouvement manuel guidé ou des actions de mouvement sur un objet le long d'un chemin contrôlé
Aligner (I)	Elle représente des actions manuelles qui suivent la phase Pt, Mc ou Pr. Elle consiste à réaliser un alignement ou atteindre une orientation spécifique de l'objet manipulé
Traiter (Pr)	La phase « Traiter » représente une phase monolithique de traitement durant laquelle l'opérateur performe un ensemble d'actions sans possibilité d'interruption

Toutefois, l'impact des contraintes générées par les moyens et surtout en termes de conditions de travail n'apparaît pas nécessairement. Il est nécessaire d'avoir une simulation où les activités sont simulées d'une manière distribuée, afin de reproduire fidèlement les interactions au sein d'un système de production. Celles-ci, sont rarement centralisés ou unilatérales. Par conséquent, le choix du paradigme sur lequel se base la construction du modèle conceptuel, permettant d'avoir cette distribution, est critique pour un projet de la simulation. Comme discuté dans la section suivante, ce choix impacte également la manière avec laquelle la simulation est exécutée.

F. Paradigme de la simulation

Un aspect important à prendre en considération lors de la construction du modèle conceptuel de la simulation est le paradigme adopté. Il existe une différence entre le paradigme, la théorie et le modèle. Selon (Steinbruner, 2002), le paradigme représente l'ensemble des hypothèses critiques, sur lequel la théorie et par conséquent le modèle sont construits. Ce choix impacte la nature des entités (processus, activités, agents, événements) utilisées pour modéliser le système ainsi que la nature des spécifications (interactions entre événements, communications entre agents...) permettant de décrire son comportement. Il influence également les mécanismes utilisés (par interaction de processus, par scan d'activités, par planification d'événements) pour l'exécution de la simulation.

Dans la méthodologie de simulation, deux paradigmes sont souvent utilisés pour « percevoir » le monde réel que l'on cherche à modéliser : en considérant que le système est composé de processus en interaction par le biais d'événements, ou en considérant le système comme étant des entités responsables de la réalisation d'activités. Une nouvelle façon de décrire les systèmes est de les considérer comme étant composés d'agents. Autonome et proactif, la construction du modèle conceptuel consiste à définir des agents, différentes interactions, de les « faire vivre » dans un environnement d'interactions et de voir le comportement émergent. Par définition, le paradigme multi-agents implique une construction du bas vers le haut, en assemblant des agents dont l'architecture est relativement simple, la construction d'environnements de simulation complexe est faite. En contrepartie, ce genre de simulation tend à rendre l'exécution très consommatrice en termes de ressources informatiques.

Selon (Shen et al., 2006), le paradigme multi-agents est une solution émergente adaptée aux exigences des systèmes industriels modernes. En se basant sur les caractéristiques de l'agent telles que la proactivité, la réactivité et la sociabilité, cette technologie est appliquée dans les processus intégrés et le management des chaînes logistiques. Les systèmes multi-agents ont démontré qu'ils étaient bien adaptés pour la modélisation des systèmes manufacturiers (Ruiz et al., 2014), dont les organisations tendent de plus en plus vers des entités indépendantes ou à des hiérarchies horizontales.

G. L'exécutif de la simulation

Le modèle conceptuel permet de représenter des données structurées nécessaires pour la description du système sous investigation (Zeigler, 1991). Il est autant important de mettre en place le système de management du temps qui permet d'exécuter la simulation. Ce système dépend étroitement du paradigme employé pour obtenir le modèle conceptuel : paradigme basé sur une description événementielle des systèmes, basé sur une description par activités, basé sur une vue par agents ou sur une vue processus.

Selon (Pidd, 2004), il existe quatre mécanismes selon lesquels une simulation peut être exécutée :

- Par planification d'événements ;
- Par interactions de processus ;
- Par scan d'activités ;
- Par une approche à trois phases.

Ces mécanismes sont utilisés pour avancer l'horloge de la simulation (attribut indiquant l'instant d'observation) vers des dates impactées par des aspects aléatoires, en utilisant des générateurs de variables aléatoires. Ainsi, les aspects stochastiques sont pris en considération. Dans la suite de cette section, ces techniques sont présentées afin de mettre en avant, les avantages et les

inconvenients de chacune d'entre d'elles. Ceci représente une base qui permet de choisir une parmi elles pour réaliser un projet de simulation spécifique.

E.1. Simulation par planification d'événements

Le mécanisme basé sur planification d'événements (Figure 15) s'appuie sur une liste de futurs événements initialisée en la remplissant par les événements imminents (dont l'occurrence est certaine). Le mécanisme consiste à, le long d'une boucle principale de simulation, dépiler un événement de la liste, l'exécuter et appliquer les transformations qui en découlent. Ceci implique la construction d'une fonction de transfert F qui, à partir d'un couple (S_i, e) , où S_i est l'état actuel du système, e est l'événement à exécuter, retourne le nouveau S_{i+1} et les événements futurs à ajouter à la liste des futurs événements.

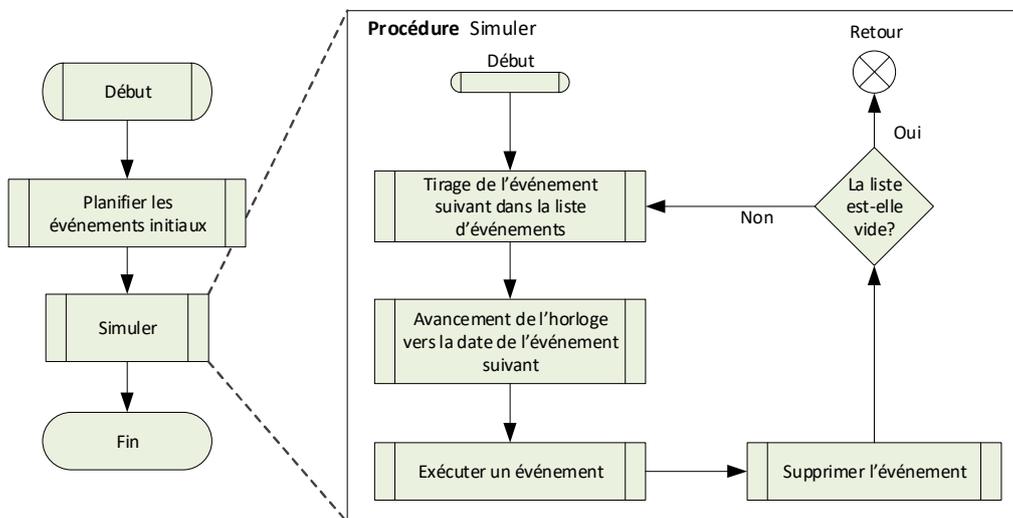


Figure 15: Mécanisme de simulation par planification des événements.

Ce mécanisme a deux principaux désavantages :

- Il n'est pas naturel (de point de vue humaine) de modéliser le système par une spécification orientée événements ;
- La construction de la fonction F (qui représente un modèle mathématique) n'est pas nécessairement évidente.

Face à la complexité de cette approche, une autre technique peut être considérée : l'approche par interactions de processus. Dans cette approche, un niveau d'abstraction élevé est considéré : niveau processus. Ainsi, le nombre d'événements à considérer est réduit à des événements-types liés à l'activation, à la suspension et à la terminaison d'un processus.

E.2. Simulation par interactions de processus

Le mécanisme par interactions de processus représente une extension de l'approche précédente, où le concept de processus est ajouté. Comme le montre la Figure 16, le mécanisme commence par planifier les processus imminents avec les événements qui y sont associés. Une liste des processus conditionnels contient les processus dont l'activation dépend d'une spécification conditionnelle. Cette liste est testée pour voir s'il y a des processus à activer. Si oui, la liste des futurs événements est mise à jour en ajoutant l'événement qui correspond à son activation.

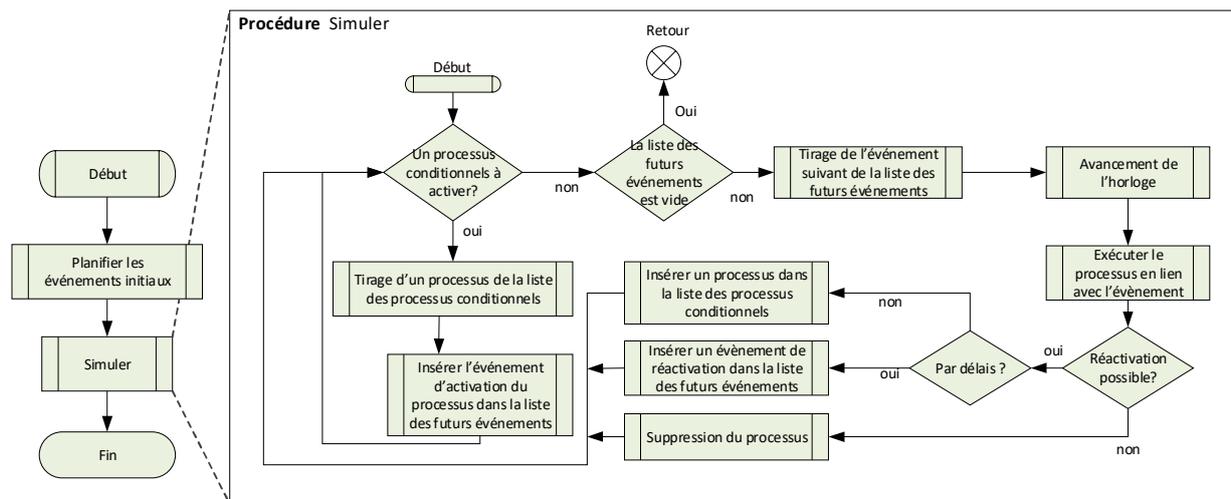


Figure 16: Mécanisme de simulation par interactions de processus.

Quand tous les processus conditionnels sont testés, on accède à la liste des futurs événements pour tirer l'événement le plus proche. L'horloge est avancée vers la date de l'événement à exécuter, et par le biais de la modélisation en processus, l'impact de cet événement est déterminé. Le processus en question est ensuite testé, pour savoir s'il va se réactiver, conditionnellement ou par délais. Dans le premier cas, le processus est remis dans la liste des processus conditionnels. Dans le deuxième cas, un événement qui y correspond à sa réactivation par délais est ajouté à la liste des futurs événements, sinon, le processus est supprimé.

Le principal avantage de ce mécanisme réside dans le fait que, c'est plus naturel pour un analyste de modéliser un système en vue processus en comparaison avec une modélisation basée sur une description événementielle. Cependant, cet avantage peut devenir un inconvénient car, en fonction du niveau de détail qu'on cherche à considérer, adopter une vue processus peut s'avérer très simplificateur. En d'autres termes, modéliser en processus peut aboutir à l'omission d'entités englobées dans ces processus et dont les états peuvent avoir un impact significatif sur le comportement du système. Une autre façon de faire consiste à considérer des entités ressources nécessaires à l'activation des processus. Cette technique peut effectivement augmenter le niveau de détail, mais ne peut pas tout modéliser.

Pour bien comprendre cette subtilité, l'exemple suivant peut être considéré : il est très difficile de modéliser l'impact de la localisation relative d'un opérateur par rapport à son poste de travail, sur la productivité de celui-là en utilisant une vue processus. Si on considère un processus libellé « *transformerPièce* », celui-ci dépend d'une variable booléenne « *opérateurDisponible* » qui prend la valeur « *vrai* » quand l'opérateur est sur son poste. Cependant, cette modélisation ne permet pas de « voir » l'impact de la nature d'agencement des postes sur lesquels travaille l'opérateur en question. Pour inclure ce niveau de détail, un niveau sous-jacent doit être considéré : niveau d'activités. Ainsi une activité « *seDéplacer* » peut être considérée sous l'entité opérateur pour modéliser les déplacements, qui tiennent en compte de la position de l'opérateur. Toutefois, pour exécuter des modèles de simulation qui se basent sur une vue activités, les approches par scan d'activités ou par l'approche à trois phases sont plus adaptées.

E.3. Simulation par scan d'activités

L'approche par scan d'activité représente l'approche la plus facile en termes d'exécution, comme il s'agit de faire avancer le temps selon un pas fixe ou variable et de vérifier à fur et à mesure l'activation ou la désactivation des activités. Le handicap majeur de ce mécanisme, c'est qu'il est très consommateur en termes de ressources et que la simulation est relativement longue.

E.4. Simulation par approche à trois phases

Le dernier mécanisme est dit « approche en trois phases » (Figure 17). Cette approche s'appuie sur une classification des activités en deux catégories : les activités de type-B dont l'occurrence est obligatoire et correspond à une date donnée ; les activités de type-C dont l'activation est conditionnée par des spécifications d'activation.

Ce mécanisme commence par une planification des événements imminents et l'initialisation des attributs « date d'engagement » (attribut contenant la date la plus proche pour l'exécution d'une activité) des entités simulées. Dans la première phase (phase A), l'horloge est avancée vers la date d'engagement la plus proche. Les entités dont le temps d'engagement est égal au temps indiqué par l'horloge sont mises dans une liste : la liste des entités engagées.

La deuxième phase (B) consiste à retirer des entités de cette liste et à exécuter les activités encapsulées par celles-ci, référenciées dans les attributs « activité suivante ». L'exécution de celles-ci va éventuellement impacter les attributs « date d'engagement », « disponibilité » (attribut indiquant si l'entité est engagé dans une activité) et « activité suivante » d'entités simulées ; causer des futures activités de type B.

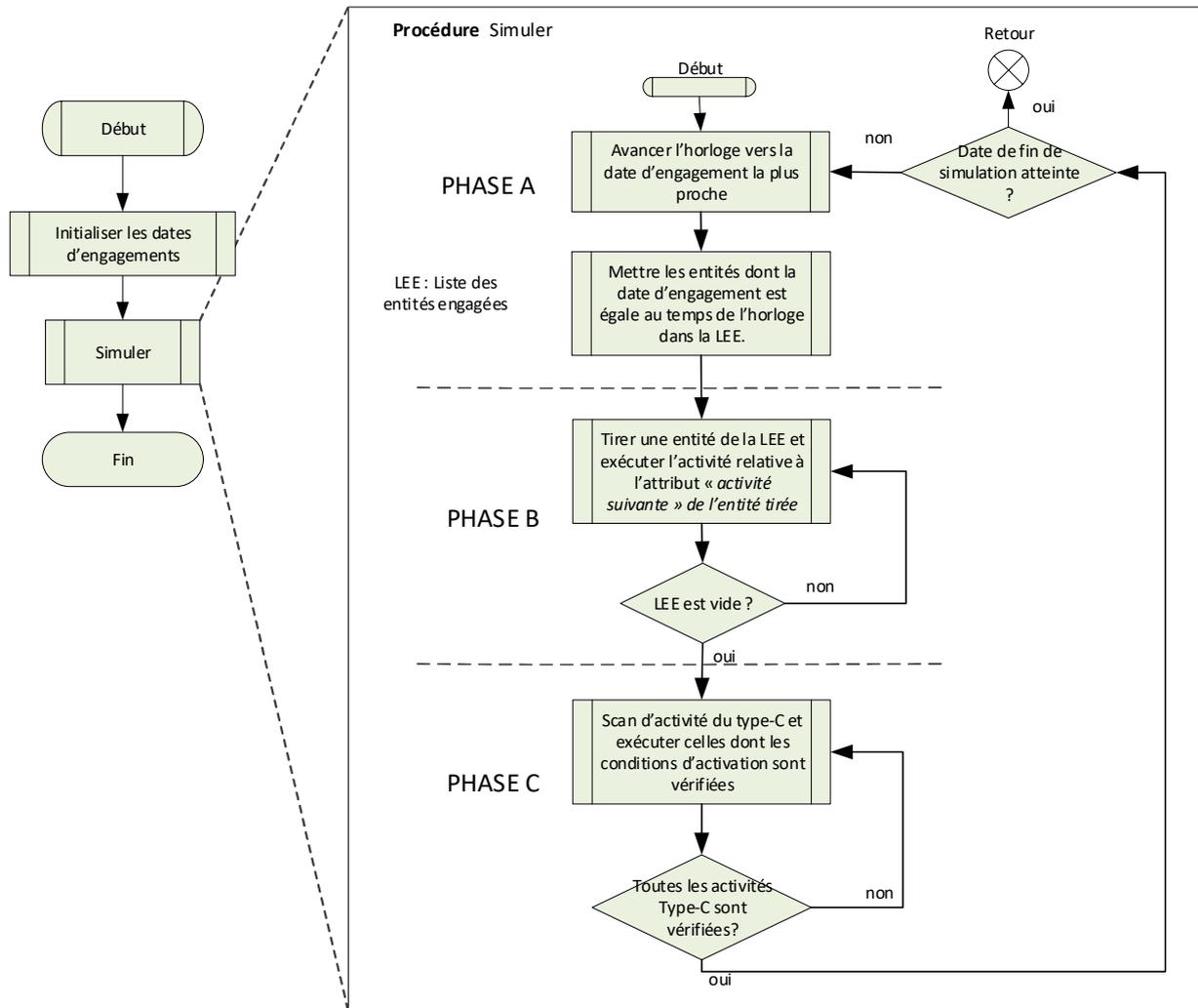


Figure 17 : Mécanisme de simulation par trois phases.

La phase C consiste à tester sémantiquement les activités conditionnelles (type-C), c'est-à-dire celles dont l'activation est conditionnée par une spécification conditionnelle et d'actualiser les dates d'engagement, la disponibilité et les activités suivantes des entités. Le mécanisme se reproduit, les phases A, B et C sont exécutées d'une manière itérative jusqu'à atteindre la limite du temps de simulation.

Le mécanisme de simulation basé sur l'approche à trois phases supporte les modèles orientés activités, donc des modèles avec un niveau de détail plus élevée en comparaison avec l'approche par interactions de processus. En décomposant le mécanisme en trois phases, cette approche propose un système d'avancement du temps plus efficace en comparaison avec l'approche par scan d'activité.

Tableau 14 : Comparatif des différents mécanismes de simulation

Mécanisme	Mécanisme par planification d'événements	Mécanisme par interactions de processus	Mécanisme par scan d'activités	Mécanisme par approche à trois phases
Paradigme de modélisation supporté	Modélisation par événements	Modélisation orientée processus	Modélisation orientée activités	Modélisation orientée activités
Mécanisme d'avancement du temps de la simulation	Avancement de l'horloge selon l'approche « événement suivant »	Avancement de l'horloge selon l'approche « événement suivant »	Incrémentation constante de l'horloge	Avancement par l'approche « prochaine date d'engagement »

Avant de conclure cette section, le *Tableau 14* présente un comparatif des différents mécanismes de simulation qui ont été présentés. La section suivante aborde un autre aspect : l'interfaçage entre les méthodes d'optimisation et les techniques d'analyse, notamment la simulation. Elle introduit les techniques d'optimisation basées sur la simulation.

H. Combinaison entre méthodes d'analyse et méthodes optimisation

La simulation ou les méthodes d'analyse en général, permettent de comparer plusieurs configurations d'un système de production. Cette évaluation donnée par la simulation, peut être employé dans une démarche d'optimisation. Une telle approche est dite « optimisation basée sur la simulation ». Elle représente un complément des approches basées sur la programmation linéaire ou les méthodes heuristiques. Ainsi, des systèmes dont la dynamique est de plus en plus complexe et stochastique peuvent être optimiser (Neto et al., 2010). Selon (Nguyen et al., 2012), l'optimisation basée sur la simulation est articulée sur trois composantes :

1. La structure de simulation : évalue la performance du système en utilisant des formalismes de spécifications comme le système de Spécifications par Événements Discrets (SEVD) ou un Système de Spécification basé sur les Equations Différentielles (SSED) (Zeigler et al., 2000) ;
2. Modèle d'optimisation : décrit le problème en formulation mathématique ;
3. Méthodes d'optimisation : correspondent aux techniques de résolution employées pour trouver ou se rapprocher de la solution optimale selon le modèle d'optimisation. Elles incluent des méthodes stochastiques, déterministes et les approches par évolution.

L'optimisation hybride, basées sur plusieurs méthodes d'optimisation permet d'améliorer les solutions obtenues (Milano and Roli, 2004), si les méthodes employées ne sont pas exactes. Ce

qui est souvent le cas lorsqu'on traite des problèmes NP. L'approche d'optimisation devient ainsi plus performante en termes de temps d'exécution et qualité de solutions obtenues si l'interaction entre les différentes méthodes d'optimisation est employée. Pour cette raison, une quatrième composante peut être considérée :

4. Système multi-agents : permet de lier entre le modèle d'optimisation aux méthodes d'optimisation employées obéissant à une stratégie donnée.

Pour réaliser ceci, (Milano and Roli, 2004), ont proposé une architecture pour l'optimisation hybride basée sur un système multi-agents appelé MAGMA. Cette architecture considère plusieurs couches (Figure 18), dont chacune contient des agents spécialisés qui vont collaborer dans la résolution du problème.

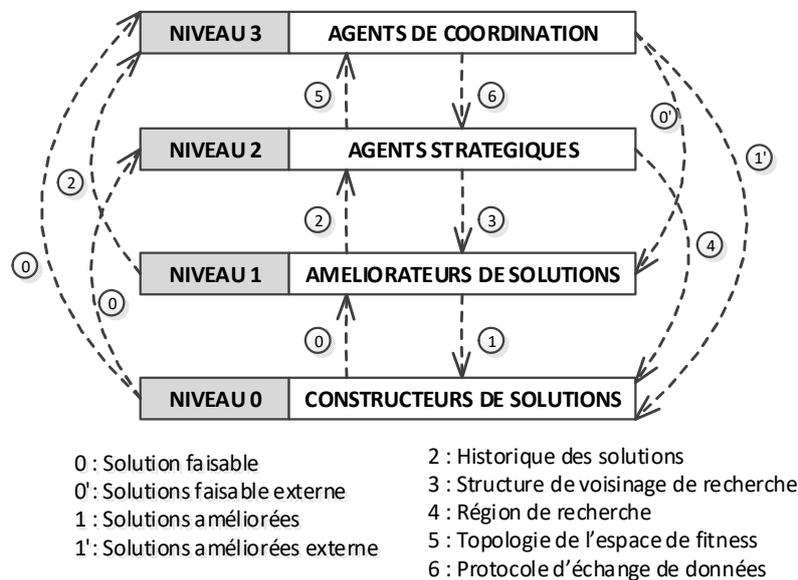


Figure 18: Architecture MAGMA.

La couche 0 (C0) de l'architecture MAGMA contient des agents notés C0-Agents. Leur rôle est de construire des solutions faisables qui satisfont les contraintes de la structure d'optimisation. Ils transmettent ces solutions aux agents de la couche supérieure (C1) : C1-Agents. Ceux-ci travaillent sur l'amélioration de la solution en explorant l'espace des solutions. Ils transmettent les solutions améliorées aux C2-Agents, qui eux, sont responsables de guider et d'étendre la recherche vers des zones plus intéressantes. Ceci permet d'éviter les optimums locaux. La couche C3 contient des agents C3-Agents responsables de collaborer avec la structure d'optimisation ou d'autres composantes, notamment la structure de simulation.

Cette architecture est utilisée pour modéliser des heuristiques classiques comme l'optimisation par colonies de fourmis, l'optimisation par recherche locale itérative ou l'optimisation par recherche gloutonne aléatoire adaptative.

Ces travaux de thèse s'intéressent principalement aux techniques d'évaluation permettant d'étudier les aspects stochastiques et dynamiques qui influencent une situation de travail. L'objectif est de caractériser l'impact de celles-ci sur la productivité et les conditions de travail au sein d'un système de production. Un intérêt particulier a été accordé à la simulation.

Par ailleurs, il est possible de coupler la simulation avec des méthodes d'optimisation par le biais de l'architecture MAGMA, afin de construire une approche d'optimisation basée sur la simulation. Ce travail d'interfaçage est considéré comme suite des travaux entamés dans cette thèse.

Certes, la simulation permet d'évaluer la performance d'un système de production. Cependant, la façon d'évaluer, en disposant de données brutes issues de la simulation, représente une problématique en elle-même. La multitude et la subjectivité de certains aspects (facteurs humains, aspects techniques et économiques) qui interviennent peuvent rendre difficile la construction de l'indicateur de performance ou de la fonction objectif. Ces aspects sont discutés dans la section suivante qui traite de la littérature en lien avec l'évaluation de la performance.

2.2.3. Evaluation de la performance d'un système de production

Plusieurs travaux (Berrah and Mauris, 2002) (Doumeingts et al., 1995) (Hon, 2005) (Meyer, 2002) se sont intéressés à la performance en mettant en avant son caractère multidimensionnel. Ainsi, un indicateur de performance concerne une partie (et rarement la totalité) de ces dimensions. Ces indicateurs décrivent d'une manière chiffrable le degré de satisfaction d'une mission et permettent de la lier avec les activités d'amélioration (Vasiljevic et al., 2014). Dans le cadre d'un système en cours de conception, ces indicateurs permettent de valider ou de revoir une conception. Selon (Neely, 2007), il existe trois dimensions élémentaires pour mesurer la performance d'un système : la vue finance, la vue marketing et la vue opérationnelle.

Partant de la problématique soulevée dans ces travaux de thèse, cette section se focalise sur la mesure de la performance opérationnelle. Toutefois, selon (Berrah and Mauris, 2002), il est plus intéressant de définir des indicateurs qui s'étendent sur plusieurs dimensions, et en particulier entre les dimensions opérationnelle et économique. Celles-ci sont liées par des liens de causalité. Comme exemple d'indicateurs dits étendus peuvent être cités la « Valeur Economique Ajouté » (VEA) (Chen and Dodd, 1997) qui cherche à évaluer le gain économique d'une mesure par rapport à l'investissement réalisé (rachat d'une machine, augmentation d'effectif, changement au niveau de la technique de travail...). Un autre exemple de mesure de performance est la méthode des « Cartes de Score Balancées » (CSB) (Balanced Score Institute, 2017). Cette méthode

propose de considérer quatre dimensions ou perspectives : vue finance, vue client et intervenant décisionnel, vue processus interne et vue capacité organisationnelle et croissance.

Initialement taylorienne, la performance opérationnelle dans le domaine industriel est, de nos jours, synonyme d'efficacité. Autrement dit, les indicateurs développés dans ce sens visent à mesurer le rendement des équipements et de la main d'œuvre. Parmi les indicateurs de performance les plus classiques peuvent être cités le niveau des encours w (équation 19), le taux d'utilisation u (équation 20) et le Temps Moyen dans le Système TIS , ainsi que d'autres indicateurs classiques (Chung, 2004). Le paramètre w_i désigne le nombre d'encours à l'instant i , s_i est l'état du moyen (utilisé, disponible).

$$\overline{w}_n = \frac{1}{t_n} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - t_{i-1}) \cdot w_{i-1} \quad (19)$$

$$\overline{u}_n = \frac{1}{t_n} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - t_{i-1}) \cdot s_{i-1} \quad (20)$$

Il est clair que l'indicateur de performance dépend étroitement de la nature des activités exercées dans le système. D'ailleurs, les méthodes proposées, telles que VEA ou la CSB proposent plutôt un cadre méthodologique : comment construire un indicateur et l'exploiter pour des activités de pilotage. Elles ne proposent pas d'indicateurs-types à employer pour faire l'évaluation. Dans ce sens, (Rodde, 1989) propose de modéliser le système de production par le biais de cinq états élémentaires, dans lesquels se trouvent les individus d'un système. Ces états sont considérés comme une base d'observation et à partir de laquelle, des indicateurs opérationnels spécifiques à un système peuvent être construits. L'approche considère trois populations : Pièces, Moyens et Opérateurs (PMO). Ces individus prennent les cinq états :

1. NA : état Non Actif dans lequel se trouve une machine non activée, un opérateur absent ou un produit non lancé.
2. A : état Actif dans lequel se trouve une machine engagée, un opérateur présent dans l'atelier, un produit lancé.
3. PR ; état PProductif où l'individu réalise sa fonction dans le système.
4. AS : état d'Arrêt Structurel dû à la structure du système, un produit dans un stock en attente d'être transformé, une machine en attente d'un opérateur occupé.
5. AP : état d'Arrêt Propre causé par l'individu lui-même.
6. AI : état d'Arrêt Induit causé par un autre individu, comme un opérateur en arrêt à cause d'une panne machine.

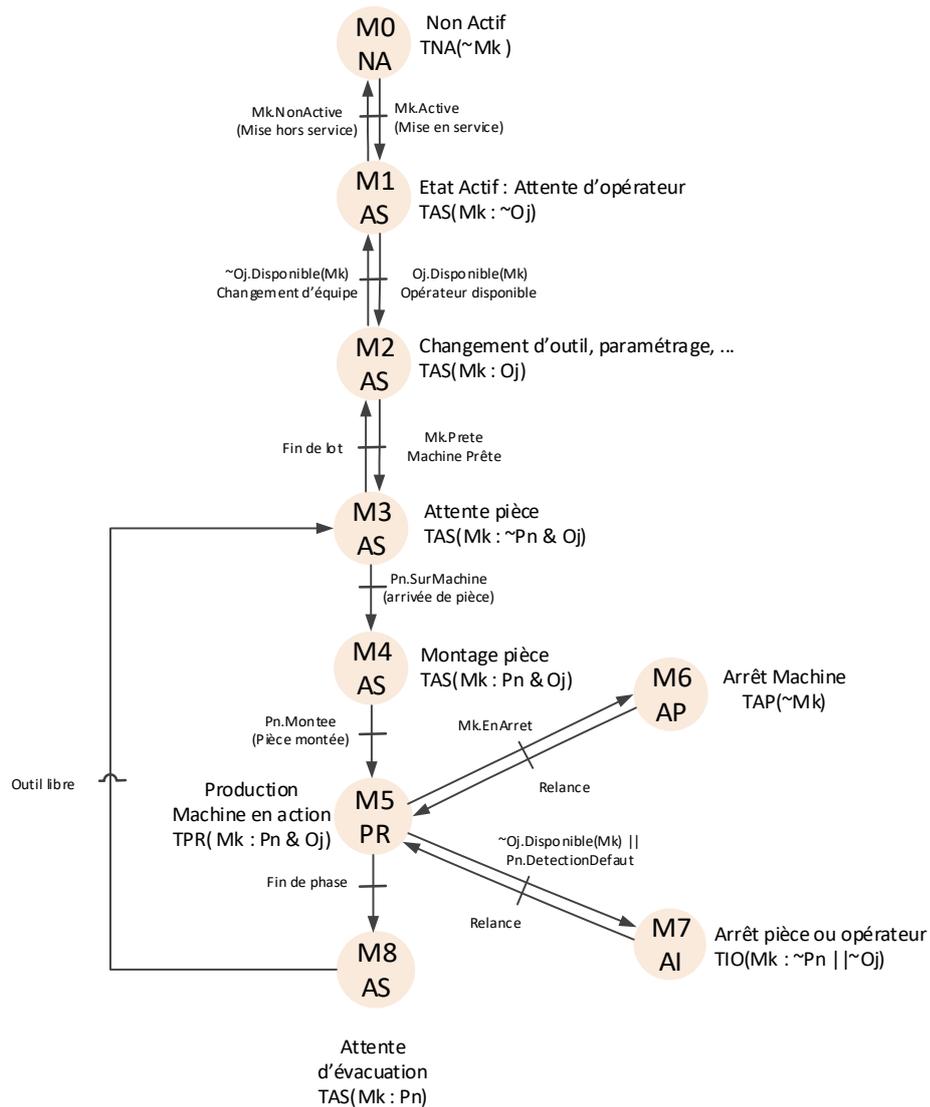


Figure 19 : Modélisation à base des états élémentaires d'une machine-outil.

La Figure 19 illustre la modélisation du comportement d'une machine-outil à base des cinq états élémentaires proposés. Ces états peuvent être utilisés pour modéliser un opérateur et développer des indicateurs de performance en prenant en compte les spécificités de celui-ci et notamment des contraintes occupationnelles et les facteurs humains introduits dans la section 2.1. Ceci afin d'éviter une estimation erronée de la performance d'un système de production à cause de l'omission des facteurs humains (Baines et al., 2004).

2.3. Conclusions

A partir de l'état de l'art abordé dans ce chapitre, une définition du concept de marge de manœuvre peut être proposée. Une marge de manœuvre représente l'étendu de la flexibilité offerte à un opérateur dans une situation de travail. Elle concerne différentes dimensions de

l'activité et peut concerner en particulier la cadence de travail. Cette flexibilité est importante quand un écart entre la capacité de l'opérateur et les exigences de la situation de travail est observé comme l'illustre la Figure 20. En disposant de ces marges, la productivité et les conditions de travail peuvent être améliorées en évitant des situations de blocage et en réduisant les contraintes psychosociales dans un système de production.

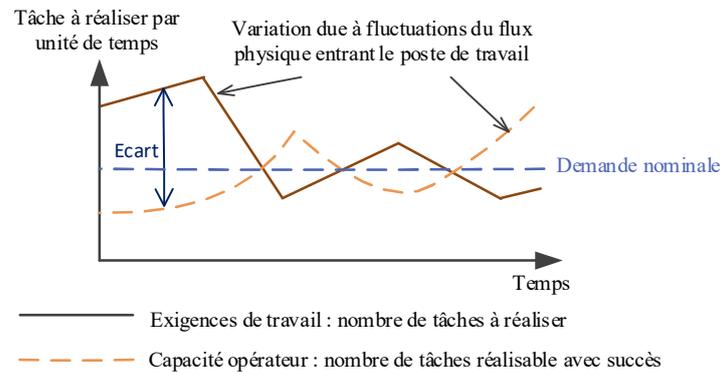


Figure 20 : Illustration de l'écart capacité opérateur exigence du travail dû à la variabilité.

Si le but derrière l'intégration (ou la restauration) des marges de manœuvre dans un système de production est de lui doter d'une certaine résilience face à la variabilité. Il est donc indispensable de caractériser celle-ci. Comme évoqué dans ce chapitre, la variabilité à deux sources :

- Une variabilité liée à des aspects dynamiques et stochastiques externes à l'opérateur (pannes, arrivés des ordres de fabrications, aléa de production ...) ;
- Une variabilité liée aux facteurs humains (la fatigue, de l'accoutumance, la motivation ou l'âge).

Ces variabilités se propagent via le flux physique d'un système de production. Comme le montre la section 2.2.1, la propagation de la variabilité dépend à la fois, de la conception du poste de travail et de l'aménagement du système. Ce dernier impacte également la productivité du système de production. Par conséquent, il est important de mener une réflexion holiste qui remet en cause la globalité du système dans l'objectif de s'assurer de sa productivité et de sa robustesse. Celle-ci, va permettre de limiter l'exposition directe de l'opérateur à cette variabilité et mieux gérer la variabilité causée par ce dernier (Figure 20).

Il est important de mener cette analyse pendant la phase de conception, car changer la structure du système pendant sa période d'exploitation est très coûteux, si ce n'est impossible. Face à cette conclusion, nous remettons en cause l'efficacité des approches localisées de prévention, qui traitent la problématique de la prévention d'une manière individuelle, au niveau de chaque poste de travail.

La section 2.2.2 a permis de mettre en exergue les limites des méthodes d'optimisation linéaire, qui ne considèrent pas les phénomènes stochastiques et dynamiques présents dans un système de

production. Les méthodes d'analyse et en particulier, la simulation, peuvent être combinées à ces techniques pour une meilleure appréhension de ces aspects. Par le biais de cette technique, l'analyse de la structure mais également des caractéristiques de chaque poste de travail peut être réalisée. Elle peut être également couplée à des modules d'optimisation, en occurrence via l'architecture MAGMA (section 2.2.2-H). Celle-ci permet de combiner plusieurs méthodes d'optimisation pour une meilleure résolution.

Chapitre 3 : Approche proposée

[...] « Le développement du modèle conceptuel de simulation demeure un art ; les principes et les guides concernant la simulation centralisée ou distribuée sont incomplets. » [...]

(Pace, 2000)

Résumé

Ce chapitre décrit l'approche proposée pour l'intégration des marges de manœuvre et l'évaluation de la productivité dans un système de production pendant ses phases de conception. Il s'agit d'une approche par simulation. A cet égard, ce chapitre présente l'approche employée pour évaluer les marges de manœuvre aussi bien que les critères productivité. Il présente également le modèle conceptuel de simulation proposé et aborde certains aspects en lien avec son implémentation.

.

L'état de l'art présenté dans le Chapitre 2 met en avant les possibilités offertes par la simulation. Il s'avère que cette technique est bien adaptée pour étudier les aspects dynamiques d'un système de production : elle permet d'évaluer la variabilité du flux physique et sa propagation dans un système de production. Par conséquent, elle représente la bonne approche pour répondre à la problématique soulevée dans ce mémoire de thèse.

De surcroît, en combinant cette technique avec un modèle mathématique et des méthodes d'optimisation, il est possible d'optimiser un critère qui combine la productivité du système et l'allocation des marges de manœuvre temporelles. Celles-ci permettent de limiter les facteurs de risque présents dans une situation de travail et par conséquent, garantir une conception d'un système de production assurant la productivité nécessaire et le bien être des opérateurs.

Pour mettre en place une telle approche, il faut :

- Développer un indicateur permettant d'évaluer les marges de manœuvre temporelles dans une situation de travail donnée. En qui concerne la productivité, puisque les indicateurs de performance permettant de mesurer celle-ci sont largement documentés dans la littérature. L'objectif est d'apporter des sorties qui permettent de calculer universellement les valeurs de ces indicateurs ;
- Développer la structure de la simulation permettant de reproduire le comportement d'un système de production afin de l'évaluer, en utilisant des indicateurs spécifiques, notamment, l'indicateur permettant d'évaluer les marges de manœuvre temporelle.

Pour répondre à ces deux objectifs, ce chapitre présente dans un premier temps, une proposition d'indicateurs pour évaluer les marges de manœuvre temporelles d'un opérateur sur un poste de charge. Une approche pour évaluer la performance productique est également proposée. Dans un deuxième temps, une vue détaillée de la structure de simulation est donnée. Un focus particulier est accordé à la construction du modèle conceptuel de la simulation. Il est décrit selon deux niveaux d'abstraction (un niveau élevé et un niveau détaillé) et selon deux vues : une vue comportementale et une vue structurelle. Le chapitre est clôturé par des conclusions et des discussions.

3.1. Développement d'indicateurs d'évaluation : productivité et conditions de travail

Comme introduit dans le chapitre 2, les marges de manœuvre permettent de limiter certains facteurs de risque liés à l'organisation du travail et d'apporter une prévention complémentaire aux approches biomécaniques. Ces marges de manœuvre ont également un impact positif sur la productivité : à court terme, elles permettent de réduire les situations de blocage du flux physique, de réduire les erreurs de production, voire les accidents du travail. À long terme, elles

contribuent à la réduction des maladies professionnelles et l'amélioration des conditions de travail, donc à la pérennité de l'entreprise.

Ce travail porte principalement sur les marges temporelles : instauration d'une flexibilité temporelle dans l'activité de travail. De ce fait, le but de cette section est de modéliser celle-ci, afin de développer un indicateur permettant d'évaluer les marges de manœuvre temporelles d'un opérateur dans une situation de travail. Un intérêt est également accordé à la productivité et son évaluation.

3.1.1. Evaluation de la marge de manœuvre temporelle dans une situation de travail.

Pour modéliser une marge de manœuvre temporelle, le modèle présenté dans la Figure 21 est considéré. La figure illustre une séquence de travail notée ws_i i.e. une suite d'actions que l'opérateur entreprend pour réaliser la tâche. Cette séquence de travail prend un temps $T_{ws(i)}$ variable à cause de différentes raisons (accoutumance, motivation, aléas, ...). Le lancement d'une séquence de travail est conditionné par l'arrivée d'un travail (événement E_i).

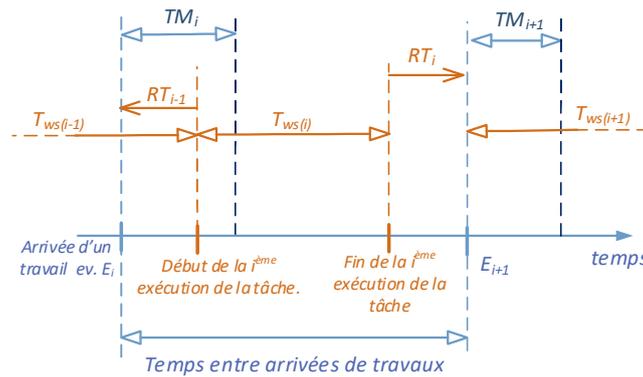


Figure 21 : Paramétrage temporel du séquençage de travail.

Comme introduit dans la section 2.1.2, les marges de manœuvre ont comme rôle d'assurer une adaptation entre la capacité de l'opérateur et les exigences de travail lorsqu'il y'a un écart entre les deux. Le premier paramètre introduit, noté RT , permet de vérifier ceci. Quand ce paramètre est négatif, ceci indique que l'opérateur n'est pas capable de réaliser la tâche dans le temps imposé par le flux : temps entre arrivées de travaux TEE (Figure 21).

Dans ce cas, l'opérateur doit disposer d'une marge temporelle lui permettant de retarder son travail au prochain cycle, ou de l'avancer lors du cycle précédent s'il est capable d'anticiper le retard. Le deuxième aspect n'est pas considéré. L'état de l'art réalisé ne démontre pas l'existence d'un modèle d'anticipation pour intégrer la réactivité de l'opérateur. Par conséquent, ce modèle n'est valide que pour des situations de travail où il n'existe pas de dispositif permettant de prévoir le rapport charge capacité : cas des travaux planifiés, afficheur d'état du système etc.

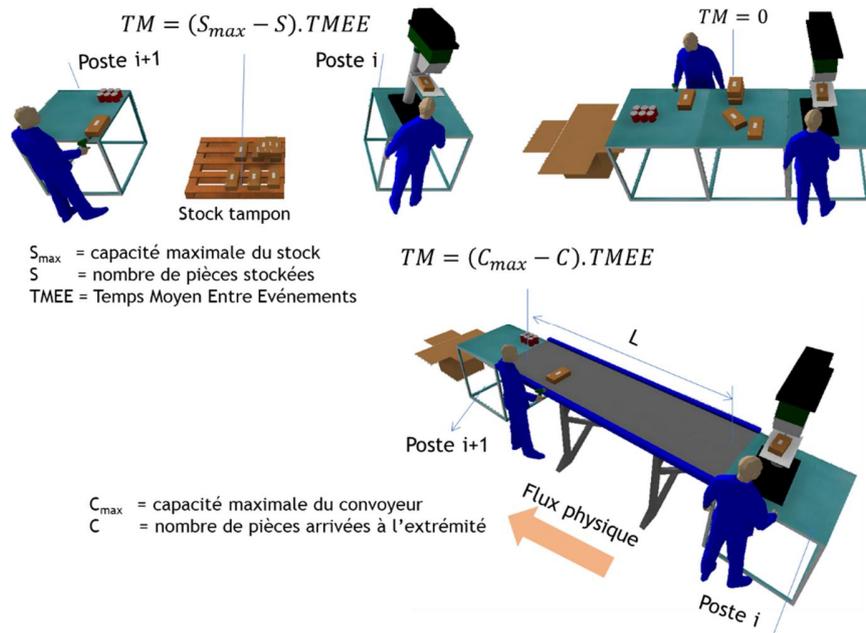


Figure 22 : Relation entre les paramètres physiques du poste de travail, le flux physique (TMEE) et les marges de manœuvre temporelles.

Le paramètre permettant de mesurer cette flexibilité est noté TM . Comme le montre la Figure 22, il dépend de la conception physique du poste de travail. Il représente le temps nécessaire pour remplir la zone tampon du moyen utilisé pour stocker les pièces ou les produits reçus par le poste du travail. L'expression du paramètre TM est donnée par (21).

$$TM_i = (c_{\max} - p_i).TMEE_i \quad (21)$$

Le paramètre c_{\max} représente la capacité maximale du stockage du moyen de réception. Le paramètre p_i est le nombre des pièces ou des produits stockés à l'exécution i . $TMEE$ représente le temps moyen entre événements, actualisé à chaque exécution de la séquence du travail ws_i selon l'expression suivante :

$$MTEE_i = \frac{E_i - E_{i-1} + (i-1).MTEE_{i-1}}{i} \quad \forall i \geq 1 \quad (22)$$

E_i représente la date d'arrivée d'un travail i . Le modèle traite les deux types du flux : poussé ou tiré. Dans le premier, la notification du travail est faite par l'arrivée d'un produit ou d'un lot de produit. Dans le deuxième, la notification du travail est faite pas des solutions Juste-A-Temps, notamment des Kanbans. Les situations dans lesquelles RT est négatif avec une marge temporelle TM qui ne permet pas d'assurer une possibilité de retardement sans blocage du flux physique sont considérées à risque. Comme ces situations ne sont pas totalement absentes dans un système de production, le rôle du concepteur est de limiter la probabilité de leur occurrence. Ainsi l'indicateur N_m permettant d'identifier des telles situations est défini comme suit :

$$N_m(i) = \begin{cases} TM_i + RT_{i-1} - \sigma & \text{si } F_i \leq F_{max} \\ TM_i + RT_{i-1} - \frac{1}{\mu} \cdot \ln\left(\frac{F_{max}}{F_{min}}\right) - \sigma & \text{si } F_i > F_{max} \end{cases} \quad (23)$$

Le paramètre μ est le taux de récupération de la fatigue, F_{max} est la valeur maximale de l'index de fatigue au-delà de laquelle l'opérateur ne peut pas continuer à réaliser l'activité. De même, F_{min} représente la valeur de l'index de fatigue à partir de laquelle l'opérateur peut reprendre son activité. Le paramètre σ représente le facteur de sécurité qui tient compte des erreurs du modèle. Sa valeur est jugée par un analyste expert.

Lorsque N_m est négatif, ceci indique que la marge TM_i est insuffisante pour absorber la valeur négative du RT_{i-1} (retard de l'exécution antérieure) et éventuellement le temps nécessaire pour faire une micro-pause. Si ceci est fréquent, le système est dit incapable d'assurer les marges temporelles nécessaires. La situation idéale consiste à avoir un indice N_m qui tend vers 0 en moyenne. Ainsi que des probabilités de dépassement d'une Limite Spécifique Inférieure LSL (le système ne donne pas de marges) et d'une Limite Spécifique Supérieure USL (un système qui offre des marges plus que nécessaire) soient maîtrisées. Ceci peut être exprimé par le système (24) :

$$\forall o \in O \quad \begin{cases} C_{mu}(o) = \frac{\phi(USL) - \phi(E[\widehat{N}_m(o)])}{P_u} \geq 1 \\ C_{ml}(o) = \frac{\phi(E[\widehat{N}_m(o)]) - \phi(LSL)}{P_l} \geq 1 \end{cases} \quad (24)$$

ϕ est la fonction de densité de probabilité de l'indice N_m . Elle ne suit pas nécessairement la distribution normale. $E[\widehat{N}_m(o)]$ est l'estimateur de la moyenne de l'indice N_m pour un opérateur o . P_l est la probabilité d'avoir un indice N_m compris entre LSL et 0 (des marges insuffisantes avec une probabilité P_l). P_u est la probabilité d'avoir un indice N_m compris entre 0 et USL . Ainsi, le but du concepteur est de concevoir des systèmes de production qui assurent des probabilités P_l et P_u satisfaisantes avec un N_m qui tend vers 0 en moyenne.

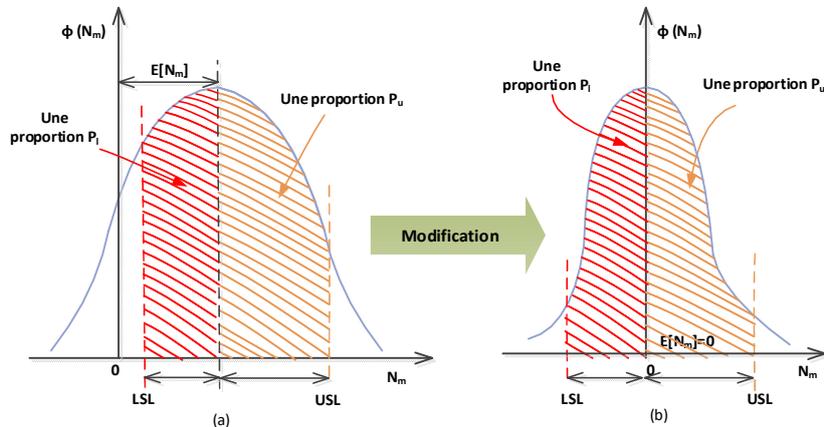


Figure 23 : (a)- Conception non valide (b)-conception qui vérifie le critère développé.

La Figure 23 illustre cette approche. La Figure 23-(a) représente un système dont les probabilités d'avoir N_m compris entre $E[N_m]$ et USL et entre LSL et $E[N_m]$ (respectivement P_u et P_l) sont considérées trop élevées. La moyenne $E[N_m]$ est différente de 0. Après modification, le concepteur cherche à centrer la fonction N_m et réduire sa variabilité pour avoir des valeurs comprises entre LSL et USL avec les probabilités cherchées.

En plus d'être employés comme contraintes de conception, l'indicateur N_m et les indices C_{ml} et C_{mu} peuvent être utilisés comme base d'évaluation pour comparer deux conceptions d'un système de production afin d'identifier celle qui offre les marges les plus adaptées aux opérateurs. Ils peuvent donc être employés pour construire une fonction objectif ou une fonction de fitness, si le but du concepteur est d'optimiser un critère en lien avec les marges de manœuvre :

$$\sum_{o=1}^o E[\widehat{N_m^o}]^2 \quad (25)$$

$$\sum_{o=1}^o C_{mu}(o) \quad (26)$$

$$\sum_{o=1}^o C_{ml}(o) \quad (27)$$

$$\sum_{o=1}^o (E[\widehat{N_m^o}] - \overline{E[\widehat{N_m^o}]})^2 \quad (28)$$

Ainsi, la minimisation de l'expression (25) permet d'assurer des marges adaptées à la situation de travail. Quant à l'expression (26), sa maximisation permet d'obtenir un système avec la meilleure capacité d'assurer des marges positives inférieures à USL . La maximisation de l'expression (27) donne un système avec la meilleure capacité d'assurer des marges négatives qui ne dépassent pas la limite inférieure LSL . La minimisation de l'expression (28) donne un système qui assure des marges bien réparties entre les opérateurs. Il est à noter qu'il est possible de combiner ces expressions afin de réaliser de l'optimisation multi-objectifs.

3.1.2. Evaluation de la productivité

En plus des indicateurs présentés dans la section précédente, permettant d'obtenir un système avec des marges de manœuvre suffisantes, voire optimales, des aspects en lien avec la productivité du système doivent être également considérés. Classiquement, le nombre des sorties N_{th} du système (produits, pièces, lots...) est lié à l'efficacité opérationnelle. Celle-ci doit être suffisante pour répondre à une demande estimée, notée D . En plus de cet aspect, les coûts d'exploitation des ressources doivent être considérés. Etant donné C_k , le coût d'exploitation d'une ressource k parmi K ressources et C_{max} le coût maximal de la valeur ajoutée par unité produite, estimé par une étude du marché, la somme des coûts d'exploitation répartie sur le

nombre total des sorties doit être inférieure à ce coût maximal. De ce fait, les contraintes de productivité peuvent être exprimées selon le système suivant :

$$\begin{cases} N_{th} \geq D \\ \frac{\sum_k^K C_k}{N_{th}} \leq C_{max} \end{cases} \quad (29)$$

Ces indicateurs peuvent être employés pour optimiser la performance productive, où le but du concepteur est de maximiser N_{th} ou de minimiser $\frac{\sum_k^K C_k}{N_{th}}$.

Il est clair que l'optimisation de ces critères et la satisfaction de ces contraintes dépendent du comportement des entités du système : les produits (P), les moyens (M) et les opérateurs (O). Pour observer celle-ci, les cinq états élémentaires illustrés dans la Figure 24 sont considérés :

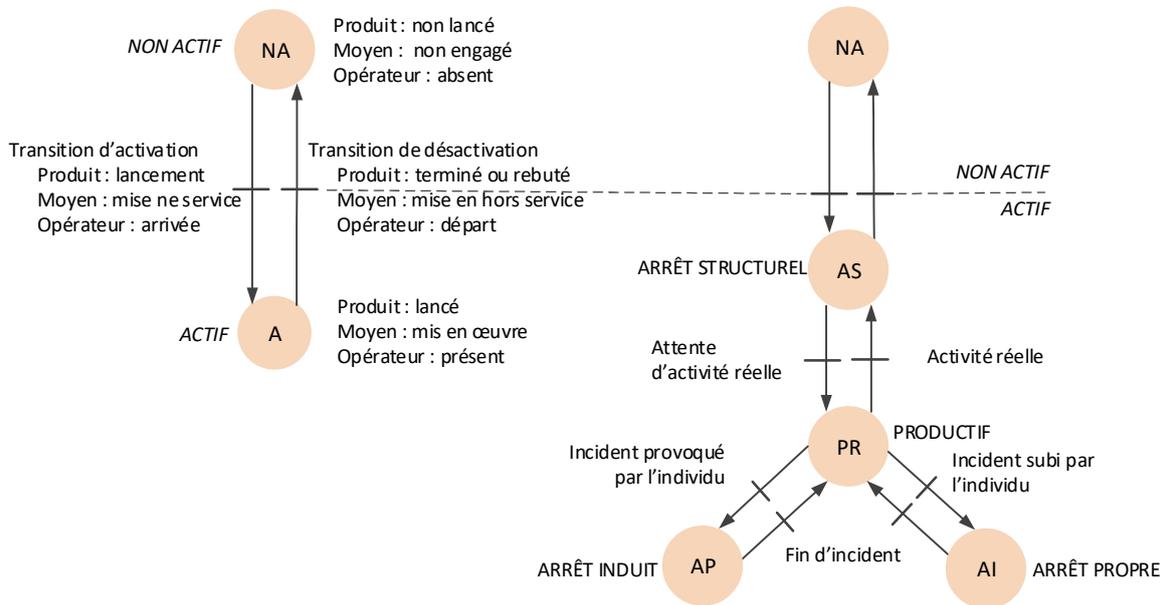


Figure 24 : Modélisation comportementale basée sur les états élémentaires.

Ces états peuvent être employés comme base d'observation. Ils peuvent être utilisés pour calculer des indicateurs de performance, notamment les plus classiques, afin d'identifier des pistes d'amélioration. En considérant T_x l'espérance de vie d'un état $x \in X = \{NA ; A ; AS ; PR ; AI ; AP\}$, comme exemples d'indicateurs peuvent être cités :

$$\text{Taux de Rendement Synthétique (TRS) ou taux d'Utilisation (U)} = \frac{T_{PR}}{T_A} \quad (30)$$

$$\text{Taux d'Arrêts Structurels (TAS)} = \frac{T_{AS}}{T_A} \quad (31)$$

$$\text{Taux d'Arrêts singuliers (TAG)} = \frac{T_{AI} + T_{AP}}{T_A} \quad (32)$$

Pour illustrer les possibilités d'exploitation de l'observation à base d'états élémentaires introduits dans cette section dans la construction d'indicateurs plus globaux (portant sur le comportement

du système en entier), l'indicateur « niveau des encours dans le systèmes » (noté w) et « nombre d'entités dans le système » (noté e) peuvent être considérés. Ces deux indicateurs peuvent être calculés à partir de l'observation des états élémentaires comme le montre les équations (33) et (34) :

$$w = \frac{1}{t_n} \sum_{t_1}^{t_n} \sum_{p_1}^{p_n} \chi_{AS}(x_i) \quad (33)$$

$$e = \frac{1}{t_n} \sum_{t_1}^{t_n} \sum_{p_1}^{p_n} \chi_A(x_i) \quad (34)$$

Ceci en considérant n dates d'observation (t_1 à t_n) et n produits (p_1 à p_n). Le paramètre x_i représente l'état de produit p_i à l'instant t_i . La fonction d'appartenance χ_A (χ_{AS}) définie de l'ensemble des états X vers $\{0;1\}$, renvoie 1 si x est égal à AS (A). De même, et selon les spécificités du système étudié, le concepteur peut définir d'autres indicateurs.

Ces indicateurs ont comme rôle de guider les actions d'amélioration d'une conception. Ces améliorations peuvent porter sur :

- La structure physique ou organisationnelle en utilisant l'indicateur TAS , w ou e ;
- La composition, pour améliorer la fiabilité et le taux d'utilisation des moyens en utilisant l'indicateur TRS ou TAG .

De même, ces indicateurs de comportement peuvent être employés pour construire une fonction objectif et optimiser un critère en lien avec le comportement du système.

3.1.3. Evaluation de la robustesse

En raison d'un ensemble de sources d'incertitudes qui portent sur les données d'entrée du modèle (de simulation ou d'optimisation), il est aussi intéressant de considérer la robustesse de la solution. Ainsi, si on considère une fonction objectif f , μ_f sa valeur optimale attendue en moyenne et σ_f sont écart type pour une population de solutions optimales pour un nombre de simulations donné, la fonction de robustesse f_r à optimiser est définie par :

$$f_r = \mu_f + \omega \cdot \sigma_f \quad (35)$$

Le paramètre ω est le poids de la déviation standard dans la fonction de robustesse.

Comme introduit dans le chapitre 2, la simulation permet de générer l'histoire artificielle nécessaire pour calculer les valeurs de ces indicateurs lors des phases de conception, ou lors d'un projet de changement. Il faut noter que, lors d'améliorations manuelles, le concepteur commence par une configuration de base et entreprend des modifications afin de satisfaire les contraintes ou pour améliorer une fonction objectif en lien avec la productivité, la robustesse ou les marges de manoeuvre et éventuellement d'autres contraintes de conception.

Lors d'une optimisation par programmation, la façon d'exploitation de ces indicateurs (en tant que contraintes ou fonctions objectifs) dépend de l'approche d'optimisation adoptée. Comme évoqué dans le chapitre 2, on s'intéresse principalement à la construction de la structure de simulation, sans aborder la structure d'optimisation. Par conséquent, on traite le premier cas de figure. L'intérêt est porté principalement à la structure de simulation.

3.2. Structure de la simulation

Dans cette section, la structure de simulation est présentée. Dans un premier temps, le contexte de l'utilisation de la simulation pour répondre à la problématique de la thèse est présenté. Dans un deuxième temps, le modèle conceptuel de simulation permettant d'intégrer des modèles de facteurs humains ainsi que des paramètres nécessaires pour l'évaluation des mages de manœuvre et la productivité est présenté. La section est clôturée par la présentation de certains aspects d'implémentation.

3.2.1. Contexte d'utilisation de la simulation

Pour étudier la dynamique d'un système de production et prévoir sa performance, l'approche par simulation a été adoptée. L'une des contributions de la thèse est le développement d'un outil de simulation permettant de réaliser ceci.

Des outils de simulation permettant de simuler des systèmes de production existent. Cependant, ces outils imposent un modèle conceptuel préconçu. Donc, l'utilisateur de ces logiciels instancie le modèle pour modéliser et simuler un système de production. En revanche, si le modèle du simulateur ne contient pas les entités permettant de modéliser des composantes réelles de système à étudier, l'outil ne peut pas être utilisé. C'est notamment le cas pour la modélisation de l'opérateur. Celle-ci demeure très limitée dans ces outils.

D'autant plus, les outils de simulation commerciaux ne mettent pas en ligne leurs modèles de simulation et les détails de leurs développements. Ceci rend l'utilisation de ces outils très risquée, car, l'analyste ignore en général, les hypothèses critiques sur lesquelles le développement de ces outils est basé. Cependant, des outils « open source » ou en français à « code-source ouvert » commencent à apparaître dans le marché, ce qui permet d'améliorer les possibilités d'utilisation de ces logiciels.

En ce qui concerne ces travaux de thèse, un démonstrateur de simulation est développé. La Figure 25 illustre le contexte d'utilisation du démonstrateur (ou simulateur). L'outil prend comme entrée un fichier de type .xml dans lequel une conception est détaillée. La vitesse d'avancement du temps doit être également spécifiée, car comme indiqué dans la section suivante, il s'agit d'une simulation par scan d'activité.

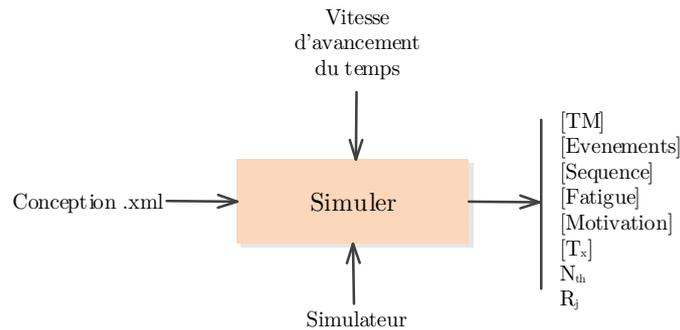


Figure 25 : Contexte d'utilisation de la simulation.

En tant que sorties, l'outil permet de générer les marges temporelles de chaque poste de travail (le vecteur [TM]), les événements d'arrivés de travaux et la date du début et de la fin d'une séquence de travail (vecteur [Sequence]). Ces deux derniers permettent de calculer le vecteur [RT]. Les sorties inclues les vecteurs [Fatigue], [Motivation], la production du système N_{th} et les produits rejetés R_j dus aux erreurs de production.

Ces sorties sont exploitées dans une deuxième étape pour effectuer des analyses et tracés de courbe via un logiciel dédié (Matlab). En tant que suite possible de développement, des interfaces d'affichage de courbes peuvent être faits pour rendre l'utilisation de l'outil plus ergonomique.

Le fichier « Conception », qui représente la structure de données d'entrée de l'outil, est composé de deux parties : structure physique et la structure organisationnelle. La première contient la description des composants du système (opérateurs, postes de travail manuels, moyens de transfert...). La deuxième explique l'organisation, les activités et les tâches à réaliser. La structure de ce fichier est détaillée dans l'annexe 2.

3.2.2. Architecture de l'outil de simulation développé

Comme expliqué dans la section 2.2.2-D, pour réaliser une simulation, il faut avoir trois composantes :

- Le modèle de simulation, il s'agit d'une représentation partielle du système à étudier ;
- L'exécutif de la simulation qui exploite le modèle conceptuel de la simulation pour simuler le comportement du système ;
- Afficheur pour visualiser l'évolution du système simulé.

Le découplage de ces trois composantes permet de garantir la bonne gestion de complexité du programme et une robustesse de l'outil. En partant de ces principes, l'architecture illustrée dans la Figure 26 est adoptée :

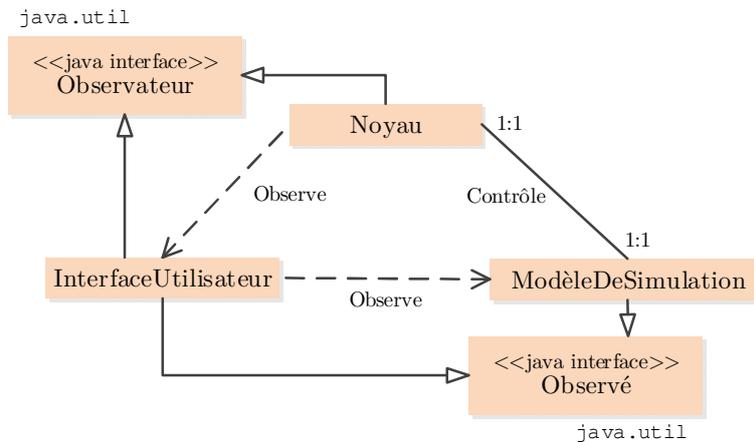


Figure 26 : Architecture de l'outil de simulation.

L'implémentation de l'outil est faite en langage JAVA. Le noyau permet de contrôler l'évolution du modèle de la simulation et contient notamment l'exécutif de la simulation. L'interface de l'outil permet de lancer des commandes, notamment le démarrage, la mise en pause et l'arrêt de la simulation. Elle observe le modèle et génère un rendu de la simulation.

Comme évoqué dans la section 2.2.2-D, le paradigme employé pour modéliser le système est un aspect très important dans la construction du modèle conceptuel de la simulation. Il affecte également le mécanisme de simulation. Dans la suite, le paradigme adopté est détaillé, le mécanisme de simulation est expliqué et le modèle conceptuel est présenté.

3.2.3. Paradigme pour la construction du modèle conceptuel de la simulation

La Figure 27 illustre le paradigme adopté pour la construction du modèle conceptuel. Deux vues sont considérées : la vue physique et la vue organisationnelle. Dans la vue physique on considère deux types d'agents : les agents cognitifs qui ont une capacité de perception et un comportement cognitif. Celui-là exploite les stimuli de l'environnement pour développer leur réponse. Le deuxième type d'agents est dit agent réflexif. Cet agent ne se dote pas de perception comme l'agent cognitif et se comporte selon les actions qu'il subit de l'environnement. Dans la vue organisationnelle, une structure de données permet d'associer les différentes activités, composées d'un ensemble de tâches, aux différents agents de la dimension physique. Nous appellerons cette structure « structure organisationnelle ».

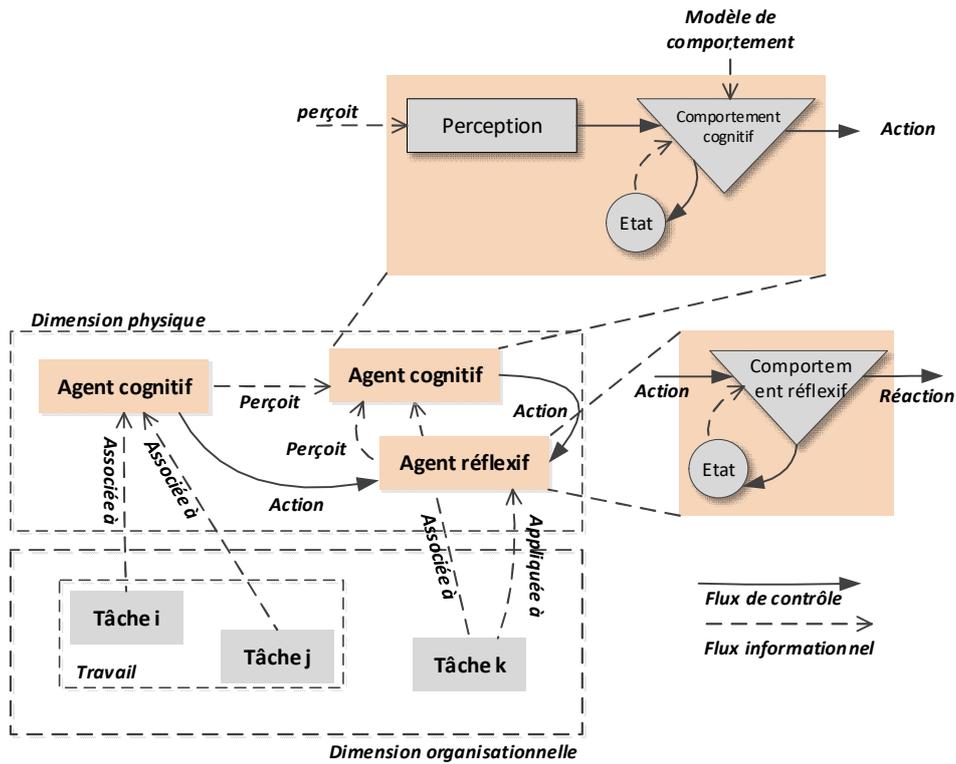


Figure 27: Paradigme adopté pour la construction du modèle.

En se basant sur ce paradigme, la suite de ce chapitre présente le mécanisme de la simulation employé et son modèle conceptuel.

3.2.4. Exécutif de la simulation

Pour réaliser la simulation, on considère un agent exécutif de simulation. Il contrôle le cycle de vie des agents de la simulation (ils ont comme finalité de reproduire le comportement des entités du système étudié). Cet agent contrôle également l'horloge et l'avancement de temps de simulé.

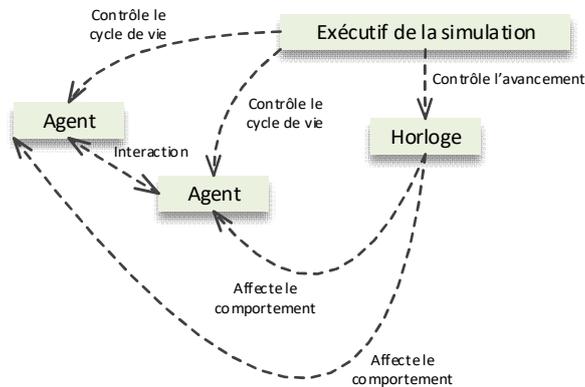


Figure 28: Mécanisme de simulation.

Chaque agent dispose d'un module de comportement qui teste des conditions d'activation d'activités. Cette approche peut être qualifiée de « simulation par scan distribué d'activités ». La première implication de cette distribution est la réduction du temps de simulation en comparaison avec la technique de scan d'activité classique. Cependant, elle génère d'autres défis technologiques, notamment la gestion de la désynchronisation des scans.

3.2.5. Approche globale pour la construction du modèle conceptuel de simulation

Comme présenté dans la section 2.2.2, il existe différentes approches pour la construction du modèle conceptuel de la simulation. Un intérêt particulier est accordé à l'approche de modélisation conceptuelle basée sur les activités (ABCmod). Cette méthode permet de définir le cadre général du processus de modélisation en considérant deux vues pour construire le modèle conceptuel : une vue structurelle et une vue comportementale. Elle considère également deux niveaux de détail. L'approche est du bas vers le haut : les entités sont interfacées en modélisant leurs interactions afin de remonter vers le comportement global du système.

L'approche adoptée dans ces travaux de thèse s'inspire de la méthode ABCmod à trois différences près :

- 1) En plus des entités, des agents sont considérés afin de modéliser les entités proactives du système ;
- 2) Pour modéliser le comportement des agents, en plus des activités, la notion d'état est considérée ;
- 3) En termes de langage de modélisation, l'utilisation des langages UML/SysML est proposée en se basant sur la recommandation de la littérature.

La section suivante détaille le modèle conceptuel de la simulation. Elle commence par présenter la modélisation structurelle d'un système de production. Deux niveaux de détail sont considérés. Dans une deuxième partie, la modélisation des comportements des entités et en particulier des agents est présentée

3.3. Modélisation structurelle générique d'un système de production

Dans cette section, une modélisation structurelle d'un système de production est proposée. La présentation de la modélisation est faite selon deux niveaux de détail. Le premier donne une vue d'ensemble, via un diagramme blocs de définition, les différentes entités (agents) considérés dans un système de production. Le deuxième détaille les différents attributs permettant de décrire les entités modélisées.

3.3.1. Niveau d'abstraction élevé

En adoptant le paradigme annoncé au début du chapitre ainsi que les principes de décomposition introduites dans la section 2.2.2-E, la structuration illustrée dans la Figure 29 est proposée. Pour modéliser un système de production, on considère des agents auxquels sont associés des comportements. Ceux-ci héritent des propriétés de la classe *comportementMFE* (FSMBehaviour) définie sous la bibliothèque JADE (Jade, 2015). Il s'agit d'un Framework (cadre applicatif) qui permet de développer des systèmes multi-agents. Ces comportements définissent la nature de l'agent à savoir un agent cognitif ou réflexif en utilisant des Machine à Etats Fini. D'où le suffixe MFE.

On considère trois types d'entités : un *AgentHumain*, qui sert à représenter les agents « humains » dans un système de production. L'agent *EntitéMobile* représente une entité mobile (moyen, produit ou autre). *EntitéFixe* représente un moyen fixe notamment : une machine, un poste de travail manuel, un stock ou un moyen de transfert. Chacun de ces agents hérite des attributs et des méthodes de la classe *Agent* définie sous la bibliothèque JADE. Chacune des déclinaisons de la classe *EntitéFixe* a un comportement spécifique. L'*AgentHumain* dispose de deux modules : le *Physique* et la *Cognition*, permettant à la fois de modéliser des caractéristiques physiques et cognitives de l'opérateur.

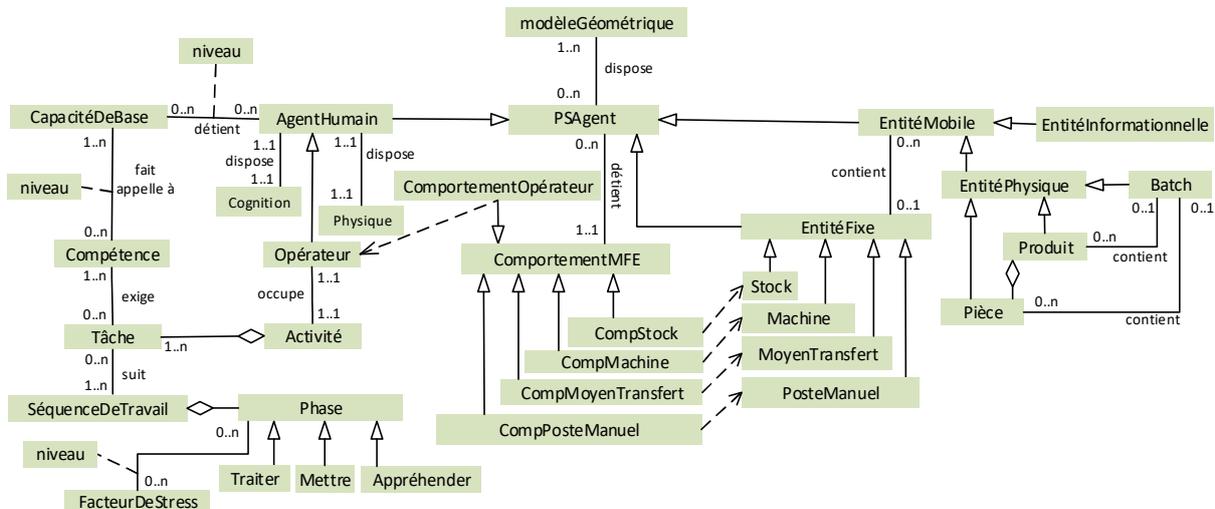


Figure 29 : Modèle conceptuel générique pour la simulation des systèmes de production.

L'Opérateur hérite des propriétés de l'*AgentHumain*. A chaque opérateur est associée une activité liée à plusieurs tâches. La réalisation de la tâche se fait selon une séquence de travail. Celle-ci est composée par des phases, notamment la phase « traiter » (Pr), « mettre » (Pt) et la phase « appréhender » (Gt). Une tâche requiert une Compétence. Celle-ci, requiert des capacités de base avec un certain niveau (section 2.1.5.A). De même, un *AgentHuman* (et donc un Opérateur) dispose d'un ensemble de capacités de base avec une maîtrise spécifique. Ceci à un

impact sur sa performance. Les différentes phases qui composent la séquence de travail contiennent des facteurs du stress. En fonction de ceux-ci, le taux de fatigue relatif à une phase donnée varie. Pour mieux décrire le modèle proposé, la suite de cette section présente les blocs du modèle d'une manière détaillée.

3.3.2. Niveau de modélisation détaillé

Dans cette section, le modèle conceptuel de simulation est présenté d'une manière détaillée. Pour faciliter la description, différentes parties du modèle sont traitées à part. Ainsi, dans un premier temps, la classe *PSAgent* et les blocs en lien avec la modélisation des facteurs humains sont présentés. Les blocs en lien avec l'activité du travail sont présentés dans un deuxième temps. La modélisation de la séquence du travail par des phases et la prise en compte des facteurs du stress est présentée. La section est clôturée par le détail de la modélisation des entités fixes et mobiles dans le système.

A. Modélisation d'Agent

La classe *PSAgent* qui représente la classe mère des agents du modèle hérite elle-même ses propriétés de la classe *Agent* de la bibliothèque JADE.

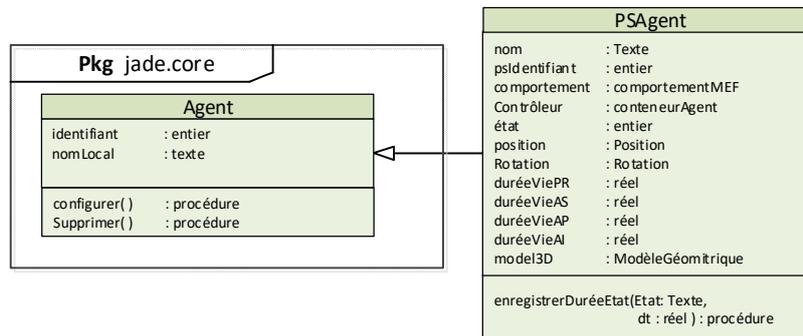


Figure 30 : Classe *PSAgent* du modèle de simulation.

Un agent de type *PSAgent* est identifié par l'attribut *psIdentifiant* : *entier*. L'attribut *nomLocal* permet d'associer un label à l'agent. La procédure *configurer()* permet de faire une configuration standard de l'agent avant de le lancer dans l'environnement de simulation. Elle est instanciée dans les sous classes afin de faire une configuration spécifique à chaque agent. La procédure *supprimer* permet de supprimer un agent de l'environnement de simulation. Ces deux procédures sont contenues dans la classe mère *Agent*. L'attribut *comportement* permet d'associer un comportement de type *ComportementMFE* à l'agent. Le *contrôleur* permet de contrôler l'agent, notamment de le lancer via la procédure *contrôleur.lancerAgent()* (ou *controler.start()*).

L'attribut *état* permet de spécifier l'indice de l'état sous laquelle se trouve l'agent. Les attributs *position* et *rotation* permettent de spécifier la position et l'orientation de l'agent. L'attribut

duréeViePR permet de stocker la durée de vie de l'état productique. Des attributs similaires sont prévus pour les autres états. La procédure *enregistrerDuréeEtat(état : Texte, dt : réel)* permet d'enregistrer le cumul des durées de vie d'un état.

Après avoir présenté en détail la classe de base, à savoir la classe *PSAgent*, la section suivante détaille les autres parties du modèle.

B. Modélisation de l'accoutumance et de la motivation : bloc Cognition

Comme présenté dans la section C, plusieurs modèles ont été proposés afin de décrire l'évolution de la courbe d'apprentissage. Nous avons porté notre intérêt au modèle proposé par (Jaber and Bonney, 1997). Selon les mêmes auteurs, ce modèle présente une bonne applicabilité sur une large gamme de tâches. Ce modèle établit le lien entre le temps opératoire dynamique T_{dyn} de la réalisation de la tâche, le temps de la première exécution T_{dn}^1 (noté T_{dyn_1} sous la classe Tâche) et l'expérience de l'opérateur. Celle-ci est évaluée par le nombre d'opérations traitées et mémorisées : la variable u_i notée u sous la classe Tâche. Le paramètre i désigne l'instant de l'observation. L'expérience de l'opérateur est mise à jour par l'équation (36) avant chaque exécution de la tâche sous la fonction *miseAJourExpérience()*(voir la Figure 31).

$$u_{i+1} = (u_i + n)^{1+f_i/b} (u_i + n + s_i)^{-f_i/b} \tag{36}$$

Le paramètre n représente le nombre d'unités traitées. Il est égal à 1 lorsqu'il s'agit d'une production unitaire, et à la capacité du lot dans le cas d'une production par lot.

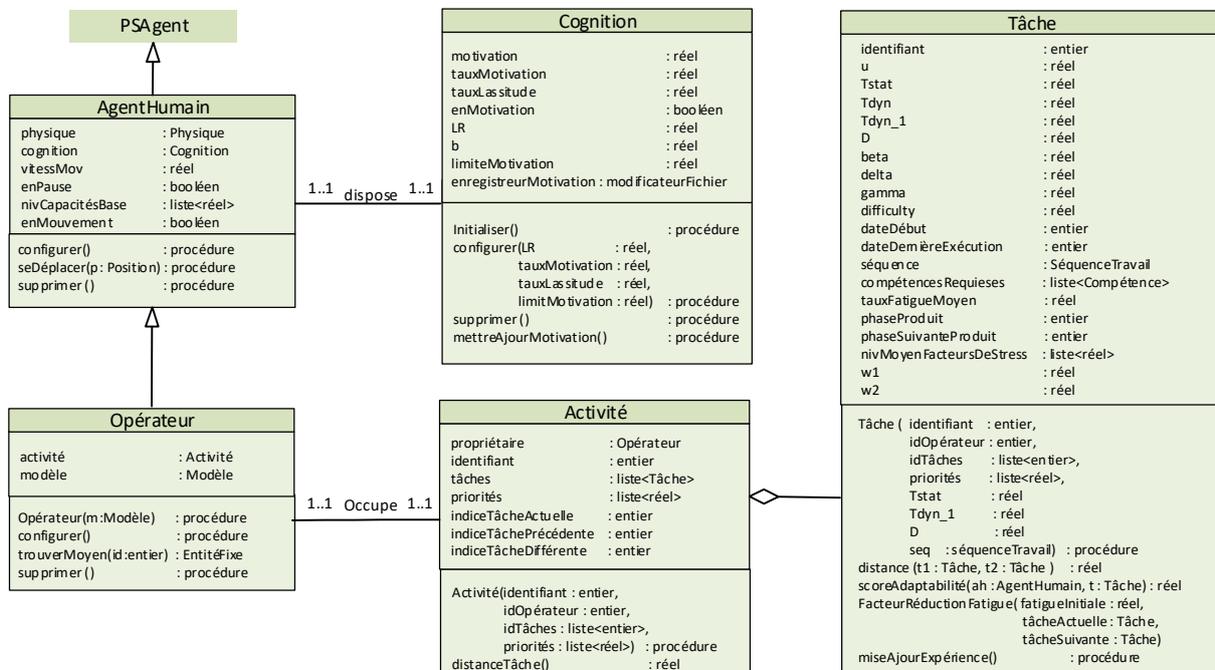


Figure 31 : Modélisation d'une activité et prise en compte de l'accoutumance et la motivation.

Les paramètres f_i et s_i qui interviennent dans l'équation (36) sont donnés par (37) et (38) :

$$f_i = \frac{b(1-b) \log(u_i + n)}{\log(1 + D / t(u_i + n))} \quad (37)$$

$$s_i = \left[\frac{1-b}{T_{dyn}^1} \tau_i + (u_i + n)^{1-b} \right]^{1/(1-b)} - (u_i + n) \quad (38)$$

On rappelle que τ_i est la durée d'interruption de travail et que D est la durée causant l'oubli total de la tâche. Le paramètre $t(u_i+n)$ est le temps nécessaire pour produire u_i+n unités d'une manière continue :

$$t(u_i + n) = \int_0^{u_i+n} T_{dyn}^1 \cdot y^{-b} \cdot dy = \frac{T_{dyn}^1}{1-b} \cdot (u_i + n)^{1-b} \quad (39)$$

Le paramètre b est le taux d'accoutumance. Il est donné par l'expression (40). LR est le taux d'accoutumance en pourcentage.

$$b = - \frac{\log(LR)}{\log(2)} \quad (40)$$

Les deux paramètres LR et b sont déclarés sous la classe Cognition. Le temps de l'exécution de de la tâche (la phase « traitement ») est donné par :

$$T_{PR} = T_{stat} + T_{dyn} \quad (41)$$

Avec T_{stat} le temps statique de la réalisation de la tâche. Celui-là n'est pas affecté par les facteurs humains. T_{dyn} est la composante dynamique du temps opératoire, qui varie selon la motivation, la fatigue, les capacités de base de l'opérateur ou à cause de l'âge. Elle est donnée par (42) :

$$T_{dyn} = T_{dyn}^1 \cdot \rho(a) \cdot \varphi(a) \left[\beta \cdot \frac{M^{UB} - M(t_i)}{M^{UB}} + \delta \cdot (u + n)^{-b} + \gamma \cdot SA(w, k) \right] \quad (42)$$

M représente le score de la motivation. M^{UB} est sa limite supérieure. $SA(w,k)$ est le score d'adaptabilité entre l'opérateur w et la tâche k . Il permet d'évaluer l'adéquation entre les caractéristiques personnelles de l'opérateur et les exigences de la tâche. Il est détaillé dans la section suivante. En termes d'implémentation, ce score est calculé par la procédure *Tâche.scoreAdaptabilité(ah : AgentHumain, t : Tâche)*. Les paramètres (attribut *beta*), (attribut *delta*) et (attribut *gamma*) dépendent de la tâche et relèvent la prévalence de l'impact respectif de la motivation, de l'accoutumance et des capacités de base de l'opérateur sur sa performance.

La fonction ρ donne le coefficient de réaction en fonction de l'âge. Le facteur d'endurance φ dépend également de l'âge a (attribut déclaré sous la classe Physique) de l'opérateur. Ils agissent

d'une manière multiplicative sur la composante dynamique du temps opératoire comme le suggère la littérature. En faisant l'agrégation des différents travaux faits dans ce domaine (section 2.1.5-E), la modélisation suivante est proposée :

$$\rho(a) = \begin{cases} 1 & \text{si } 18 < a \leq 30 \\ 1 + 0.01 \times a & \text{si } 30 < a \leq 65 \end{cases} \quad (43)$$

$$\varphi(a) = \begin{cases} 1 & \text{si } 18 < a \leq 25 \\ 1 + 0.0075 \times a & \text{si } 25 < a \leq 40 \\ 1 + 0.0125 \times a & \text{si } 40 < a \leq 65 \end{cases} \quad (44)$$

En ce qui concerne la motivation (M), le modèle proposé par (Azizi et al., 2010) est étendu pour prendre en considération les caractéristiques des tâches et de l'opérateur. Les équations (45) et (46) détaillent le modèle proposé :

$$\begin{cases} M_{i+1} = M^{\max} - (M^{\max} - M_i) \cdot e^{-\sigma \cdot EDT \cdot \text{distance}(k,k') \cdot \Delta t} & \text{si } M_i < M^{UB} \\ M_{i+1} = M^{UB} & \text{si } M_i \geq M^{UB} \end{cases} \quad (45)$$

Le système (45) décrit une augmentation exponentielle de la motivation après changement de tâches (de k à k') jusqu'à atteindre M^{UB} . La fonction $T\hat{a}che.distance(k, k')$ mesure la similitude entre les deux tâches k et k' . Cette fonction est détaillée dans la section suivante. EDT est le poids de l'impact de la similitude des tâches sur la variation de la motivation de l'opérateur w . Le paramètre σ désigne le taux de motivation de l'opérateur.

$$\begin{cases} M_{i+1} = M_{\min} + (M_i - M_{\min}) \cdot e^{-\frac{\theta \cdot \Delta t}{1 + ESA \times SA(w,k')}} & \text{si } M_i > M_{\min} \\ M_{i+1} = M_{\min} & \text{si } M_i \leq M_{\min} \end{cases} \quad (46)$$

Après un temps t_{limite} (correspond à l'attribut $T\hat{a}che.limiteMotivation$) donné par l'équation (47), la motivation commence à décroître comme décrit en équation (46). Le paramètre θ désigne le taux de démotivation de l'opérateur (attribut $Cognition.tauxLassitude$). ESA est l'effet de l'adaptabilité entre l'opérateur et la tâche sur la courbe de démotivation. Nous supposons que tant que l'adéquation entre l'opérateur et la tâche en termes de capacité de bases est meilleure, la démotivation est moins prononcée. Le score d'adaptabilité entre l'opérateur w et la tâche k' est donné par $SA(w,k')$. Le paramètre t_{UB} correspond à l'instant où M^{UB} est atteinte. $t_{k,k'}$ est l'instant où l'opérateur change de tâches.

$$t_{limite} = \max(t_{UB}, \frac{D_{k'}}{1 - ESA \cdot SA(w, k')} + t_{k,k'}) \quad (47)$$

Dans la suite, la modélisation des capacités de base et leur impact sur la performance de l'opérateur sont détaillés.

C. Modélisation des capacités de bases et des compétences de l'opérateur

Comme présenté dans la section 2.1.5-A, la performance de l'opérateur dépend, mise à part l'accoutumance et la motivation, de ses capacités de base physico-psycho motrice. Pour intégrer celle-ci, les entités (tracées en gras) de la Figure 32 sont considérées :

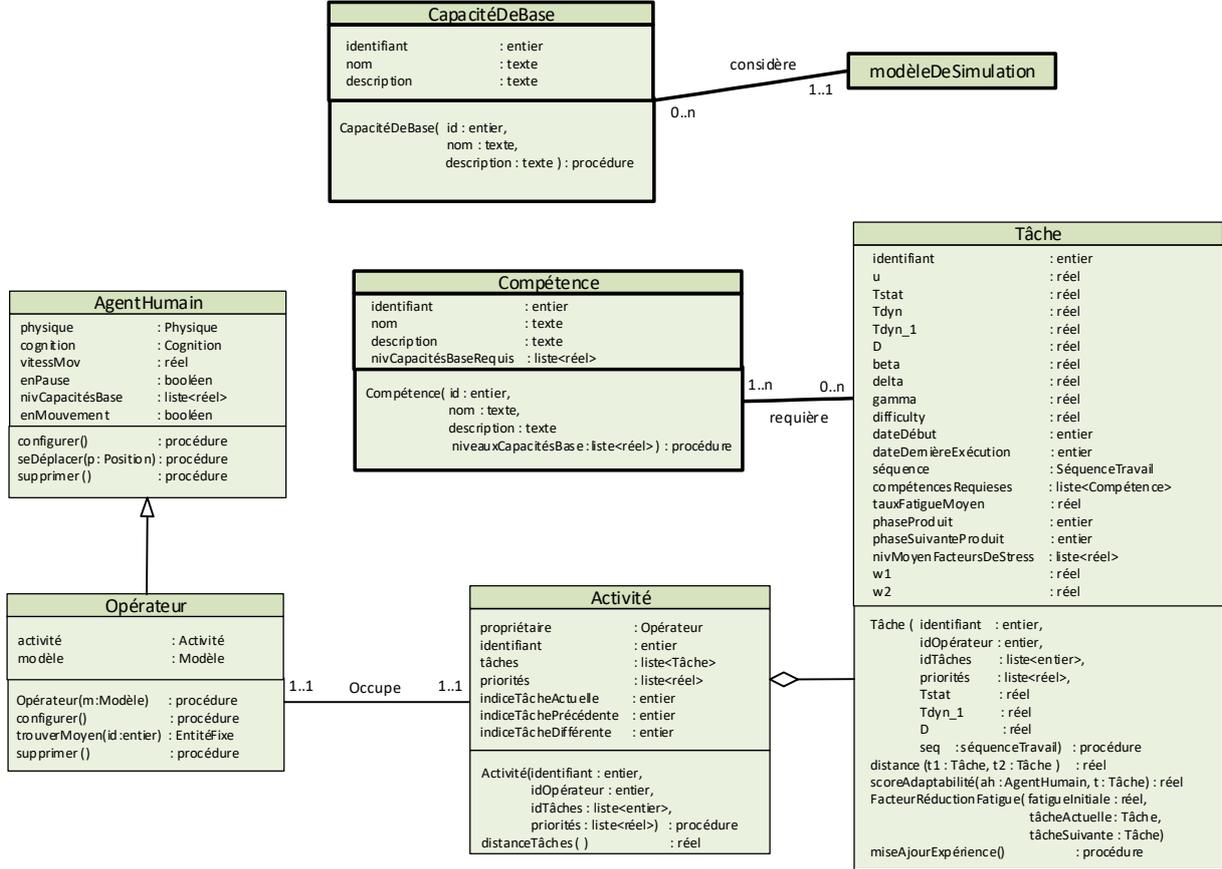


Figure 32 : Prise en compte des capacités de bases et des compétences dans le modèle d'activité.

La performance de l'opérateur en lien avec une compétence donnée, dépend des capacités de base qui sont considérées comme des caractéristiques personnelles de l'opérateur. Pour caractériser l'impact de la prédisposition de l'opérateur à réaliser une tâche donnée, on considère un vecteur de capacités de base $AgentHumain.nivCapacitéBase$: *liste<réel>*, dont chaque composante représente le niveau de cette capacité évaluée sur une échelle de 0 à 1. Si on considère A capacités, ce vecteur est donné par l'expression (48) :

$$w.nivCapacitéBase = (I_1^w, I_2^w, \dots, I_A^w) \quad (48)$$

Avec w étant une instantiation de la classe Opérateur et I_a^w est le niveau de maîtrise de la capacité de base a . De la même façon, pour chaque instantiation c de la classe Compétence, on

définit un vecteur de capacité de base $c.nivCapacitéBase : liste<réel>$. Ceci, permet de définir le Score d'Adaptabilité (SA) entre un opérateur w et une tâche T selon l'équation (49) :

$$SA(w, T) = \frac{A - \sum_a^A (I_a^w - \max_c(I_a^c))}{2A} \quad (49)$$

Ce score est utilisé pour caractériser l'impact de la prédisposition en termes de capacité de base sur la performance de l'opérateur. Il intervient dans le modèle de motivation et dans le modèle du temps opératoire décrit par l'équation (42).

D. Modélisation d'une séquence de tâche.

Comme présenté dans la vue globale du modèle, pour réaliser une tâche, l'opérateur suit une séquence de travail modélisée par la classe *SéquenceDeTravail* (Figure 33). Cette séquence est composée de phases, notamment une phase d'appréhension (Gt) de l'objet, sa Mise sur le moyen fixe (Pt), une phase de traitement (Pr), une phase d'alignement (I) et une phase de mouvement contrôlé (Mc) ainsi que d'autres phases qui pourront être rajoutées selon les spécificités de la tâche.

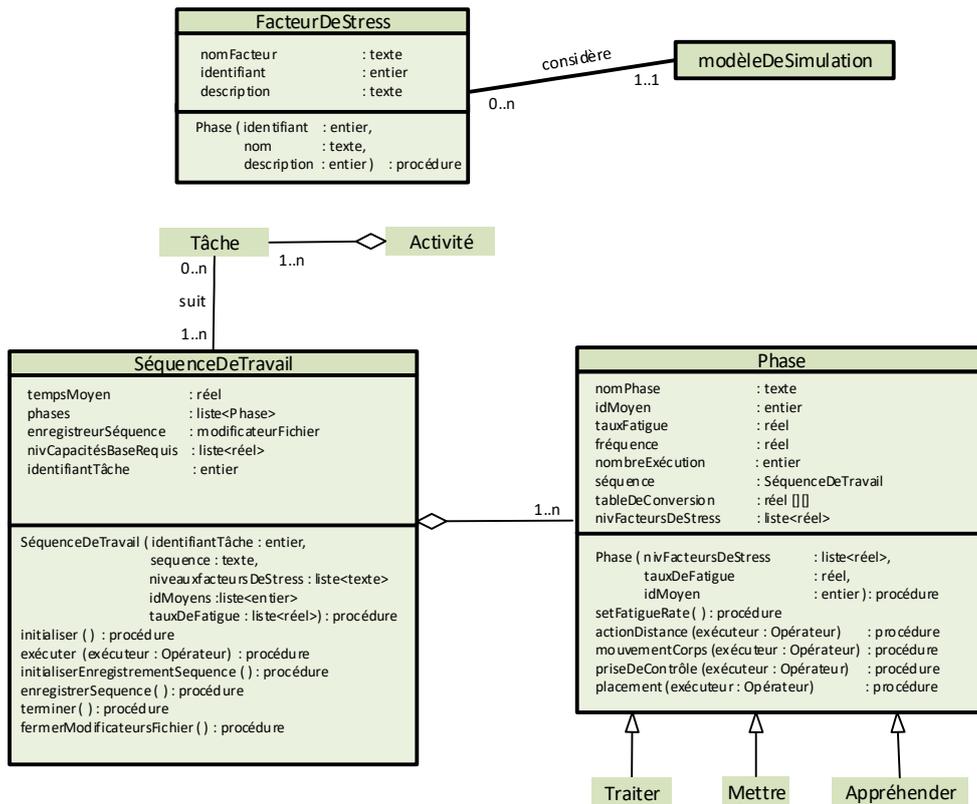


Figure 33 : Modélisation d'une séquence de travail.

Chacune de ses phases (Figure 34) hérite des attributs de la classe mère *Phase*. Dans celle-ci, les éléments de séquence notamment l'action de distance A (*Phase.actionDistance()*), le mouvement de corps B (*Phase.mouvementCorps()*), la prise de contrôle Gc (*Phase.priseDeContrôle()*) et le placement d'objet manipulé Pl (*Phase.placement()*) sont définis. Dans la procédure *exécuter ()* héritée de la classe mère *Phase*, le séquençement de ces éléments de séquence diffère selon la phase en question.

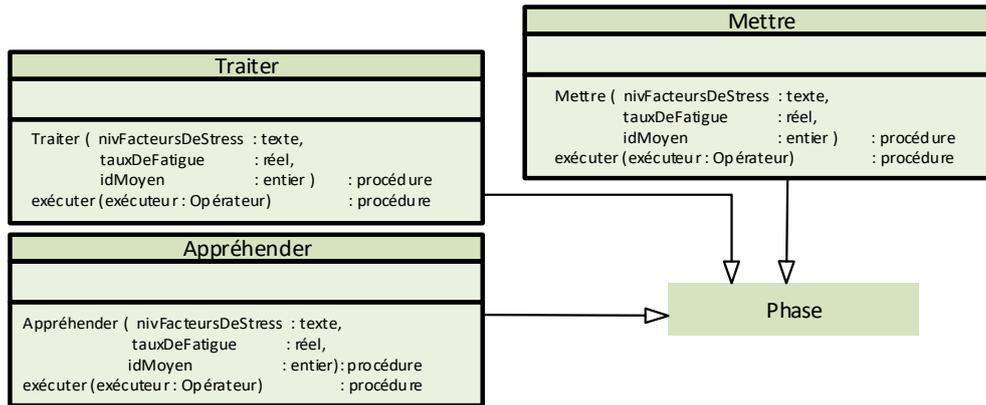


Figure 34 : Phases d'une séquence de travail.

Lors de sa création, une phase reçoit un vecteur *nivFacteursDeStress*. Celui-là évalue l'intensité d'un facteur de stress instanciant la *classe FacteurDeStress* déclarée dans le modèle de simulation. Si le taux de fatigue relatif à cette phase dans le fichier d'entrée de la simulation est égal à 0, ce vecteur est exploité pour calculer le taux de fatigue en utilisant le tableau *tableDeConversion* : réel [] []. Ce calcul est détaillé dans la section suivante qui introduit la classe physique.

E. Module physique : intégration de la fatigue et de l'âge.

Un des facteurs humains qui impacte la performance de l'opérateur est la fatigue. Celle-ci est multidimensionnelle et se manifeste selon différents aspects. La fatigue peut causer l'augmentation des erreurs, la diminution des sorties, l'insatisfaction au travail et par la suite une diminution de la performance voir même des accidents de travail. Comme présenté dans la section 2.1.5-B, différents modèles de fatigue ont été développés afin de prévoir la variation de celle-ci selon les conditions de travail.

Quelle que soit la nature de la fatigue physiologique ou psychologique, les modèles proposés pour évaluer la fatigue (en considérant la dépense énergétique, le rythme cardiaque ou la fatigue musculaire) décrivent une variation exponentielle de la fatigue. De même, nous proposons le modèle suivant :

$$F(t_{i+1}) = \begin{cases} 1 - (1 - F(t_i)) \cdot e^{-\lambda \cdot \Delta t} & \text{S'il y'a un travail entre } t_i \text{ et } t_{i+1} \\ F(t_i) \cdot e^{-\mu \cdot \Delta t} & \text{En arrêt de travail entre } t_i \text{ et } t_{i+1} \end{cases} \quad (50)$$

F est l'index de la fatigue (attribut *Physique.indiceDeFatigue*). Il varie de 0 à 1. Le paramètre Δt désigne la durée entre t_i et t_{i+1} . L'indice de fatigue F est mise à jour sous la procédure *Physique.miseAJourFatigue()* (Figure 35), évoquée à la fin d'exécution d'un élément de séquence A, B, Gc ou Pl. Les paramètres (attribut *Phase.tauxFatigue*) et (*Physique.tauxRécupération*) doivent être déterminés en analysant les facteurs de stress, physique et psychologique présents dans une phase donnée.

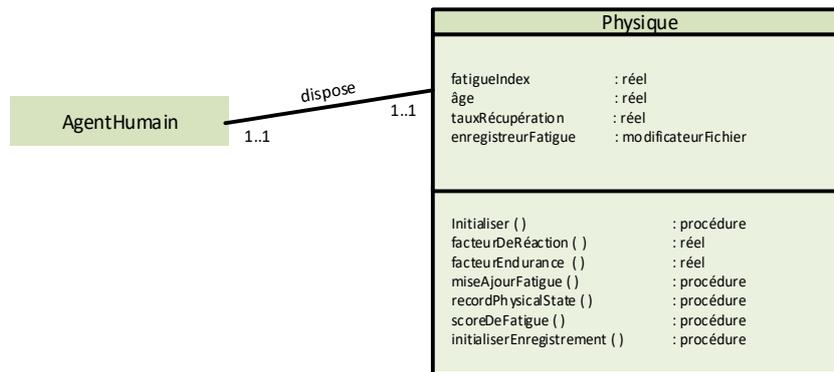


Figure 35 : Modélisation du physique de l'agent humain et intégration de la fatigue.

Pour calculer le taux de fatigue, considérons une phase p qui contient plusieurs facteurs de stress. Chacun de ces facteurs est identifié par son index s . Chaque facteur s a un niveau $I_{p,s}$ (mesuré en points) déterminé en utilisant les tables des temps de (l'annexe 1). La somme totale des niveaux de facteurs du stress est utilisée pour évaluer l'amplitude des sollicitations subies par l'opérateur et qui causent un taux spécifique d'accumulation de la fatigue. Cette somme est aussi utilisée, par le biais des mêmes tables pour trouver la proportion de temps de travail nécessaire à la récupération. En considérant f_p la fonction qui permet de lier entre cette somme et la proportion correspondante on a :

$$T_n = \frac{T_s}{1 + f_p\left(\sum_s I_{p,s}\right)} \quad (51)$$

T_s est le temps de travail standard (souvent 8h) et T_n est le temps de travail effectif. En implémentation, la fonction f_p est donné par *Phase.tableDeConversion*. En assumant que T_n implique une fatigue quasi-totale (associée à la valeur 0.99) et que $p \cdot T_n$ nécessaire pour la récupération ($F=0.01$), les équations (52) et (53) sont utilisées pour déterminer les paramètres λ et μ dans chaque phase :

$$\lambda_p = 2 \cdot \frac{1 + f_p \left(\sum_{s=1}^S l_{p,s} \right)}{T_s} \cdot \ln(10) \quad (52)$$

$$\mu_p = \frac{1 + f_p \left(\sum_{s=1}^S l_{p,s} \right)}{f_p \left(\sum_{s=1}^S l_{p,s} \right)} \cdot \ln(99) \quad (53)$$

En plus de la prédiction de l'évolution de la fatigue selon les conditions de travail, décrites dans chaque phase, le modèle de simulation doit permettre également de caractériser l'impact de l'enrichissement de l'activité (avoir plusieurs tâches dans la même activité) sur la fatigue. De même, l'effet de la réallocation des opérateurs aux postes de travail par le biais des rotations ou toute autre organisation dynamique doit être prédit par le modèle. Pour ces raisons, la modélisation suivante est proposée : un « niveau moyen » décrivant l'intensité de chaque facteur de stress présent dans une tâche est défini par (54) :

$$l_{T,s} = \sum_{p=1}^{p_T} F_p \cdot l_{p,s} \quad (54)$$

Ainsi, un vecteur des niveaux moyens de facteurs de stress $S_T = (l_{T,1}, l_{T,2}, \dots, l_{T,S})$ sous chaque tâche T est défini (l'attribut *Tâche.nivMoyenFacteursStress : liste <réel>*). p_T est le nombre des phases qui composent T . F_p est la proportion de la durée de la phase p sur la durée de la tâche (l'attribut *Phase.fréquence*). Elle est calculée dynamiquement après chaque exécution de la tâche et égale initialement à $1/p_T$. Le paramètre $l_{p,s}$ est le niveau du facteur de stress s présent dans la phase p .

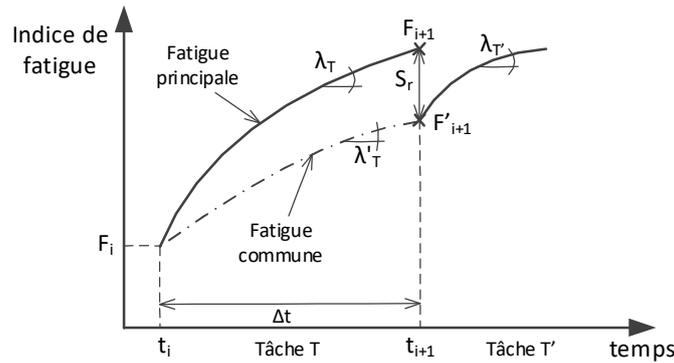


Figure 36: Impact de changement tâche sur la fatigue.

Pendant l'exécution de la tâche, l'opérateur est exposé à des facteurs de stress. Ceux-ci, génèrent de la tension selon différentes dimensions. L'amplitude ressentie de la fatigue concerne les dimensions de stress les plus sollicitées. S'il n'a pas eu une pause, cette fatigue ressentie au niveau d'une dimension donnée (un groupe musculaire spécifique, une capacité cognitive donnée

...) mène à la rupture du travail. En revanche, d'autres dimensions sont aussi sollicitées causant une fatigue collatérale mais qui n'est pas autant prononcée (Figure 36). Par conséquent, quand l'opérateur change de tâche, la fatigue ressentie diminue. Puisque la dimension la plus sollicitée, générant la sensation la plus prononcée de la fatigue est différente de celle de la tâche précédente. Ceci, est dû à la variation des facteurs de stress d'une tâche à une autre.

Comme évoqué dans la section 2.1.5-B, ce phénomène doit être pris en compte et en particulier dans la planification des rotations. Puisque l'objectif d'une telle organisation est de varier la nature des sollicitations subies par l'opérateur. Pour modéliser cette variation au niveau de la sensation de fatigue et son impact sur la performance, l'indice de réduction de fatigue S_r (la fonction *Tâche.facteurRéductionFatigue*) est introduit par la formule (55) :

$$F'_{i+1} = S_r \cdot F_{i+1} \quad (55)$$

Le paramètre F'_{i+1} désigne la fatigue collatérale à l'instant $i+1$. Elle représente la fatigue obtenue en considérant uniquement les facteurs de stress en commun entre la tâche T et la tâche T'. Elle représente le point de départ de l'indice de fatigue quand l'opérateur change de tâche. Le paramètre F_{i+1} représente l'indice de fatigue à la fin de la tâche T. L'expression de S_r est donnée par l'équation (56) :

$$S_r = 1 + \frac{1 - e^{(\lambda_T - \lambda'_T) \cdot \Delta t}}{e^{\lambda'_T \cdot \Delta t} - 1} \quad (56)$$

Le paramètre λ_T est le taux moyen d'accumulation de la fatigue lors de la tâche T calculé en utilisant l'équation (52) et en remplaçant $I_{p,s}$ par $I_{T,s}$. λ'_T est calculé en utilisant l'équation (57) :

$$\lambda'_T = 2 \cdot \frac{1 + f_p(S_T \cdot \sum_{s=1}^S \pi(S_T, e_s) \cdot e_s)}{T_s} \cdot \ln(10) \quad (57)$$

Avec $\pi(S_T, e_s)$ est l'opérateur de projection du S_T sur la dimension de facteur du stress s . Il est donné par (58) :

$$\pi(S_T, e_s) = \begin{cases} 0 & \text{if } S_T \cdot e_s = 0 \\ 1 & \text{if } S_T \cdot e_s \neq 0 \end{cases} \quad (58)$$

En intégrant dans le modèle de simulation, le facteur de l'accoutumance, de la fatigue, des capacités de base et de la motivation, il est possible de définir un modèle de fiabilité en exploitant les résultats de la littérature présentés dans 2.1.5-F :

$$PEH_i = (w_1 \times F_i + w_2 \times \frac{T_{dyn}}{T_1^{dyn}})^\alpha \quad (59)$$

F_i est l'indice de fatigue (l'attribut *Physique.indiceFatigue*). Les paramètres w_1 et w_2 (les attributs *Tâche.w1* et *Tâche.w2*) désigne les poids respectifs de la fatigue d'un côté, de l'accoutumance, de la motivation et des capacités de base de l'autre.

Après avoir présenté les différentes classes en lien avec les facteurs humains et la modélisation de l'opérateur ainsi que celle en lien avec l'activité de travail, dans la suite, la modélisation des moyens fixe et des entités mobile est présentée.

F. Modélisation des entités fixes

Les entités fixes représentent les moyens statiques employés par les opérateurs pour la réalisation des tâches. Comme illustré dans la Figure 37, la classe *EntitéFixe* contient des attributs en commun entre les différents moyens : stock, poste de travail manuel, machine et moyen de transfert. Par le biais du processus d'héritage, d'autres types de moyen peuvent être ajoutés au modèle.

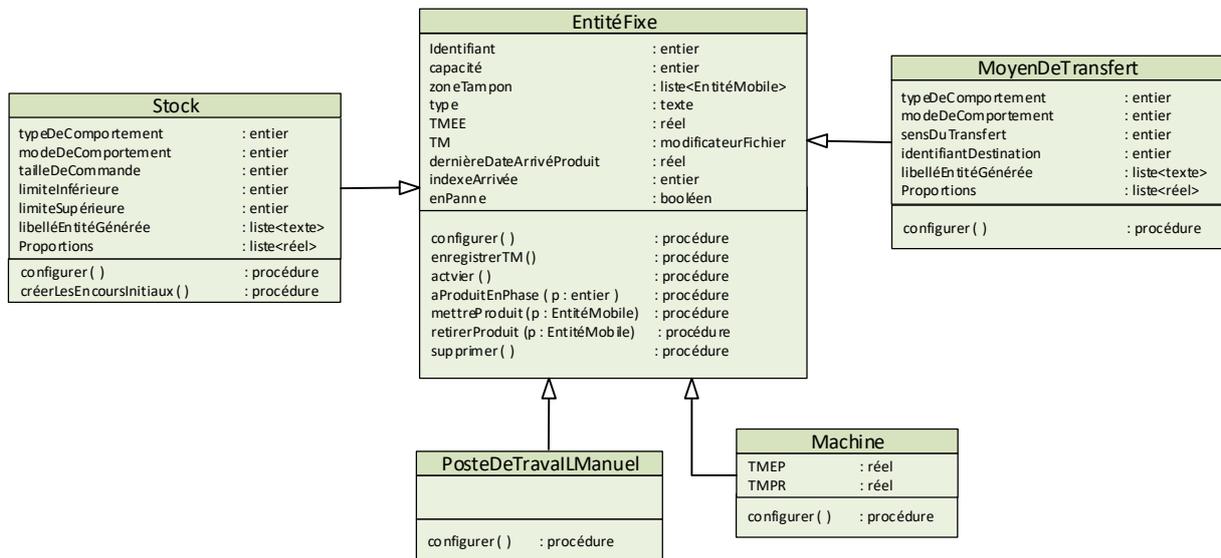


Figure 37 : Classe Entité fixe.

Chaque entité fixe est identifiée par un identifiant. Elle a une capacité de stockage et une zone tampon pour contenir des entités mobiles. Selon la nature de moyen, les capacités diffèrent. La valeur de cet attribut est définie dans le fichier d'entrée de la simulation. L'attribut *TMEE* désigne temps moyen entre événement. Il est donné par l'équation (22). L'attribut *dernièreDateArrivée* désigne la date de la dernière arrivée d'une entité mobile. Il est utilisé avec l'attribut *indexeArrivée* pour actualiser le *TMEE* (Temps Moyen Entre Evénements) à chaque entrée d'entité mobile. Ceci est fait sous la fonction *enregistrerTM()*. Celle-ci enregistre les valeurs du paramètre *TM* dans un fichier externe.

La fonction *aProduitEnPhase*(*p* : entier) rend un booléen (vrai-faux) en fonction de la présence d'un produit en phase dévolution *p* dans la zone tampon. Les procédures *mettreProduit()* *retirerProduit()* permettent de modifier la zone tampon en mettant ou en retirant une entité mobile. Elles sont invoquées par l'agent Opérateur pour simuler des manutentions. La procédure *activer()* permet d'activer l'entité fixe au lancement de la simulation. Selon la nature de l'entité fixe, la procédure *configurer()* permet d'initialiser ses paramètres.

En ce qui concerne l'agent *Stock* et l'agent *MoyenDeTransfert*, l'attribut *typeDeComportement* permet de spécifier un comportement particulier de ces agents. On distingue un comportement « *entrée infinie* », « *sortie infinie* ». L'attribut *modelDeComportement* spécifie la façon avec laquelle la reproduction d'un comportement donné est faite : distribution exponentielle, normale, loi d'erlang etc. L'attribut *paramètresComportement* permet de spécifier les paramètres de ces lois. L'attribut *libellésEntitésGénérées* contient les types des entités mobiles générées par les stocks ou les moyens de transfert quand ceux-ci ont un comportement « *entrée infinie* ».

L'attribut *destination* est spécifique au moyen de transfert. Il désigne l'identifiant du moyen auquel mène le moyen de transfert. Il égale à -1 quand le moyen de transfert n'est connecté à aucun autre moyen (notamment dans le cas d'une sortie du système). Les attributs *tailleDeCommande*, *limiteSupérieure*, *limiteInférieure* permet de paramétrer une politique d'approvisionnement des stocks.

En ce qui concerne l'agent machine, l'attribut *TMEP* désigne le temps moyen entre pannes. L'attribut *TMPR* désigne le temps moyen pour la réparation d'une machine. L'attribut *enPanne* est mis à la valeur « *vrai* » sous le comportement de cet agent quand une date de panne est atteinte lors de la simulation. Cette date est décidée aléatoirement (selon un modèle) à fur et à mesure de l'avancement du temps de simulation.

G. Modélisation des entités mobiles

Après avoir présenté la classe d'entités fixes, dans cette section, la classe *EntitéMobile* et ses sous classe sont présentés. Les entités mobiles représentent des entités transférables d'une entité fixe à l'autre. Ces entités peuvent représenter un produit, une pièce, un conteneur ou un lot. La Figure 38 illustre la classe Entité Mobile et sa classe dérivée Produit.

L'attribut *EntitéMobile.estArrivé* permet de savoir si l'entité mobile a atteint une entité fixe. Il passe de faux à vrais quand c'est le cas par le biais de la procédure *notifieArivée()*. Ceci déclenche aussi la procédure *EntitéFixe.enregistrerTM()* qui permet d'actualiser la marge de manœuvre temporelle d'un poste et de l'enregistrer dans un fichier externe.

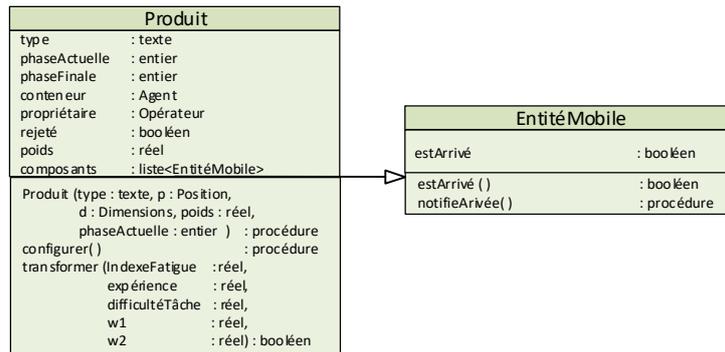


Figure 38 : classe Entité Mobile et Produit.

La classe *Produit* hérite des propriétés de la classe *EntitéMobile*. D'autres attributs sont ajoutés pour prendre en considération les spécificités de cette entité. L'attribut *type* contient le libellé du modèle du produit. L'attribut *phaseActuelle* décrit la phase de transformation du produit. Le conteneur spécifie l'entité fixe ou mobile (un lot par exemple) qui contient le produit. Le propriétaire désigne l'opérateur qui manipule le produit. Si celui-là n'est pas appréhendé par une entité de ce type, cet attribut est égal à la valeur *nul*. L'attribut *rejeté* est égal à « vrai », s'il y a eu une erreur de production causant le rejet du produit. L'attribut *composants* spécifie les entités mobiles qui composent le produit, à savoir des pièces ou d'autres sous-produits.

La classe *Produit* a un constructeur, une procédure *configureur()* qui permet d'initialiser certains paramètres de la classe ainsi que la procédure *transformer()*. Celle-ci cause l'évolution de la phase du produit et renvoi faux s'il y a eu erreur selon l'équation (59).

Après avoir présenté la modélisation structurelle du système de production en considérant deux niveaux de détail. Dans la suite de ce chapitre, la modélisation comportementale est détaillée. De la même façon, deux niveaux de détail sont considérés.

3.4. Modélisation comportementale d'un système de production

Dans cette section la modélisation des comportements des différentes entités structurelles est présentée. Deux niveaux d'abstraction sont considérés : Le premier exploite la théorie des Machines à Etats Finis (MEF) pour décrire le comportement global des agents. Le deuxième niveau aborde une modélisation sous-jacente qui exploite la notion d'activité. Dans les deux modélisations, le langage de modélisation SysML est utilisé. Le diagramme de classes (ou définition de bloc), le diagramme machine à états finis et le diagramme des activités sont utilisés pour représenter les deux niveaux de modélisation.

3.4.1. Niveau d'abstraction élevé

Pour modéliser le comportement des entités par des machines à états finis, quatre états sont considérés (voir section 2.2.3) :

- Etat d'arrêt structurel (AS) ;
- Etat productif (PR) ;
- Etat d'arrêt induit (AI) ;
- Etat d'arrêt propre (AP).

Pour modéliser ces états, la classe *comportement* (*behaviour*) de la bibliothèque jade est utilisée. Les différentes classes d'état étendent celle-ci comme illustré dans la Figure 39.

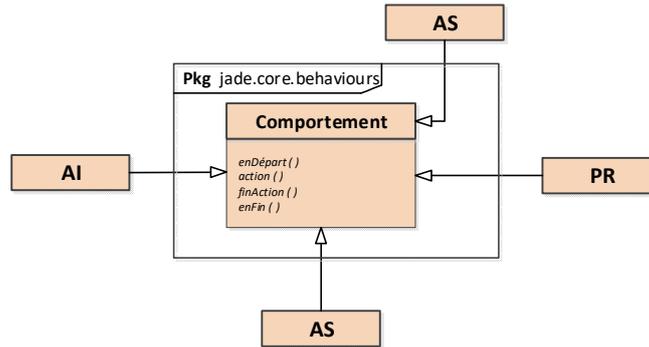


Figure 39 : Classes d'états élémentaires.

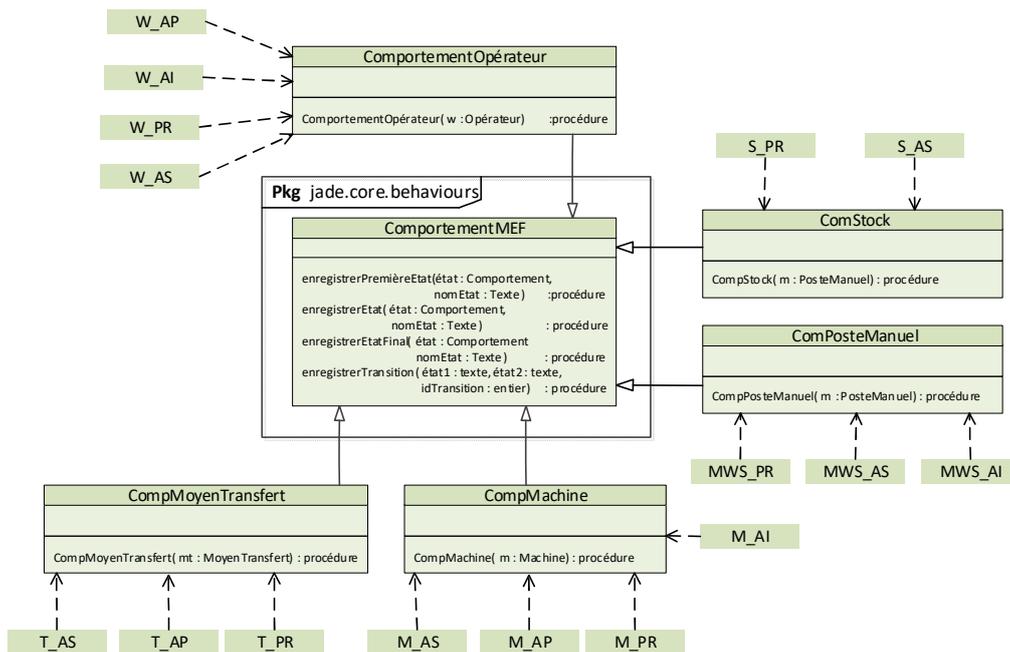


Figure 40 : Classes des comportements d'agents.

Ainsi, lorsqu'un état est consulté, la procédure *enDépart()* (*onStart()*) est évoquée. Elle permet d'initialiser ou de configurer des paramètres du comportement de l'agent ou de l'état elle-même. La procédure *action()* contient les activités à exécuter sous l'état. La fonction *finAction()* (*Done()*) permet tester des conditions des transitions et de renvoyer un entier qui correspond à la transition à activer. Celui-là est déclaré lors de l'enregistrement de la transition. La procédure

enFin() (*onEnd()*) permet effectuer les dernières opérations à la sortie de l'état, notamment des opérations statistiques comme l'enregistrement de la durée de vie de l'état.

Selon le comportement à modéliser (opérateur ou moyen), le contenu de ces procédures est déterminé. Par conséquent, il faut définir une classe d'état pour chaque agent (W_AP pour l'opérateur, M_AP pour machine ...). Ces états composent les classes de comportement qui héritent les propriétés de la classe *comportementMEF* (Figure 40). Une instantiation d'état est enregistrée sous un comportement via la procédure *enregistrerEtat(état : comportement, nomEtat)*. Lorsque les états nécessaires pour définir un comportement sont notifiés, les transitions sont enregistrées en utilisant la procédure *enregistrerTransition(état1 : texte, état2 : texte, idTransition : entier)*.

Dans les sections qui suivent, les comportements de trois entités sont présentés : l'opérateur, le moyen de transfert et le poste de travail manuel.

A. Modélisation du comportement de l'opérateur

Pour modéliser les états d'un opérateur, la machine à états finis illustrée dans la Figure 41 est utilisée. Les quatre états AS, AI, PR et AP sont considérés.

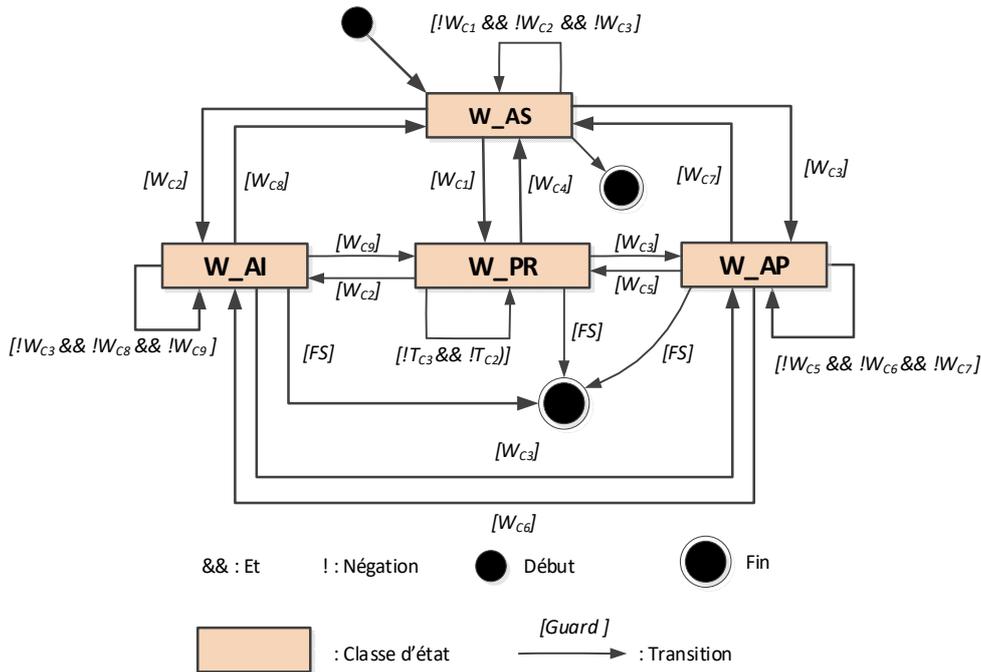


Figure 41 : Modélisation du comportement de l'agent opérateur.

Le Tableau 15 présente les spécifications de changement de statut qui régissent les transitions de la machine à états finis. Ces spécifications sont stochastiques et concernent des attributs continus et discrets. Quand l'agent opérateur entre en état PR, il exécute la séquence de travail.

Ce modèle sous-jacent est présenté dans la vue détaillée du modèle. La condition $[FS]$ désigne Fin de simulation.

Tableau 15: Les conditions de transition relatives à la MEF modélisant le comportement opérateur.

Condition	Expression
W_{C1}	La zone tampon de l'entité fixe utilisée pendant la phase « appréhender » de l'une des tâches n'est pas vide et contient le produit traité par la même tâche
W_{C2}	Les entités fixes utilisées pendant la phase « traiter » de toutes les tâches de l'opérateur sont en panne
W_{C3}	L'opérateur est en pause
W_{C4}	Les zones tampons des entités fixes utilisées pendant la phase « appréhender » des tâches prescrites sont toutes vides
W_{C5}	La zone tampon de l'entité fixe utilisée pendant la phase « appréhender » de l'une des tâches n'est pas vide et l'opérateur n'est pas en pause
W_{C6}	Les entités fixes utilisées pendant la phase « traiter » de toute les tâches sont en panne et l'opérateur est disponible
W_{C7}	Les zones tampon des entités fixes utilisées pendant la phase « appréhender » des tâches prescrites sont vides et l'opérateur est disponible
W_{C8}	Les entités fixes utilisées pendant la phase « traiter » de toutes les tâches sont disponibles et les zones tampons des entités fixes utilisées pour la phase « appréhender » des tâches sont toute vides
W_{C9}	L'entité fixe utilisée pendant la phase « traiter » de l'une des tâches est disponible et sa zone tampon n'est pas vide

Dans la suite, la modélisation d'un poste de travail manuel est présentée.

B. Modélisation d'un poste de travail manuel

Pour modéliser le comportement de la station de travail manuelle, on considère trois états : AS, PR et AI. La Figure 42 illustre la machine à états finis utilisée pour modéliser l'agent poste de travail manuel.

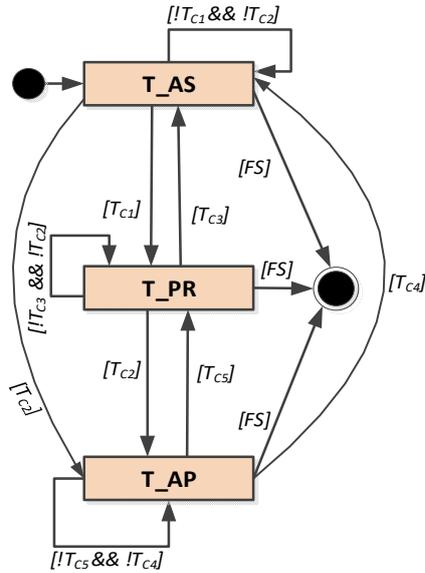


Figure 43 : Machine à états finis modélisant le moyen de transfert

Le Tableau 17 détaille les conditions de transition relatives à la machine à états finis modélisant le comportement d’un moyen de transfert.

Tableau 17 : Conditions de transitions relatives à la machine à états finis modélisant le comportement d’un agent moyen de transfert

Guard	Expression
T _{C1}	La zone tampon du moyen n’est pas vide
T _{C2}	Le moyen de transfert est en panne
T _{C3}	La zone tampon du moyen de transfert est vide
T _{C4}	Le moyen de transfert est en bon fonctionnement mais la zone tampon est vide
T _{C5}	Le moyen de transfert est en bon fonctionnement et la zone tampon n’est pas vide

La section suivante présente le niveau global du comportement de l’agent stock.

D. Modélisation globale de l’agent Stock

Pour modéliser le comportement de l’agent Stock, deux états sont considérés : *AS* et *PR* (Figure 44). L’état *PR* devient actif quand la zone tampon du stock contient au moins une entité mobile (la condition *S_c*). Sinon, l’attribut *état* est mis à la valeur *AS*.

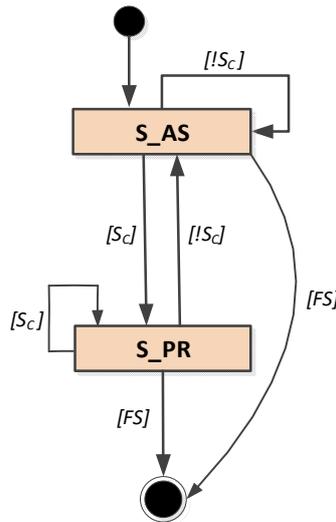


Figure 44 : Modélisation des comportements de l'agent stock.

Après avoir présenté une vue élevée des comportements des différents agents, la section suivante donne une vision plus détaillée des états.

3.4.2. Niveau d'abstraction détaillé

Dans cette section, la modélisation détaillée des comportements d'agents est abordée. Sous chaque état, les activités sous-jacentes sont modélisées. On distingue deux catégories d'activité à modéliser : les activités de transformation réalisées par les moyens techniques, appelées « activités techniques » et les activités humaines. L'objectif est de mettre en exergue les spécificités de ces dernières afin de leur accorder l'attention nécessaire, lors de processus de modélisation.

En ce qui concerne ces activités, une description structurée de celles-ci est nécessaire. La décomposition proposée par les méthodes des temps des mouvements prédéterminés peut être utilisées. Dans la suite, le niveau détaillé de la modélisation comportementale est présenté. Un intérêt particulier est accordé à la modélisation de la séquence de travail.

A. Comportement opérateur : vue détaillée

Comme évoqué au niveau élevé, sous chaque état élémentaire, quatre procédures et fonctions sont exécutées :

- La procédure *auDépart()* qui permet de configurer les variables de l'état et ceux du comportement englobant ;
- La procédure *action()* exécute les activités sous-jacentes à l'état ;
- La fonction *finAction()* qui renvoie la valeur « vrai » si l'action est achevée et les conditions de transition sont vérifiées. Sinon, elle renvoie la valeur « faux » ;

- La fonction *enFin()* renvoie l'entier correspondant à l'identifiants de la transition à effectuer. Elle est exploitée pour faire les derniers traitements avant de quitter l'état.

Le comportement de l'opérateur est composé de quatre états élémentaires :

- W_AS : état d'arrêt structurel ;
- W_PR : état productique ;
- W_AP : état d'arrêt propre ;
- W_AI : état d'arrêt induit ;

En accédant à l'état W_AS, sous *auDépart()*, l'instant d'accès est mémorisé. Ceci permet à la sortie de sauvegarder la durée de l'état (procédure *Agent.EnregistrerDuréeVie()*). Sous la procédure *action()*, la récupération est calculée selon l'équation (50) avec taux d'échantillonnage spécifié dans la classe *Physique*, en évoquant la procédure *Physique.enregistrerEtatPhysique()*. Sous *finAction()*, les conditions de transitions sont testées pour savoir si l'état sera quitté. Si oui, la procédure *enFin()* est activée et la motivation est mise à jour en exécutant la procédure *Cognition.mettreAJourMotivation(durée Etat : réel, distanceTâche : réel)*. Si dans l'état d'avant, l'opérateur était en état productique, la variable *distanceTâche* est égale à 1. Si l'état d'avant est aussi un arrêt de travail, cette variable est égale à 0.

En accédant à l'état productique, *auDépart()* est exécutée pour enregistrer l'instant d'accès et initialiser certaines variables. Durant la procédure *action()*, une des tâches qui compose l'activité de l'opérateur et dont les conditions d'exécution sont vérifiées et qui a la priorité la plus élevée (par rapport aux tâches réalisables) est sélectionnée. La séquence de travail qui correspond à la tâche en question est ensuite exécutée. La Figure 45 illustre une modélisation de la séquence de travail. Elle spécifiée dans le fichier d'entrée.

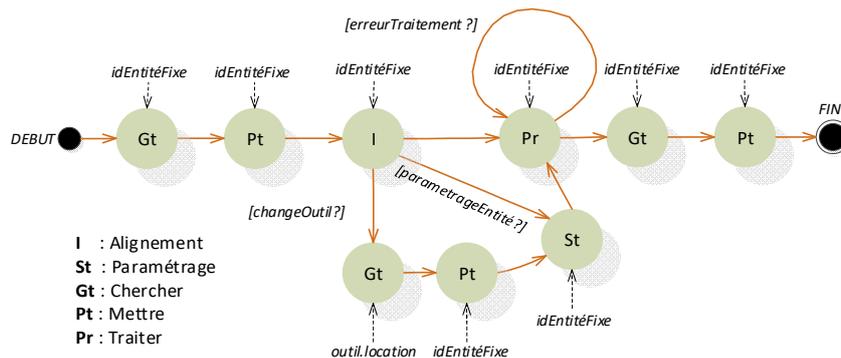


Figure 45 : Modélisation structurelle de la tâche en phases.

Le modèle représente le séquençage suivi par l'opérateur pour la réalisation de la tâche. Cette phase nécessite comme information l'entité fixe utilisée pour la réalisation de la phase. Un niveau sous-jacent de ces phases est nécessaire pour les modéliser complètement. La Figure 46 représente la modélisation de la phase « appréhender » (Gt) et « mettre » (Pt).

- La procédure *mettreAJourZoneTampon*(m : *MoyenDeTransfert*) est évoqué régulièrement quand le moyen de transfert à un comportement de type *entrée Infini* ou *sortieInfini*.

C. Comportement Stock

En ce qui concerne l'agent stock, deux états sont considérés :

- S_AS : état d'arrêt structurel ou le stock est vide ;
- S_PR : état productique ou le stock fait son rôle de stockage.

Sous les deux états et comme tous les autres comportement, l'enregistrement des durées d'activation des états est fait. Sous l'état productique la mise à jour de la zone tampon est faite régulièrement si l'agent joue le rôle d'une entrée du système. Quand la zone tampon reçoit une entité mobile, le paramètre MT est mise à jour est enregistré.

En ce qui concerne les autres comportements, notamment le comportement du poste de travail manuel et l'agent machine, la modélisation des états est faite de la même façon.

Le modèle conceptuel de simulation présenté dans ce chapitre est implémenté selon l'architecture qui a été spécifiée au début de ce chapitre. Un moteur graphique est associé au modèle de simulation et son exécutif. L'outil obtenu est baptisé AEN-PRO : **A**gent based **EN**gine for **PR**Oduction system simulation (annexe 3).

3.5. Conclusions

Dans ce chapitre, une méthode outillée basée sur la simulation est proposée. L'objectif est d'outiller le concepteur de système de production afin d'évaluer la performance et les marges de manœuvre temporelles dans un système de production.

Pour évaluer la performance opérationnelle, quatre états élémentaires sont proposés : Non-Actif (NA), Arrêt Structurel (AS), état Productique (PR) et l'état d'Arrêt Induit (AI). La distribution de ces états peut être employée pour évaluer le comportement individuel des entités de système de production et d'identifier des pistes d'amélioration. Comme discuté dans la section 3.1.2, ces états élémentaires peuvent être employés comme base d'observation pour construire des indicateurs de performance. Quelques exemples d'indicateurs classiques employés pour l'évaluation de la performance des systèmes de production ont été donnés tout en les liant avec les distributions de ces états.

En ce qui concerne les conditions de travail des opérateurs, ces travaux de thèse s'appuient sur le postulat suivant : le déficit des marges de manœuvre est un indicateur de risque potentiel. Ainsi, en se focalisant sur les marges de manœuvre temporelles, des paramètres temporels décrivant le séquencement d'une tâche sont proposés pour évaluer les marges temporelles. A base de ces paramètres, un indicateur de besoin en marge de manœuvre temporelle N_m est proposé Ainsi, le problème de la conception est formulé mathématiquement afin de guider le concepteur dans le

processus de conception, en cherchant une conception qui assure les marges nécessaires aux opérateurs et qui répond aux exigences de productivité.

Pour exploiter ces indicateurs, une structure de simulation basée sur les éléments suivants est proposée :

- Un modèle conceptuel de simulation ;
- Un exécutif de simulation ;
- Une interface graphique d'utilisateur.

Le modèle de simulation proposé décrit d'une manière générique un système de production. Pour son développement, le paradigme multi-agents est adopté. Ainsi une construction du bas vers le haut est réalisée : les entités d'un système de production sont modélisées et interfacées. Ceci permet, à partir d'une modélisation des entités et leurs interactions qui est relativement simple, de remonter vers le comportement global d'un système par émergence.

Un effort considérable a été fourni pour intégrer les différents facteurs humains qui peuvent potentiellement influencer la capacité de l'opérateur et par conséquent la performance d'un poste de charge. Ainsi, la fatigue, l'accoutumance, les capacités de bases de l'opérateur, la motivation et l'âge sont intégrés. L'influence de ces facteurs est considérée par une modélisation de la séquence de travail de l'opérateur. La modélisation des moyens techniques est également réalisée. Le modèle global obtenu permet de considérer de la variabilité issue de l'opérateur (en lien avec les facteurs humains) et des moyens techniques afin d'étudier son effet sur les marges de manœuvre temporelles et la productivité d'un système de production.

Concernant le paramétrage des modèles des facteurs humains, des données issues de méthodes empiriques sont utilisées. Le modèle de la fiabilité est paramétré en utilisant la méthode « Human Error Assessment and Reduction Technique » (HEART) (Kirwan, 1996). En ce qui concerne le modèle de fatigue, ces travaux de thèse exploite d'une manière originale les tableaux des temps de récupération (Annexe 1) pour déterminer le taux de fatigue et de récupération. Le modèle de la motivation proposé par (Azizi et al., 2010) est étendu pour prendre en compte les caractéristiques de la tâches et de l'opérateur. Ceci est fait en considérant les capacités de base de l'opérateur (Fleishman, 1967) qui sont sollicités lors de la réalisation de la tâches. Les niveaux de celles-ci sont évalués d'une manière qualitative par un expert.

L'exécutif de la simulation permet d'exécuter les opérations du modèle conceptuel et d'assurer son évolution dans le temps. Un mécanisme par scan d'activité a été adopté. Le paradigme multi-agents permet d'accélérer la simulation en effectuant un scan d'activité simultanément dans chaque agent.

Pour faciliter l'utilisation de l'outil, une interface graphique a été développée. Celle-ci permet de faire un rendu du comportement dynamique du système simulé. L'implémentation de l'outil est

faite en utilisant le langage JAVA et le cadre applicatif JADE permettant de développer des systèmes multi-agents. L'outil obtenu est baptisé AEN-PRO : « *Agent ENgine for PROduction system simulation* ».

Pour illustrer ces propositions, le chapitre suivant traite plusieurs cas d'études permettant d'illustrer l'utilisation de l'outil. Ces cas d'étude montrent que l'outil peut être employé pour répondre à des problèmes de conception en tenant en compte des deux aspects : productivité et marges de manœuvre temporelles.

Chapitre 4 : Cas d'étude

Résumé

Afin d'illustrer l'approche proposée ainsi que le cadre d'utilisation de l'outil développé, ce chapitre traite plusieurs cas d'étude proche des besoins d'ingénieurs d'industrialisation. Le chapitre commence par introduire le contexte d'utilisation de l'outil dans un processus de conception. Une expérimentation qui vise à vérifier l'outil est ensuite présentée. Dans une deuxième partie, deux cas d'étude sont présentés. L'un vise à évaluer les marges de manœuvre temporelles dans une conception préliminaire d'un système de production. Le second aborde des aspects organisationnels. Les cas d'étude démontrent la valeur ajoutée de l'outil et de l'approche proposée dans un processus de conception.

A travers le chapitre précédent, ces travaux de thèse proposent un modèle de simulation. Celui-ci permet d'approcher le comportement dynamique d'un system de production et prendre en considération les aspects de variabilité :

- Liés aux moyens techniques et en lien avec des aspects stochastiques d'un système de production ;
- Liés aux facteurs humains : accoutumance, fatigue, motivation, âge et capacités de base.

L'implémentation du modèle a donné lieu à l'outil AEN-PRO : **A**gent-based **EN**gine for **PRO**duction systems simulation.

L'objectif de ce dernier chapitre est de compléter la proposition de ces travaux de thèse, en présentant le contexte d'utilisation et des cas d'application concrets.

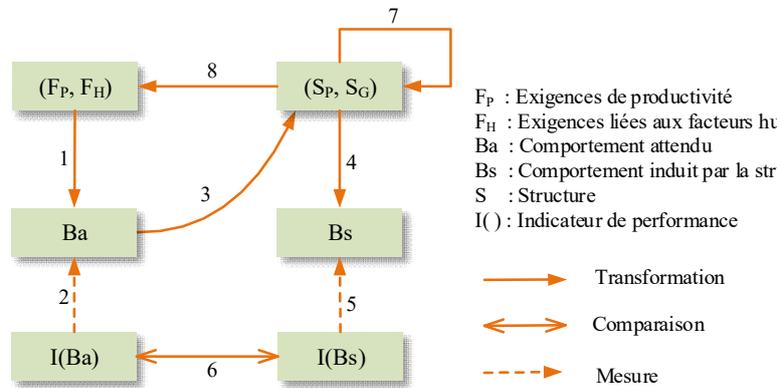


Figure 47 : Approche FBS (Gero and Kannengiesser, 2004).

L'outil développé peut être utilisé selon l'ontologie Function-Behavior-Structure (Gero and Kannengiesser, 2004). Comme le montre la Figure 47, à partir des exigences fonctionnelles, le concepteur déduit un comportement attendu B_a (transition 1). On distingue deux types d'exigences :

1. Des exigences en lien avec des aspects productique F_p ;
2. Des exigences en lien avec les facteurs humains F_H ;

Il faut noter que ces deux types d'exigences ne sont pas nécessairement découplés. Le comportement B_a est évalué par un ensemble d'indicateurs I (transition 2). Les mesures qui permettent de faire cette évaluation sont notées $I(B_a)$. Elles spécifient un seuil d'acceptation pour le comportement effectif B_s impliqué par la structure développée.

L'outil développé permet de simuler le comportement B_s . Le but est de valider la conception et de s'assurer qu'elle réponde aux exigences productiques. Les marges de manœuvre sont aussi évaluées en utilisant l'indicateur de marges de manœuvre temporelles introduit dans le chapitre

précédent. Ces ensembles de mesures notées $I(Bs)$ sont comparées à $I(Ba)$. Si les exigences de fonctionnement spécifiées par le cahier des charges ne sont pas assurées, la conception peut être améliorée. Ceci en adaptant une analyse des états élémentaires.

Dans ce chapitre, trois cas d'études sont traités. Le premier vise à vérifier l'outil développé en confrontant ses résultats à un cas réel. Le deuxième traite une conception préliminaire d'une ligne de production afin de donner une estimation de ses performances. Le troisième traite la dimension organisationnelle d'un système de production et en particulier, la politique d'allocation de pauses. La dernière partie de ce chapitre est réservée aux discussions et aux perspectives.

4.1. Vérification expérimentale

Afin de pouvoir confronter l'outil au réel, un banc expérimental spécifique a été conçu par l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité). Le but est de simuler analogiquement une situation de travail et de la comparer aux résultats numériques obtenus par l'outil. Le dispositif expérimental mis au point est illustré dans la Figure 48. Les résultats de l'expérience prévue initialement pour caractériser l'interaction entre l'âge de l'opérateur, les marges de manœuvre et les tensions résultantes de l'activité de travail, ont été publiés dans (Claudon et al., 2016).

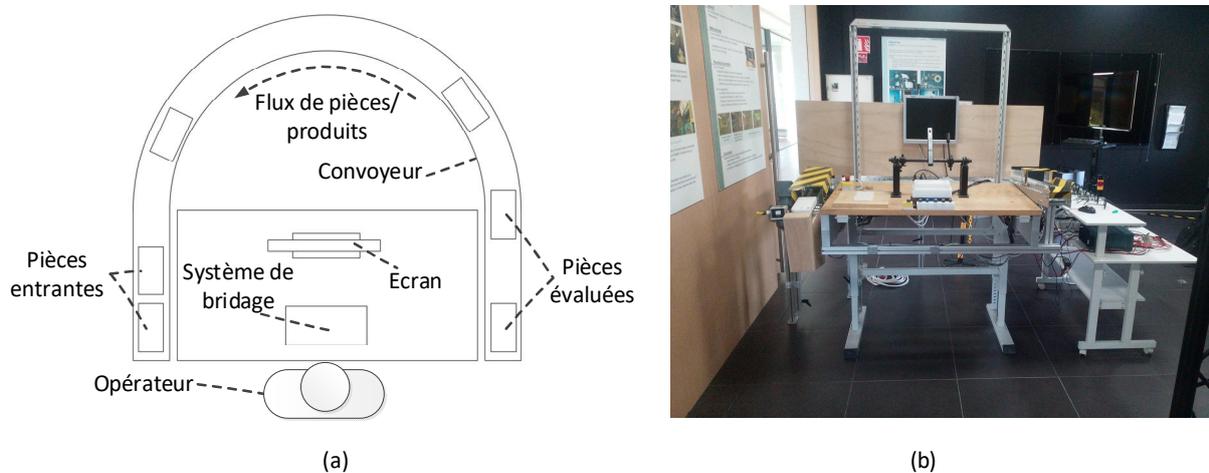


Figure 48 : (a) Schéma du banc expérimental utilisé (b) Photo du banc expérimental.

Le banc est composé d'un convoyeur assurant le transfert des pièces traitées. Lorsque l'opérateur finit son travail sur une pièce donnée, il la place dans le côté droit du convoyeur pour être évacuée. Ceci se fait selon une cadence imposée pour simuler un flux physique réel. La tâche de l'opérateur consiste à mettre la pièce reçue dans un système de maintien et d'effectuer les opérations suivantes :

1. Mettre cinq pions dans des emplacements appropriés et dans le bon ordre. Une option consiste à mettre un sixième pion ;
2. Appliquer une force en utilisant un levier ;
3. Retirer les pions ;
4. Mettre la pièce dans le convoyeur pour le transfert.

L'écran affiche la progression de la tâche : à savoir les pions installés ou enlevés et le niveau de la force appliquée. Elle permet d'indiquer si la pièce contient une option (six pions à installer). L'expérience se déroule pendant 100 minutes. Une pièce arrive toutes les 21 secondes et seulement trois peuvent être stockées le long du convoyeur. Dans la section suivante, la configuration de l'outil de simulation est donnée.

4.1.1. Paramétrage de l'outil de simulation

Pour modéliser la séquence de travail adoptée par l'opérateur lors de la réalisation de la tâche décrite au-dessous, on considère la séquence suivante : (Gt)-(Pt)-(Pr)-(Gt)-(Pt). Dans cette expérience, on considère la fatigue et l'accoutumance comme facteurs humains influençant la performance de l'opérateur. Le Tableau 18 détaille les points accordés aux facteurs de stress causant la fatigue dans chacune des phases. Les tableaux permettant de déterminer ces valeurs sont rappelés en annexe 1.

Tableau 18 : Intensité des facteurs de stress

		Appréhender (Gt)	Mettre (Pt)	Traiter (Pr)
Facteurs de stress physique	Force moyenne appliquée	0pt	0pt	16pt
	Posture	4pt	4pt	6pt
	Vibration	0pt	1pt	1pt
	Cycle	10pt	10pt	0pt
Facteurs de stress mental	Concentration/ anxiété	4pt	4pt	4pt
	Monotonie	5pt	5pt	5pt
	Tension visuelle	0pt	0pt	2pt

L'outil permet de générer les taux de fatigue pour chaque phase automatiquement. En ce qui concerne l'accoutumance T_{stzt} , elle est considérée nulle. Le paramètre T_{dyn}^1 observé lors de l'expérimentation est égal à 0.9 min. Le paramètre LR est considéré égal à 0.8 (capacité d'apprentissage moyenne) et le paramètre D est estimé à un mois.

En ce qui concerne le modèle de fiabilité, α est configuré à la valeur 1.0 en utilisant un calibrage avec les valeurs empiriques données par la Technique d'Estimation et de Réduction d'Erreur Humaine (TEREH) (Kirwan, 1996). Les paramètres w_1 et w_2 sont mis à la valeur 0,5 en considérant que la fatigue et l'accoutumance ont le même impact dans l'occurrence de l'erreur. La Figure 49 illustre la maquette configurée sous AEN-PRO.

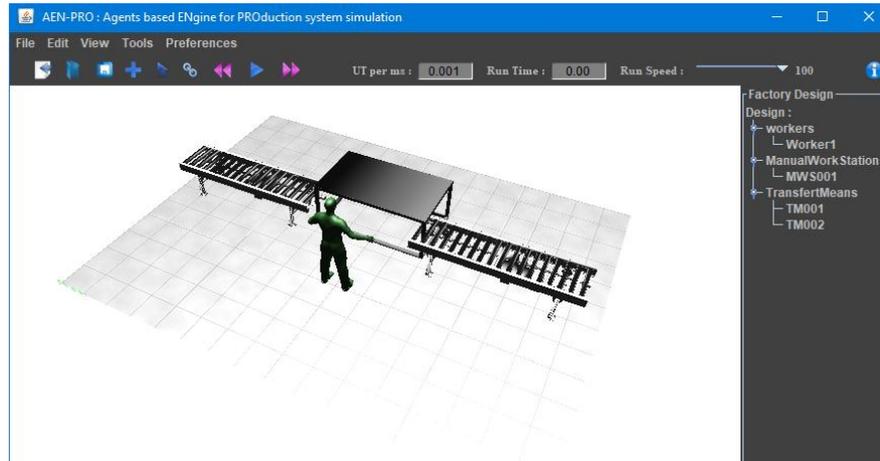


Figure 49 : Modélisation sous AEN-PRO du banc d'expérimentation.

Dans la suite, les résultats de la simulation sont présentés et confrontés à ceux fournis par l'expérimentation.

4.1.2. Résultats et discussion

Le Tableau 19 détaille les sorties du poste du travail simulé : le nombre de pièces traitées et parmi elles, celles qui sont rejetées à cause des erreurs de qualité (pions mal installés ou force appliquée insuffisante). Il donne également l'estimation obtenue par l'outil AEN-PRO. Sur les 217 opérations réalisées, l'erreur d'estimation de la performance productive ne dépasse pas 7.8 %. L'erreur de l'estimation des produit défectueux est de l'ordre de 10.5 %.

Tableau 19 : Résultats de l'expérimentation et de la simulation

Résultats	Résultats de l'expérimentation	Résultats de la simulation par AEN-PRO	Erreur relative
Nombre de pièces traitées	217	200	7.8 %
Nombre de pièces rejetées	19	17	10.5 %

Dans le même sens, la Figure 50 illustre un niveau de précision élevé concernant la prédiction des durées de traitement de la tâche obtenu à l'aide d'AEN-PRO. Toutefois, elle met également en évidence la présence de variations stochastiques dans les temps expérimentaux. Ces variations ne sont pas prises en compte dans le modèle de séquence de travail proposé dans ces travaux de thèse, qui est plutôt déterministe. Une suite possible de ces travaux de thèse consisterait à considérer ce type de variation et de les intégrer dans le modèle.

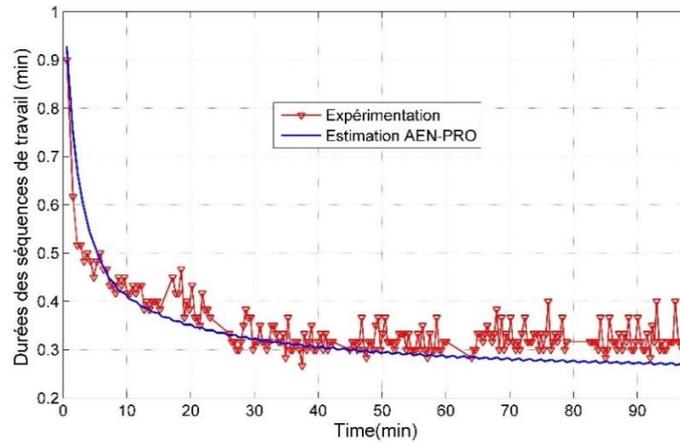


Figure 50 : Variation des temps de séquences du travail selon l'expérimentation et l'outil AEN-PRO.

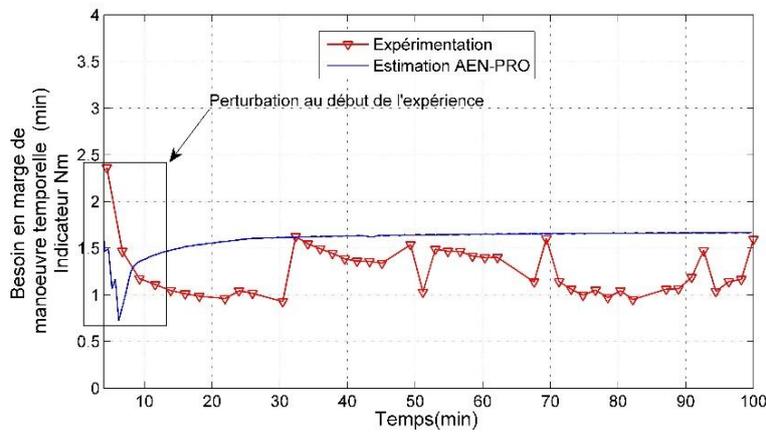


Figure 51 : Variation de l'indicateur N_m lors de l'expérience et son estimation par l'outil de simulation.

D'autre part, ces variations stochastiques se manifestent également au niveau de l'indicateur N_m permettant de mesurer les marges de manoeuvre temporelles de l'opérateur (Figure 51). De surcroit, l'erreur de modélisation suivante est à noter : sous l'outil AEN-PRO, la situation de travail est simulée avec une arrivée de pièce chaque 21s, dépassant la capacité de l'opérateur. Ceci provoque la chute du paramètre RT et donc de l'indicateur N_m dans la simulation. Lors de l'expérimentation, au début, le travail a été rythmé selon la capacité de l'opérateur. A fur est à mesure que celui-ci gagne de l'accoutumance, la cadence de travail a été augmentée pour atteindre l'exigence visée. D'où la divergence constatée au début de la courbe.

Cependant, l'approximation donnée par AEN-PRO est acceptable car l'erreur quadratique moyenne mesurée est de 0.1927 min^{-2} (un écart type de l'ordre de 0.4 min). L'erreur moyenne entre les résultats expérimentaux et la simulation est de 0.253 min (16.8%) sur 100 min de l'expérience. D'autant plus, les deux estimations de l'indicateur N_m (celle donnée par

l'expérimentation et celle générée par la simulation) amènent à la même conclusion : la marge de manœuvre temporelle est suffisante et comprise entre 1 min et 2 min.

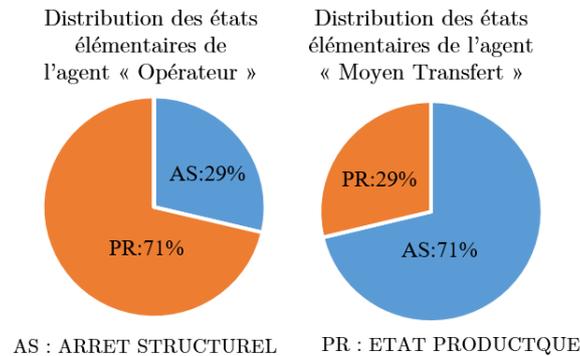


Figure 52 : Distribution des états élémentaires des agents « Opérateur » et « Moyen de Transfert ».

La Figure 52 présente la distribution des états élémentaires des agents « Opérateur » et « Moyen de transfert » (convoyeur). Ces distributions peuvent être analysées pour faire de l'amélioration au niveau de la productivité mais aussi par rapport aux conditions de travail si l'indicateur Nm indique des valeurs négatives. En l'occurrence, la figure met en évidence un certain taux d'arrêt structurel (AS) au niveau du moyen de transfert.

L'expérimentation réalisée permet d'effectuer une première vérification de l'outil par rapport à des configurations similaires à celles traitées dans cette section. Une validation de l'outil implique des expérimentations sur différentes configurations physiques et organisationnelles pour déterminer les limites du domaine de validité de cet outil. Cependant, nous estimons que des validations de style boîte blanche sont suffisantes. Les blocs élémentaires et les lois élémentaires qui régissent le comportement des agents sont tirés de la littérature et considérés comme valides. Nous considérons également que des configurations sous forme de postes manuels connectés par des convoyeurs peuvent être simulées car elles sont composées des mêmes briques de configuration validées dans cette section.

Après avoir présenté une première confrontation avec un cas réel, la suite de ce chapitre est consacrée à l'illustration des cas d'utilisation de l'outil. Le but est de comparer plusieurs configurations de systèmes de production et choisir celle qui présente les meilleurs résultats en termes de productivité et de conditions de travail : des marges de manœuvre temporelle adéquates.

4.2. Vérification des marges de manœuvre temporelle dans un système de production

Dans cette section, un cas d'étude est traité afin d'illustrer l'utilisation de l'outil pour la vérification d'une conception préliminaire. L'objectif est de vérifier les marges de manœuvre et la

productivité du système en considérant les aspects dynamiques, notamment ceux en lien avec les facteurs humains.

Tableau 20 : Opérations élémentaires pour montage d'un mixeur.

Opération	Description	Relation de précedence	Temps de réalisation (s)
1	Placer la boîte de commande sur le boîtier du mixeur en utilisant un tournevis automatique		9.3
2	Placer la base du moteur sur le toit du boîtier en utilisant un tournevis automatique		23.8
3	Mettre manuellement l'aimant sur la base du moteur		3.6
4	Placer la partie supérieure du moteur sur sa base en utilisant un tournevis automatique	3	12.7
5	Fixer la partie supérieure du moteur à sa base en utilisant un tournevis à embouts modifiables	4	11.1
6	Raccorder les fils à la boîte de commande par des pinces		30.9
7	Fixer la base du moteur au toit du boîtier par un tournevis	2	17.1
8	Connecter les fils au moteur en utilisant des pinces		16.7
9	Connecter le ventilateur au moteur par clé	1-5-6-7-8	18.9
10	Connecter le boîtier aux pieds en utilisant un tournevis automatique		11.5
11	Fixer la boîte de commande au toit du boîtier	1	14.3
12	Coller l'étiquette manuellement	11	10.3
13	Fixer les boutons en utilisant un tournevis	9	15.4
14	Fixer la tige supérieure à la main	2	18.6

Le Tableau 20 donne les opérations élémentaires nécessaires pour réaliser le produit (Xu et al., 2012) ; un modèle de mixeur. Des informations sur les conditions ergonomiques de la réalisation des opérations sont également accessibles. Pour ne pas alourdir le document, elles ne sont pas détaillées dans ce livrable.

Le regroupement des opérations permettant d'avoir un temps de cycle donné, de vérifier les critères biomécaniques (critère *Hand Level Activity* (HLA)) et de minimiser le nombre des stations donne la conception préliminaire du système de production est illustrée dans la Figure 53.

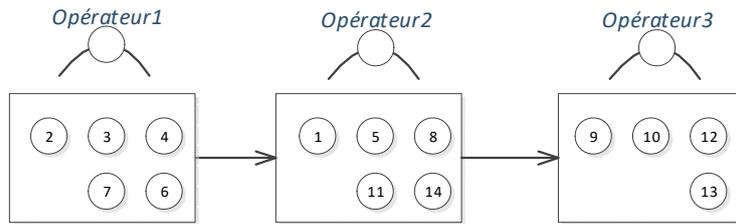


Figure 53 : Une conception préliminaire de la ligne d'assemblage.

Le regroupement obtenu permet de déterminer le temps de traitement de chaque tâche comme détaillé dans le Tableau 21. Dans ce cas d'étude, on considère comme facteurs humains la fatigue et l'accoutumance. Etant dans une phase de conception et n'ayant pas d'informations sur les opérateurs, l'effet de la motivation et des capacités personnelles n'est pas considéré. Concernant l'âge, une moyenne de 30 ans est considérée.

Tableau 21 : Temps de traitement des tâches et la force moyenne appliquée par l'opérateur

Tâche (station de travail)	1	2	3
Temps de traitement (mn)	1.468	1.167	0.935
Force moyenne appliquée (lb)	23.2	34.3	20.73

4.2.1. Paramétrage de l'outil de simulation

En ce qui concerne la fatigue, les facteurs de stress présents dans la phase « Traiter » de chacune des tâches sont détaillés dans le Tableau 22. Le Tableau 23 donne les facteurs de stress présents dans les phases « Appréhender » et « Mettre ». Ces deux phases sont considérées semblables pour les trois tâches. L'évaluation de ces facteurs est obtenue par analyse des opérations composant chacune des phases et en se référant aux tableaux des temps de récupération (annexe 1).

Tableau 22 : Facteurs de stress présents dans la phase traiter des différentes tâches ainsi que leurs intensités

Tâche	Force appliquée	Posture	Vibration	Concentration /anxiété	Monotonie	Cycle
1	28pt	4pt	1pt	4pt	5pt	3pt
2	38pt	4pt	1pt	4pt	5pt	5pt
3	26pt	4pt	1pt	4pt	5pt	6pt

En ce qui concerne la fiabilité, en employant la méthode TEREH (section 2.1.5-F), les trois tâches sont considérées relativement simples, réalisées rapidement avec une attention légère. Ceci donne une probabilité d'erreur nominale $HEP_n=0.09$ avec une fatigue normale de $F=0.4$ et une expérience moyenne de $u=100$. Concernant les conditions productrices d'erreur, le manque d'expérience et d'accoutumance ($u=0$) peut augmenter la probabilité d'erreur de 3. Ceci donne le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} HEP_0 = (w_2)^\alpha \quad F = 0, \frac{T_{dyn}}{T_{dyn}^1} = 1 \\ HEP_n = (w_1 \times 0.4 + w_2 \times 0.223)^\alpha \quad F = 0.4, \frac{T_{dyn}}{T_{dyn}^1} = 0.223 \Leftrightarrow \\ w_1 + w_2 = 1 \end{array} \right. \begin{cases} \alpha = 1.765 \\ w_2 = 0.56 \\ w_1 = 0.44 \end{cases} \quad (60)$$

Tableau 23 : Les facteurs de stress présents en phases « Appréhender » et « Mettre » des trois tâches

		Appréhender (Gt)	Mettre (Pt)
Facteurs de stress physique	Force moyenne appliquée	0pt	6pt
	Posture	4pt	4pt
	Vibration	0pt	0pt
	Cycle	10pt	10pt
Facteurs de stress mentaux	Concentration/ anxiété	0pt	0pt
	Monotonie	5pt	5pt
	Tension visuelle	0pt	0pt

En ce qui concerne l'entrée du système, les arrivées des pièces suivent une distribution exponentielle, avec une moyenne égale à 1.45 min. Elle est assurée par le convoyeur 1. L'agent modélisant ce moyen adopte un comportement « *EntréeInfinie* » (*infiniteInput*) avec modèle exponentiel (*pattern=exponential*). La vitesse des convoyeurs est configurée à 0.3 m.s⁻¹. Leur capacité de stockage est égale à 10. La Figure 54 détaille le modèle réalisé sous AEN-PRO. La simulation effectuée concerne une journée de travail (540min) avec trois pauses planifiées : de 120 min à 135 min, de 240 min à 300 min et de 420 à 435 min.

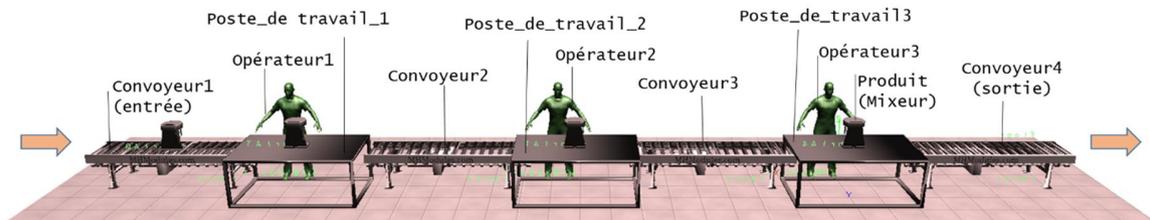


Figure 54 : Modélisation d'une ligne de production simple sous AEN-PRO.

Initialement, les opérateurs sont considérés avec un indice de fatigue égale à 0. Concernant l'accoutumance initiale, le nombre d'opérations mémorisées u est considéré égal à 0. Dans la suite de cette section, les résultats de la simulation sont présentés.

4.2.2. Résultats et discussion

La Figure 55 donne la variation de fatigue pendant la journée de travail. Une forte disparité entre les deux premiers opérateurs et le troisième est mise en évidence. Ainsi, il est important de revoir la conception du système afin d'assurer le même niveau de charge de travail pour les trois opérateurs.

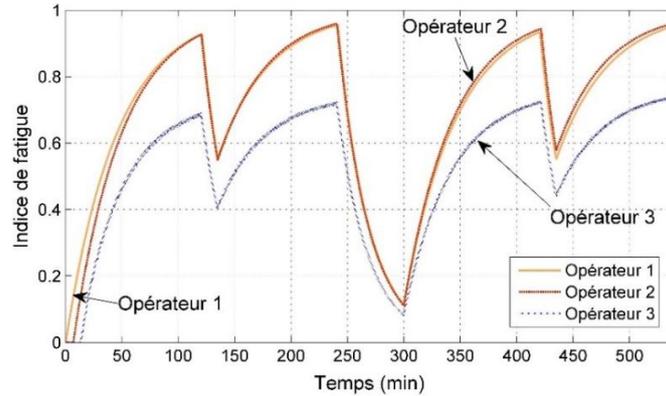


Figure 55 : Estimation de l'évolution de la fatigue des opérateurs.

Les courbes de la Figure 56 mettent l'accent sur l'impact des pauses sur les temps de traitement des tâches en raison de la perte d'accoutumance. Les courbes montrent également que la différence initiale dans le temps de traitement nominaux entre les opérateurs est amplifiée par l'effet de l'accoutumance et l'effet des arrêts causés par les variations du flux physique.

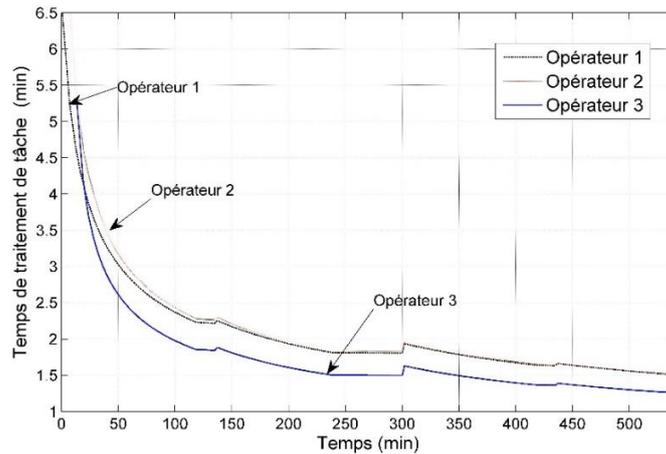


Figure 56 : Variation du temps opératoire.

Les variations du flux physique entraînent également une disparité au niveau de l'indicateur N_m des opérateurs. Les courbes obtenues (Figure 57) montrent que le premier et le deuxième opérateur ont un indicateur de marges de manœuvre temporelles négatif. Il est égal en moyenne à -149.02 min pour l'opérateur 1 avec un écart type de variation de 73.40 min. Pour l'opérateur 2, l'indicateur N_m est égal à -110.91 min en moyenne et il varie selon un écart type de 75.01 min. D'où la possibilité d'avoir des facteurs de risque liés au manque de la flexibilité temporelle. Quant au troisième opérateur, il dispose d'une marge temporelle stable et positive qui est égale à 23.34 min en moyenne, avec un écart type moins prononcé que les deux autres opérateurs (5.04 min).

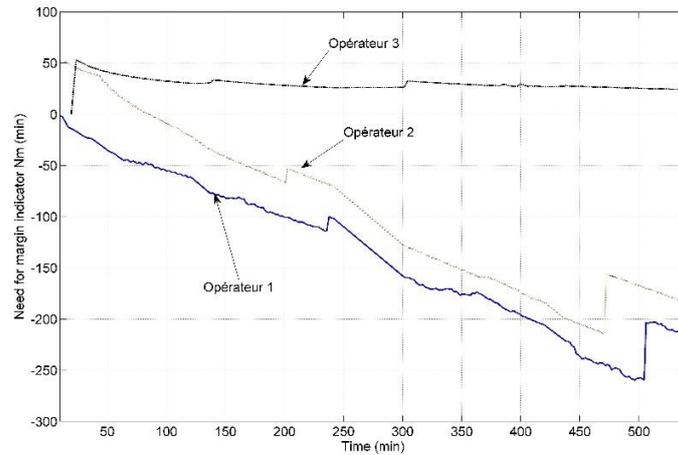


Figure 57 : variation de l'indicateur N_m .

La disparité montrée par la simulation et évaluée via l'indicateur N_m montre que la conception de la ligne de production peut être améliorée. Ceci peut être fait en cherchant à trouver un meilleur équilibre en termes d'incidence du flux physique sur les postes de travail. Ceci en modifiant la structure du système.

En ce qui concerne la performance en lien avec la productivité, la simulation a mis en évidence l'impact de l'apprentissage et de la fatigue sur la productivité du système. Dans ce sens, une valeur estimée du nombre de produits assemblés et défectueux est donnée (Tableau 24).

Tableau 24 : Les sorties de système sur une journée de travail

Nombre de mixeurs assemblés	Nombre de mixeurs rejetés à cause des erreurs de production
226	22

En observant les distributions des états élémentaires des opérateurs (Figure 58), il s'avère que le troisième opérateur a un arrêt structurel plus élevé par rapport aux deux autres. En ce qui concerne le système de transfert, le convoyeur 1 subit une charge significative et un blocage alors que les convoyeurs 2 et 3 ont un niveau élevé d'arrêt structurel. Ceci remet en cause ce choix du système de transfert.

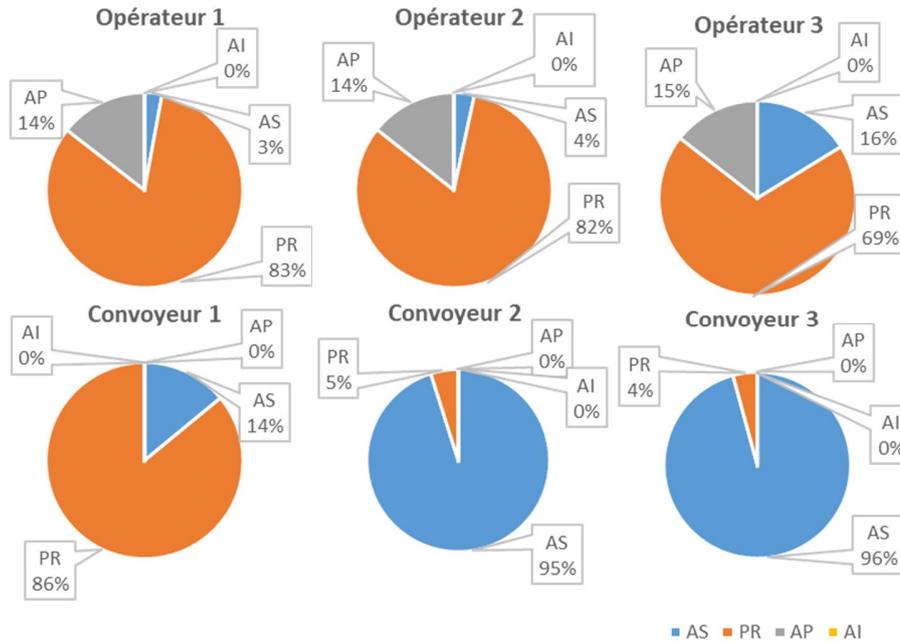


Figure 58 : Distribution des états élémentaires des agents du système.

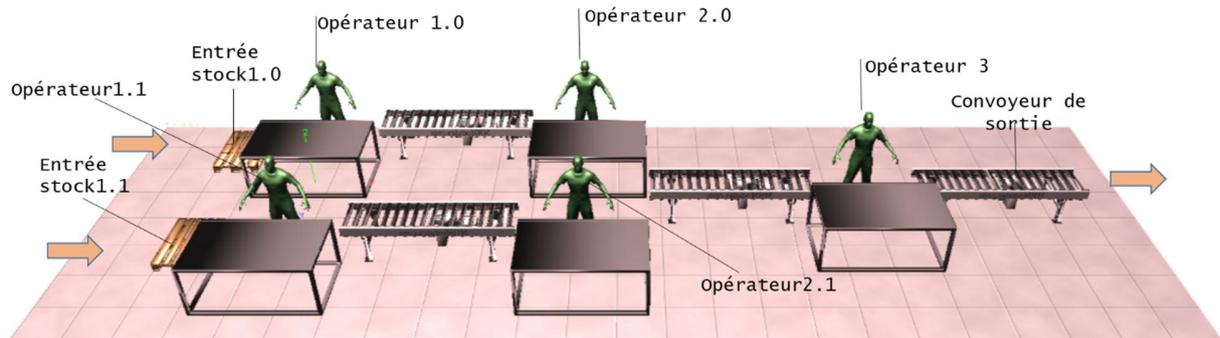


Figure 59 : Conception améliorée.

Sur la base de ces résultats, la nouvelle configuration illustrée sur la Figure 59 est proposée. Pour améliorer la marge de manœuvre temporelle de l'opérateur 1, un stock est considéré. L'ajout d'un poste de travail en parallèle permet d'augmenter le taux de service face à la charge de travail (augmenter le RT et donc l'indicateur N_m). De même, un poste en parallèle du poste de travail 2 est ajouté pour réduire la charge de l'opérateur 2. L'augmentation du taux de service des postes de travail 1 et 2 réduiront probablement l'arrêt structurel de l'opérateur 3. L'ajout de deux postes de travail génère un coût fixe qui doit être pris en compte.

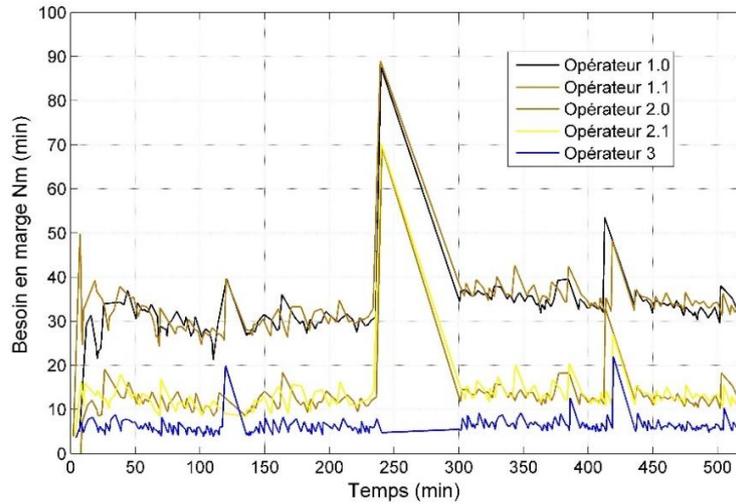


Figure 60 : Variation de l'indicateur N_m dans la conception améliorée.

La simulation effectuée montre une augmentation de la productivité : 321 produits. Ceci est dû à l'amélioration des taux de service et de la diminution des produits rejetés (5) en raison de la baisse de la fatigue ($F_{max} = 0,4$). En ce qui concerne les marges de manœuvre temporelles des opérateurs, la Figure 60 montre que celles-ci restent positives. Le Tableau 25 donne leurs moyennes et leurs écarts type.

Tableau 25 : Valeurs de l'indicateur N_m pour les différents opérateurs.

	Opérateur 1.0	Opérateur 1.1	Opérateur 2.0	Opérateur 2.2	Opérateur 3
$E[\widehat{N_m}]$ (min)	33.01	32.98	12.44	12.82	6.01
$S_{n-1} [N_m]$ (min)	16.24	6.55	5.32	5.29	1,68

En se basant sur les valeurs de l'indicateur N_m obtenues par la simulation, il est estimé que la probabilité d'avoir des facteurs de risque dans la conception améliorée est moindre par rapport à la conception initiale. La baisse de la fatigue indique également une amélioration des conditions de travail. Bien qu'une augmentation des états d'arrêts structurels d'opérateurs soit observée, celle-ci demeure raisonnable et permet d'avoir les temps de récupération nécessaires.

En se basant sur cette étude, il s'avère qu'il est important de considérer les différents aspects de la variabilité lors de la conception d'un système de production. Les variations dues à des facteurs humains et en raison des éléments stochastiques du système de production peuvent avoir un impact important sur la performance (production d'erreurs, rupture du flux physique...) et les conditions de travail (manque de flexibilité au travail, travailleur surchargé...). L'outil développé peut servir comme outil d'aide à la conception pour bien appréhender ces variabilités. Pour mieux illustrer l'utilisation et la valeur ajoutée de l'outil développé, la section suivante traite un

troisième cas d'étude. L'objectif est d'aborder la structure organisationnelle et d'illustrer comment l'utilisation de l'outil permet de l'améliorer.

4.3. Etude de la structure organisationnelle : politique de pause

Ce troisième cas d'étude vise à illustrer l'utilisation de l'outil pour étudier l'impact des paramètres organisationnels sur les conditions de travail et la productivité d'un système de production. S'il est positif, l'indicateur N_m garantit que les risques liés à la variabilité dans la situation de travail sont moins présents. Une valeur négative peut alerter le concepteur. En parallèle, les distributions des états élémentaires des entités du système permettent d'évaluer leur performance et de les lier à leur productivité.

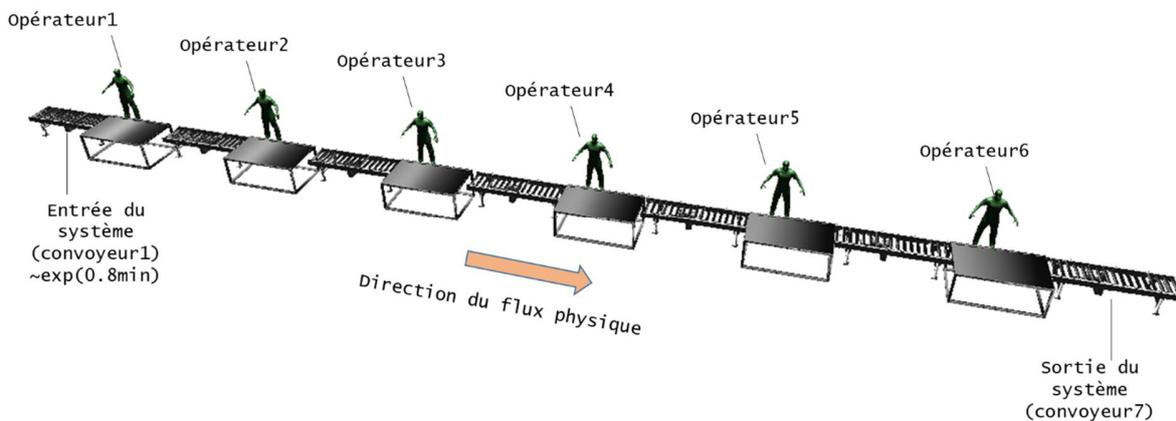


Figure 61 : Agencement linéaire simulé.

Dans cet exemple, trois configurations sont étudiées afin de choisir celle qui garantit une meilleure productivité et de bonnes conditions de travail. La première configuration représente une ligne de production simple (Figure 61) dont le paradigme de travail est fortement influencé par les principes du « Lean Manufacturing » (section 1.4). La deuxième est une configuration en trois îlots en parallèle (Figure 62). Chacun est composé de deux postes en série. Le flux parallèle dans cette configuration permet d'autoriser une autonomie encadrée des pauses : outre qu'une heure de pause midi planifiée, il est possible que deux opérateurs prennent une pause sans dépasser 10min. Le fonctionnement de la deuxième configuration est proche du système réfléchi de Volvo (section 1.5). Une configuration intermédiaire est considérée : le même aménagement en îlots mais avec des pauses planifiées. Une pause de 10 h à 10 h 15 min, une pause midi de 12 h à 13 h et une pause de 16 h à 16 h 15 min. L'objectif de ce cas d'étude est de savoir laquelle de ces trois configurations est meilleure en termes de productivité et offre des marges de manœuvre temporelles adéquates.

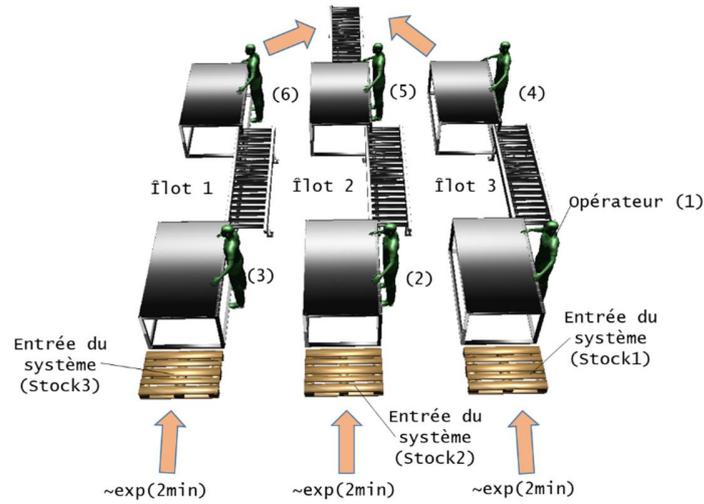


Figure 62 : Agencement en îlots parallèle.

4.3.1. Paramétrage de l'outil de simulation

En ce qui concerne les facteurs humains pris en compte, la fatigue et l'accoutumance sont tous les deux considérés. Cependant, étant en phase de conception et ne disposant pas des caractéristiques des opérateurs, la motivation, et l'effet des capacités de base dont dispose chaque opérateur ne sont pas pris en compte (Les paramètres β et γ de l'équation (42) sont mis à zéro). De même, on considère un âge moyen de 30 ans.

Pour modéliser la séquence de travail, une séquence composée (dans cet ordre) des phases Gt, Pt, Pr, Gt et Pt est utilisée. En ce qui concerne la première configuration (aménagement linéaire), toutes les tâches sont considérées avec les mêmes intensités de facteurs de stress. Leurs valeurs sont données par le tableau suivant :

Tableau 26 : Intensités des facteurs de stress présents dans l'aménagement linéaire

		Appréhender (Gt)	Mettre (Pt)	Traiter (Pr)
Facteurs de stress physique	Force moyenne appliquée	0pt	6pt	28pt
	Posture	4pt	4pt	6pt
	Vibration	0pt	0pt	2pt
	Cycle	10pt	10pt	0pt
Facteurs de stress mentaux	Concentration/ anxiété	4pt	4pt	4pt
	Monotonie	5pt	5pt	5pt
	Tension visuelle	0pt	0pt	2pt

Les différentes tâches de l'aménagement linéaire ont un premier temps d'exécution $T_{dyn}^1 = 2.4$ min. Le taux d'accoutumance est fixé à $LR=0.8$ (moyen) pour tous les opérateurs. La durée pour l'oubli total (paramètre D) est égale à un mois. En ce qui concerne l'aménagement en îlots, on

utilise la même séquence pour modéliser le séquençement du travail. En ce qui concerne les facteurs de stress, le Tableau 27 donne leurs intensités évaluées par les tableaux des temps de récupérations donnés en annexe 1.

Tableau 27 : Intensités des facteurs de stress présents dans l'aménagement en îlots

		Appréhender (Gt)	Mettre (Pt)	Traiter (Pr)
Facteurs de stress physique	Force moyenne appliquée	0pt	6pt	28pt
	Posture	4pt	4pt	6pt
	Vibration	0pt	0pt	2pt
	Cycle	10pt	10pt	0pt
Facteurs de stress mentaux	Concentration/ anxiété	6pt	6pt	6pt
	Monotonie	1pt	1pt	1pt
	Tension visuelle	0pt	0pt	2pt

Le premier poste de l'îlot traite les opérations réalisées sur les trois premiers postes de la ligne de production. Le deuxième poste traite les opérations restantes qui sont traitées sur les trois derniers postes de la configuration linéaire. Le temps de la réalisation de la tâche pour la première fois sur les deux postes d'un îlot est égal à $T_{dyn}^1 = 7 \text{ min}$.

Tableau 28 : Configuration des paramètres de la simulation

	Accoutumance					Probabilité d'erreur			Fatigue	
	δ	T_{stat}	T_{dyn}^1	U	D	α	w_1	w_2	F_{min}	F_{max}
Agencement linéaire	1	0	2,4	50	1	1,765	0,44	0,56	-	-
Agencement en îlots avec pauses planifiées	1	0	7	50	1	1,765	0,44	0,56	-	-
Agencement en îlots avec autonomie de pause	1	0	7	50	1	1,765	0,44	0,56	0,4	0,6

En ce qui concerne la probabilité d'erreur, les tâches dans les deux configurations sont considérées semblables à celles décrites dans le cas d'étude précédent. Les mêmes valeurs sont donc utilisées ($\alpha=1.765$, $w_1=0.44$, $w_2=0.56$). Le Tableau 25 résume les différents paramètres de configuration du simulateur.

En ce qui concerne les pauses autonomes, l'agent Opérateur se met en mode *pause* (*Opérateur.enPause()* renvoie la valeur « vrai » pour activer la transition vers l'état AP) quand l'indice de fatigue dépasse la valeur F_{max} . L'agent Opérateur sort de ce mode quand la fatigue est

descendue en dessous de la valeur F_{min} . Dans la section suivante, les résultats de la simulation sont détaillés et discutés.

4.3.2. Résultats et discussion

La Figure 63 montre que la fatigue est plus élevée dans la configuration en îlots avec des pauses planifiées en comparaison avec l'agencement linéaire. La rigidité de celui-là induit des ruptures du flux causant des arrêts du travail et permettent des micro-pauses. Cependant, la fatigue dans la configuration en ligne varie localement d'une manière plus prononcée.

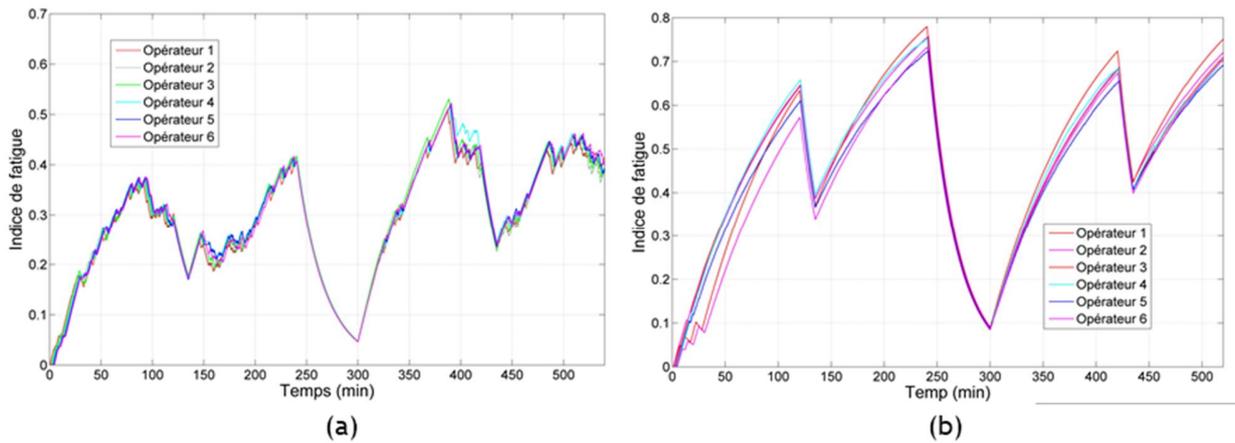


Figure 63 : (a)-Fatigue dans l'agencement linéaire (b)-Fatigue dans l'agencement en îlots avec pause planifiées.

Comme le montre la Figure 64, dans la configuration en îlots avec pauses autonomes, la flexibilité organisationnelle permet une meilleure gestion de la fatigue en comparaison avec la même configuration en pause planifiées. Ceci, sous condition qu'un opérateur ne prenne une pause d'une manière autonome qu'en cas de besoin (une fatigue ressentie).

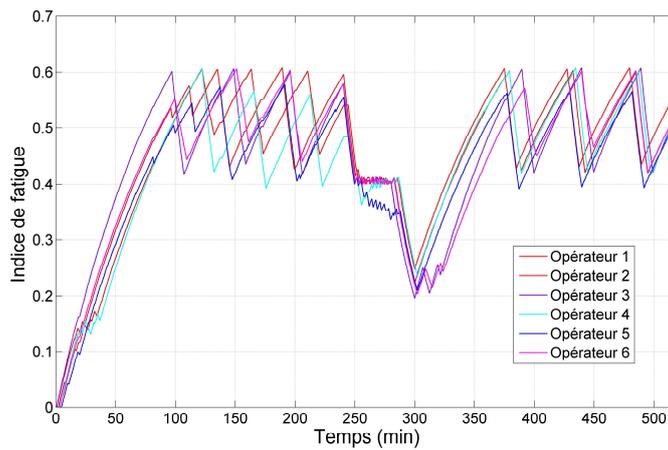


Figure 64 : Evolution de la fatigue dans l'agencement en îlots avec pauses autonomes.

En ce qui concerne les marges de manœuvre temporelle, la Figure 65-a met en évidence, des marges temporelles très négatives pour l'opérateur 1 (-73.23 min en moyenne) et des marges à peine positives (3.6 min en moyenne) pour les autres opérateurs dans l'aménagement linéaire. En ce qui concerne la configuration en îlots avec pauses planifiées, les trois premiers opérateurs ont des marges temporelles négatives de l'ordre d'une quinzaine de minutes de retard, tandis que les trois derniers opérateurs ont des marges positives de l'ordre de 8 mins. Les valeurs de cet indicateur pour ces deux configurations sont données d'une manière détaillée dans le Tableau 29 et le Tableau 30.

Tableau 29 : Indicateur de marge de manœuvre temporelle dans l'aménagement linéaire

	Opérateur1	Opérateur2	Opérateur3	Opérateur4	Opérateur5	Opérateur6	Moyenne
$E[N_m]$ (min)	-73,23	3,65	3,66	3,63	3,63	3,66	-9,17
$S_{n-1} [N_m]$ (min)	45,77	0,66	0,68	0,56	0,58	0,99	8,21

Tableau 30 : Indicateur de marge de manœuvre temporelle pour l'aménagement en îlots avec pauses planifiées

	Opérateur1	Opérateur2	Opérateur3	Opérateur4	Opérateur5	Opérateur6	Moyenne
$E[N_m]$ (min)	-20,50	-15,46	-14,73	8,11	8,17	8,96	-4,24
$S_{n-1} [N_m]$ (min)	14,05	18,22	20,23	0,58	0,51	1,48	9,18

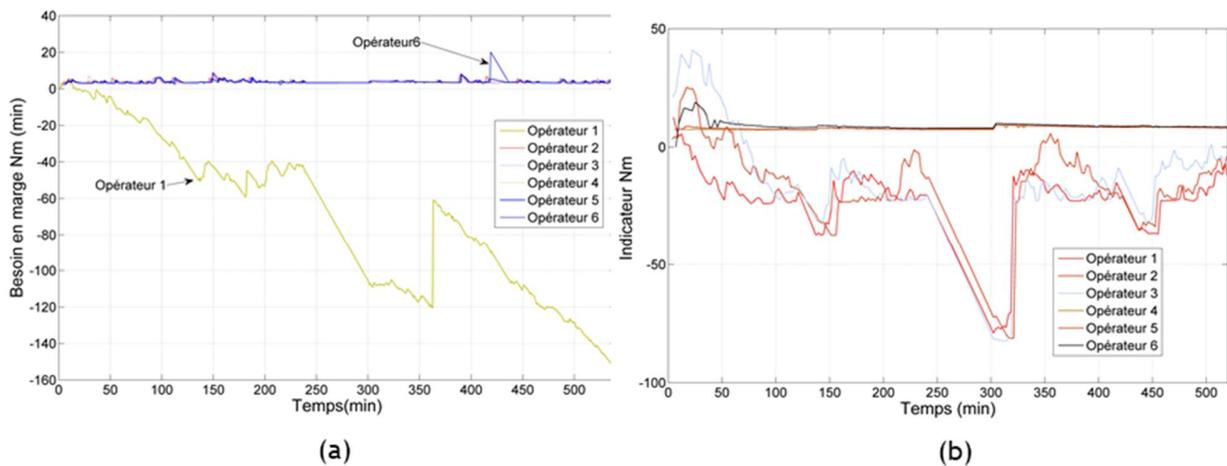


Figure 65 : (a)- Indicateur de la marge de manœuvre temporelle dans la configuration linéaire (b)- Indicateur de marge de manœuvre temporelle dans l'agencement en îlots avec pause planifiées.

La configuration en îlots avec pause autonomes représente les meilleures marges temporelles en moyenne et une meilleure stabilité (Figure 66). Cependant, les trois premiers opérateurs ont un indicateur N_m négatif. Il est donc important de revoir encore la conception pour avoir un indicateur N_m positif. L'augmentation de la capacité du stock peut être une solution envisageable. Les valeurs moyennes ainsi que leurs écarts types de l'indicateur N_m par rapport à chaque opérateur sont données par le Tableau 31.

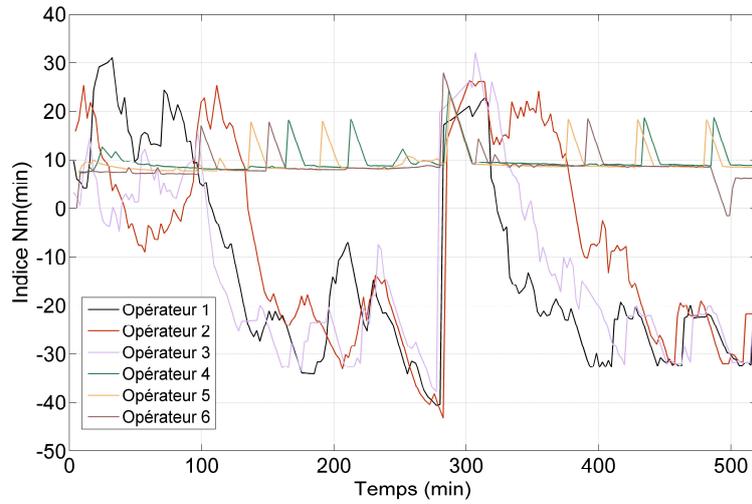


Figure 66 : Indicateur de marge de manœuvre temporelle dans l’agencement en îlots avec pauses autonomes. .

Tableau 31 : Indicateur de marge de manœuvre dans l’aménagement en îlots avec pauses autonomes

	Opérateur1	Opérateur2	Opérateur3	Opérateur4	Opérateur5	Opérateur6	Moyenne
$E[N_m](\text{min})$	-12,81	-6,77	-13,68	9,06	8,76	8,13	-1,22
$S_{n-1} [N_m](\text{min})$	18,89	19,32	0,68	2,03	1,96	2,43	7,55

En ce qui concerne la productivité, la configuration en îlots avec pause autonome donne la meilleure production nette, avec le taux d’erreur le moins élevé grâce à la gestion du facteur de fatigue obtenu grâce à la flexibilité organisationnelle qu’offre cette configuration.

Tableau 32 : Productivité des trois configurations

	Nombre de produits réalisés	Nombre de rebuts	Pourcentage	Production nette
Agencement linéaire	458	22	4,80%	436
Agencement en îlots avec pauses autonomes	563	25	4,44%	538
Agencement en îlots avec pauses planifiées	583	49	8,40%	534

4.4. Bilan des cas d’étude

A l’instar du chapitre précédent qui détaille le modèle de la simulation ainsi que son implémentation, ce chapitre traite plusieurs cas d’étude afin d’illustrer l’utilisation de l’outil développé : AEN-PRO.

Pour exploiter l'outil développé dans un processus de conception, ces travaux de thèse proposent une méthode basée sur l'approche FBS : Function-Behavior-Structure (Gero and Kannengiesser, 2004). Pour répondre aux différentes exigences en lien avec la productivité et les conditions du travail des opérateurs, le concepteur réalise une conception préliminaire où les structures physiques et organisationnelles d'un futur système de production sont spécifiées. Ces structures sont conçues pour obtenir un comportement spécifique appelé « comportement attendu ».

La structure réelle du système induit un comportement spécifique. Celui-ci est évalué à l'aide de deux indicateurs : Indicateur de besoin en marge de manœuvre temporelle (N_m) et le nombre de produits finis réalisés par le système. Le comportement réel de celui-ci est estimé à l'aide de l'outil AEN-PRO. Si le comportement estimé ne répond pas aux exigences, les états élémentaires des entités du système introduits dans le chapitre précédent sont utilisés pour évaluer le comportement individuel de chacun d'elles. Cette analyse peut conduire à des améliorations de la conception initiale.

En adoptant cette approche, trois cas d'étude sont traités, et grâce à ça, les conclusions suivantes peuvent être formulées :

1. Les marges de manœuvre organisationnelles (flexibilité organisationnelle) peuvent impacter positivement les marges de manœuvre temporelles : le troisième cas d'étude (section 4.3) a démontré que la configuration avec la marge de manœuvre « pause autonome » présente de meilleures marges de manœuvre temporelles.
2. Les marges de manœuvre temporelles impactent positivement la productivité : elles permettent une meilleure gestion des facteurs humains. Ce qui améliore la fiabilité humaine dans le système et réduit la probabilité d'erreur de production. Par leur flexibilité, les marges de manœuvre permettent également d'augmenter la productivité en réduisant les situations de blocage du flux.

Toutefois, il faut noter que ces conclusions ne sont valables que pour les cas d'étude traités dans ce chapitre et ne peuvent pas être généralisées automatiquement. Rappelons que la finalité principale de ces travaux de thèse est de ne pas démontrer l'intérêt ou pas, d'avoir des marges de manœuvre dans un système de production. Des travaux antérieurs se sont posés cette question. Le but est de proposer une approche pour les étudier : s'assurer que la structure d'un système de production offre des marges de manœuvre temporelles adéquates à la variabilité dans une situation de travail, en considérant également son impact sur la productivité. Dans les deux cas traités, l'augmentation des marges de manœuvre temporelles des opérateurs et la productivité du système avaient la même tendance. Il est possible d'avoir des cas où ces deux aspects sont en contradiction. D'où l'intérêt d'avoir un outil d'aide à la conception en apportant une évaluation des solutions proposées. En occurrence, l'outil AEN-PRO.

La confrontation avec l'expérimentation présentée dans la section 4.1, permet de faire une première vérification de l'outil proposé. Une bonne approximation de la productivité (un taux d'erreur de 7.5%) et de marges de manœuvre temporelles (un taux d'erreur de 0.253 %) est obtenue. Toutefois, d'autres expérimentations restent nécessaires afin de déterminer le domaine d'exploitation de cet outil.

Conclusions générales

La problématique traitée dans ces travaux de thèse peut se reformuler de la manière suivante : « **Comment intégrer les marges de manœuvre temporelles dans un système de production ?** » Comme l'introduit le chapitre 2, le concept de marge de manœuvre, en particulier, les marges de manœuvre temporelles permettent de garantir de bonnes conditions de travail. Par la flexibilité qu'elles offrent, les facteurs de risque tels que le stress, la pression temporelle et le manque de visibilité dans une situation de travail peuvent être limités. Ces marges de manœuvre peuvent éventuellement améliorer la productivité du système en limitant les situations de blocage et les erreurs de production, par leur impact positif sur la fatigue et l'accoutumance. A long terme, elles permettent de réduire les maladies professionnelles et d'assurer une image positive de l'entreprise.

Le but de ces travaux de thèse est de développer une approche pour la prise en compte de ces marges lors des phases de conception d'un système de production. Il est indispensable, avant de clôturer ce livrable, de dresser un bilan des contributions de ces travaux tout en marquant les limites des propositions établies et en ouvrant quelques perspectives.

A. Choix de l'approche

A travers une revue de la littérature, et en considérant le contexte économique actuel, l'accent est mis sur les exigences du travail d'aujourd'hui. Les systèmes de production modernes qui demeurent centrés sur des opérateurs humains, sont soumis à des contraintes de réactivité et de productivité. Les produits traités sont de plus en plus complexes et englobent plusieurs variantes. Ces aspects de variabilité impactent d'une manière négative la productivité et les conditions de travail dans les systèmes de production. Ceux-ci doivent disposer de la flexibilité nécessaire afin de mieux amortir cette variabilité.

Cependant, ces systèmes ont gardé des solutions sociotechniques léguées des systèmes « tayloristes », « fordistes » et des systèmes « Lean ». Ces solutions n'apportent pas de flexibilité, au contraire, favorise la standardisation, l'appauvrissement de la tâche et le cadencement de travail. Des aspects de travail incompatibles avec des environnements riches de variabilité. Par conséquent, des aléas comme la rupture du flux physique et les contraintes psychosociales qui en découlent, entravent la productivité et les conditions de travail dans ces systèmes.

En ce qui concerne les aspects de variabilité, ce travail a identifié deux natures de variabilité :

1. La variabilité liée aux moyens et aux aspects stochastiques du flux physique, comme les arrivées des pièces, les aléas relatifs aux moyens, comme les pannes ou les arrêts de fonctionnement ;
2. Les variabilités liées aux facteurs humains, causées par la fatigue, l'accoutumance, l'effet de l'âge et des caractéristiques personnelles. Ces facteurs impactent la performance de l'opérateur et génèrent de la variabilité au niveau des temps opératoires. Ils impactent également la probabilité d'erreur humaine.

Afin de s'assurer des bonnes conditions de travail, ce travail s'est appuyé sur l'hypothèse suivante :

« Un système de production qui n'assure pas des marges de manœuvre temporelles nécessaires pour faire face à la variabilité dans une situation de travail est un système à risque ».

L'approche proposée dans ces travaux de thèse consiste à vérifier que, dans un futur système de production ou suite à un changement d'aménagement ou d'organisation, l'opérateur dispose des marges de manœuvre temporelles adéquates. Ces marges lui sont nécessaires quand il est en sous capacité par rapport aux exigences de travail. La productivité est aussi mise au crible. La technique de simulation est adoptée afin répondre à ce double objectif : prévention et productivité.

B. Contributions

Pour évaluer les marges de manœuvre, un indicateur mesurant le besoin de marge de manœuvre temporelle a été développé (noté N_m : « *Need for Margin* »). Pour observer la performance opérationnelle liée à la productivité, cinq états élémentaires sont proposés comme base d'observation. Comme discuté dans section 3.1.2, cette base peut être employée pour calculer les valeurs d'indicateurs de performance classiques mais également pour évaluer le comportement local des entités du système et déduire des améliorations de la conception.

Afin d'effectuer l'évaluation, une structure de simulation est développée. Un paradigme multi-agent est adopté pour construire le modèle conceptuel de simulation. Ce paradigme permet d'intégrer d'une manière originale : des modèles de fatigue, d'accoutumance ainsi que les caractéristiques physiques de l'opérateur notamment, son âge et ses capacités de base. Ces facteurs impactent sa capacité : temps de réalisation de la séquence de travail ainsi que la probabilité de l'exécution avec succès de la tâche. Le modèle considère des activités avec plusieurs tâches, ce qui permet de modéliser plusieurs types d'aménagement de systèmes de production. En plus de l'opérateur, les autres entités du système de production sont également modélisées.

Ce modèle ainsi que son exécutif ont été implémentés dans le cadre du développement de l'outil AEN-PRO : Agent based ENgine for PROduction system simulation.

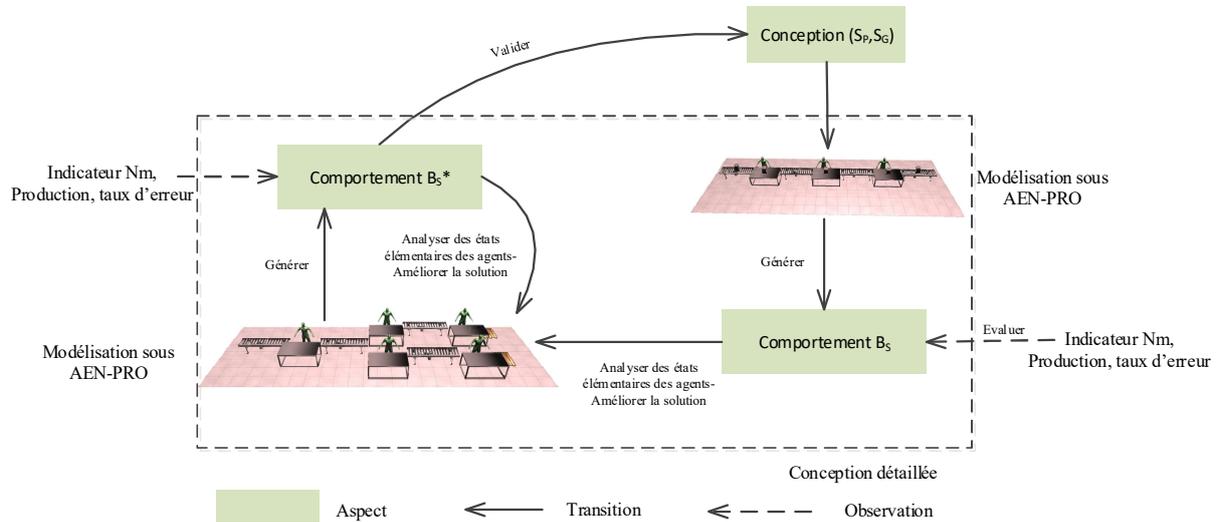


Figure 67 : Approche globale proposée dans ces travaux de thèse (basée sur l'ontologie FBS).

Grace à l'outil développé et la méthode illustrée dans la Figure 67, le concepteur ou le responsable de la gestion d'un système de production peut simuler un système avec une structure physique et organisationnelle donnée. Ceci dans le but d'évaluer son comportement en face à des exigences en lien avec la productivité et la prévention. L'indicateur N_m peut être employé pour s'assurer que le système offre les marges temporelles nécessaires aux opérateurs. L'outil peut être également couplé à des méthodes d'optimisation notamment par le biais de l'architecture MAGMA (section 2.2.2-H) afin d'automatiser la méthode proposée.

C. Vérification et mise en pratique de l'approche

La section 4.1 a présenté une confrontation entre l'outil développé et une expérimentation. Les résultats de la comparaison sont encourageants : une bonne précision dans la prédiction des durées des séquences de travail est obtenue. En termes de productivité, l'outil développé permet une bonne estimation du nombre de produits transformés. En ce qui concerne l'indicateur de marge de manœuvre temporelle, l'estimation faite par l'outil correspond aux marges temporelles relevées lors de l'expérimentation.

Dans les sections 4.2 et 4.3, deux cas d'étude ont été traités afin d'illustrer la méthode proposée dans ces travaux de thèse. Le premier cas d'étude vise à évaluer la performance d'une future ligne de production, en l'occurrence : sa productivité et le respect des marges de manœuvre temporelles. L'outil a permis d'identifier des postes de travail avec des marges de manœuvre temporelles insuffisantes et donc un risque potentiel. La productivité de la ligne est également estimée. En analysant la distribution des états élémentaires des entités du système, une

amélioration de la conception préliminaire est proposée. Après simulation, une nette amélioration de l'indicateur de besoin en marge de manœuvre temporelle (N_m) et de la productivité est observée.

Afin de mettre en avant le potentiel de l'outil développé ainsi que sa méthode d'utilisation, un deuxième cas d'étude est traité. L'objectif visé est de comparer trois configurations d'un système de production :

1. Un agencement linéaire avec des pauses planifiées ;
2. Un agencement en îlots avec des pauses planifiées ;
3. Un agencement en îlots avec des pauses autonomes contrôlés (<10min).

La simulation a démontré que la troisième configuration est la meilleure à la fois en termes de productivité et conditions de travail (marges de manœuvre temporelles suffisantes). Ainsi, en suivant cette méthode, les concepteurs peuvent étudier des systèmes de production pour garantir la productivité et les bonnes conditions de travail. Par le biais de cette approche, des structures physiques et organisationnelles innovantes peuvent être proposées. Ceci est autant important avec la transition vers le paradigme de l'usine du futur. L'introduction des nouvelles technologies (fabrication additive, internet des objets, technologie de simulation, le cloud...) peut éventuellement mener cette innovation à son plus haut potentiel.

D. Limitations

La vérification abordée dans la section 4.1 ne permet pas de valider totalement l'outil développé. Sa validation exige d'entreprendre un plan d'expériences sur de nombreuses configurations de système de production. Pour le moment, il s'agit d'un premier démonstrateur très encourageant. Toutefois, le modèle proposé dans ces travaux de thèse représente une intégration d'un ensemble de modèles particuliers (relatifs à des aspects spécifiques) tirés de la littérature. Il s'agit de modèles phénoménologiques et génériques qui ont un domaine de validité relativement large par rapport aux modèles empiriques. Pourvu que leur paramétrage soit fait correctement. Par conséquent, nous estimons qu'une validation du style boîte blanche est suffisante. Autrement dit, le comportement interne des composants est considéré valide. Le but est de s'assurer que les interactions entre eux sont également correctement modélisées.

L'approche proposée stipule que, s'il est positif, l'indicateur de marges de manœuvre temporelles garantit la réduction des facteurs de risque, et en particulier, ceux en lien avec la dimension temporelle de l'activité de travail. Ceci est basé sur les modèles explicatifs tirés de la littérature du domaine d'ergonomie, notamment les travaux de (Lanfranchi and Duveau, 2008). Cependant, ce résultat n'a pas été validé d'une manière scientifiquement rigoureuse. D'où l'hypothèse de base de ces travaux de thèse, qu'il reste donc à vérifier sur le terrain.

Il faut noter également que le modèle développé n'intègre pas les exigences biomécaniques. Elles sont supposées être vérifiées dans la phase de conception préliminaire. Cependant, la modification de la conception et donc du contenu de travail de chaque poste de charge pendant la phase de conception détaillée, peut aboutir à leur violation. Toutefois, l'évaluation en concurrence de ces critères via un système d'évaluation comme RULA ou REBA peut se faire, grâce aux modèles géométriques articulés de l'opérateur. Ceci permet alors de prendre en compte les exigences de prévention qui sont à la fois, liées aux risques psychosociaux et aux risques biomécaniques. Cette extension fait partie des perspectives de la thèse.

E. Perspectives

Ces travaux de thèse permettent de mettre en exergue l'intérêt que représente la simulation pour mieux évaluer la performance des systèmes de production. L'une des suites possibles de ces travaux et d'intégrer, outre que l'accoutumance, la fatigue, la motivation, l'âge et les capacités de base d'autres facteurs humains. La réactivité de l'opérateur et la visibilité dans une situation de travail peuvent impacter la séquence du travail. Il est important de considérer ces aspects pour élargir le domaine de validité du modèle proposé.

Comme indiqué dans la section précédente, une des perspectives à considérer également, est l'intégration de la prévention biomécanique dans l'approche. Ceci peut être fait en étendant le modèle de simulation par l'intégration d'un ou plusieurs systèmes d'évaluation de la charge biomécanique (REBA, RULA, OCRA...). Les modèles géométriques articulés des opérateurs peuvent être exploités pour effectuer cette évaluation.

En ce qui concerne la modélisation des moyens de production, par rapport à la transition vers le paradigme de l'usine du futur, des modèles de robots, de robots amovibles et de produits connectés peuvent être ajoutés. Par rapport au mécanisme de simulation, celui-là peut être amélioré afin de réduire le temps de simulation.

Le point fort des propositions de ces travaux de thèse est le développement de l'outil de simulation lui-même. Il permet de prendre en compte plusieurs aspects dynamiques d'un système de production, et en particulier ceux en lien avec les facteurs humains. En revanche, l'approche elle-même demeure relativement classique. Une des perspectives qui peut être proposée consiste à automatiser l'approche. Pour cela, le couplage avec des méthodes d'optimisation serait intéressant, notamment en utilisant l'architecture MAGMA (section 2.2.2-H).

Bibliographie

- Adler, P., 1993. Time-and-Motion Regained [WWW Document]. Harv. Bus. Rev. URL <https://hbr.org/1993/01/time-and-motion-regained> (accessed 3.1.17).
- Adler, P.S., Borys, B., 1996. Two Types of Bureaucracy: Enabling and Coercive. *Adm. Sci. Q.* 41, 61. <https://doi.org/10.2307/2393986>
- Akinci, B., Boukamp, F., Gordon, C., Huber, D., Lyons, C., Park, K., 2006. A formalism for utilization of sensor systems and integrated project models for active construction quality control. *Autom. Constr.* 15, 124–138. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2005.01.008>
- Aoyagi, Y., Shephard, R.J., 1992. Aging and muscle function. *Sports Med. Auckl. NZ* 14, 376–396.
- Arbez, G., Birta, L.G., 2007. ABCmod: a conceptual modelling framework for discrete event dynamic systems, in: *Proceedings of the 2007 Summer Computer Simulation Conference*. Society for Computer Simulation International, pp. 987–995.
- Ariëns, G.A., van Mechelen, W., Bongers, P.M., Bouter, L.M., van der Wal, G., 2001. Psychosocial risk factors for neck pain: a systematic review. *Am. J. Ind. Med.* 39, 180–193.
- Asensio-Cuesta, S., Diego-Mas, J.A., Canós-Darós, L., Andrés-Romano, C., 2012. A genetic algorithm for the design of job rotation schedules considering ergonomic and competence criteria. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 60, 1161–1174. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3672-0>
- Ashkanasy, N.M., 2002. Diversity and Emotion: The New Frontiers in Organizational Behavior Research. *J. Manag.* 28, 307–338. <https://doi.org/10.1177/014920630202800304>
- Atkinson, J.W., Bastian, J.R., Earl, R.W., Litwin, G.H., 1960. The achievement motive, goal setting, and probability preferences. *J. Abnorm. Soc. Psychol.* 60, 27.
- Ayough, A., Zandieh, M., Farsijani, H., 2012. GA and ICA approaches to job rotation scheduling problem: considering employee's boredom. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 60, 651–666. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3641-7>
- Azizi, N., Zolfaghari, S., Liang, M., 2010. Modeling job rotation in manufacturing systems: The study of employee's boredom and skill variations. *Int. J. Prod. Econ.* 123, 69–85. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.07.010>
- Babbage, C., 1992. *The Economy of Machinery & Manufactures*. Gottfried & Fritz.
- Babiceanu, R.F., Chen, F.F., 2006. Development and applications of holonic manufacturing systems: a survey. *J. Intell. Manuf.* 17, 111–131.

- Babiceanu, R.F., Seker, R., 2016. Big Data and virtualization for manufacturing cyber-physical systems: A survey of the current status and future outlook. *Comput. Ind.* 81, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.02.004>
- Badham, R., Jurgens, U., 1998. Images of Good Work and the Politics of Teamwork. *Econ. Ind. Democr.* 19, 33–58. <https://doi.org/10.1177/0143831X98191003>
- Baines, T., Mason, S., Siebers, P.-O., Ladbroke, J., 2004. Humans: the missing link in manufacturing simulation? *Simul. Model. Pract. Theory* 12, 515–526. [https://doi.org/10.1016/S1569-190X\(03\)00094-7](https://doi.org/10.1016/S1569-190X(03)00094-7)
- Balanced Score Institute, 2017. What is the Balanced Scorecard? [WWW Document]. URL <http://www.balancedscorecard.org/BSC-Basics/About-the-Balanced-Scorecard> (accessed 5.5.17).
- Banks, J., 1998. Handbook of simulation principles methodology advances, application and practice, 1998th ed. Engineering and Management Press EMP.
- Barker, J.R., 1993. Tightening the Iron Cage: Concertive Control in Self-Managing Teams. *Adm. Sci. Q.* 38, 408. <https://doi.org/10.2307/2393374>
- Becker, A.B., Galinsky, T.L., Swanson, N.G., Sauter, S.L., 1996. Stress Control Interventions in Data Entry Work. *Proc. Hum. Factors Ergon. Soc. Annu. Meet.* 40, 1279–1279. <https://doi.org/10.1177/154193129604002456>
- Becker, T., Stern, H., 2016. Future Trends in Human Work area Design for Cyber-Physical Production Systems. *Procedia CIRP* 57, 404–409. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.070>
- Belmokhtar, S., Dolgui, A., Guschinsky, N., Levin, G., 2006. Integer programming models for logical layout design of modular machining lines. *Comput. Ind. Eng.* 51, 502–518. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.08.010>
- Bennett, C.L., Edelson, N.M., 1998. *Process Discipline: How to Maximize Profitability and Quality Through Manufacturing Consistency*. Taylor & Francis.
- Berrah, L., Mauris, G., 2002. The industrial performance aggregation: towards a definition, in: *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. Presented at the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, p. 5 pp. vol.5-. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2002.1176343>
- Boenzi, F., Digiesi, S., Facchini, F., Mummolo, G., 2016. Ergonomic improvement through job rotations in repetitive manual tasks in case of limited specialization and differentiated ergonomic requirements. *IFAC-Pap., 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2016*Troyes, France, 28–30 June 2016 49, 1667–1672. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.820>

- Boenzi, F., Digiesi, S., Mossa, G., Mummolo, G., Romano, V.A., 2015. Modelling Workforce Aging in Job Rotation Problems. IFAC-Pap., 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2015 48, 604–609. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.148>
- Bongers, P.M., de Winter, C.R., Kompier, M.A., Hildebrandt, V.H., 1993. Psychosocial factors at work and musculoskeletal disease. *Scand. J. Work. Environ. Health* 19, 297–312.
- Bongers, P.M., Kremer, A.M., Laak, J. ter, 2002. Are psychosocial factors, risk factors for symptoms and signs of the shoulder, elbow, or hand/wrist?: A review of the epidemiological literature. *Am. J. Ind. Med.* 41, 315–342. <https://doi.org/10.1002/ajim.10050>
- Braverman, H., 1998. Labor and monopoly capital: the degradation of work in the twentieth century, 25. anniversary ed. ed. Monthly Review Press, New York, NY.
- Buzacott, J.A., Yao, D.D., 1986. Flexible manufacturing systems: a review of analytical models. *Manag. Sci.* 32, 890–905.
- Carlson, J., Row, A., 1976. How much does forgetting cost. *Ind. Eng.* Vol.8, p.40-47.
- Carnahan, B.J., Redfern, M.S., Norman, B., 2000. Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search. *Ergonomics* 43, 543–560. <https://doi.org/10.1080/001401300184404>
- Caroly, S., Coutarel, F., Landry, A., Mary-Cheray, I., 2010. Sustainable MSD prevention: Management for continuous improvement between prevention and production. Ergonomic intervention in two assembly line companies. *Appl. Ergon.* 41, 591–599. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2009.12.016>
- Chen, S., Dodd, J.L., 1997. Economic Value Added (EVATM): An Empirical Examination Of A New Corporate Performance Measure. *J. Manag. Issues* 9, 318–333.
- Cheurfa, M., 2005. Gestion des ressources humaines en production cyclique. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.
- Chung, C.A., 2004. Simulation modeling handbook: a practical approach. CRC Press, Boca Raton.
- C.I.R.P. (Ed.), 2011. Dictionary of Production Engineering/Wörterbuch der Fertigungstechnik/Dictionnaire des Techniques de Production Mechanique Vol IV. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12007-7>
- Claudon, L., Desbrosses, K., Wild, P., Remy, O., Gilles, M., Pichené-Houard, 2016. Effects of artifacts in a repetitive light assembly task on muscular activity according to age and work rate constraints. *Proc. 9th Int. Sci. Conf. Prev. Work-Relat. Musculoskelet. Disord.* 303.

- Constanze, C., 2005. *Automotive Production Systems and Standardisation*. Physica-Verlag Heidelberg.
- Coutarel, F., 2004. *La prévention des troubles musculo-squelettiques en conception: quelles marges de manoeuvre pour le déploiement de l'activité?* Université Victor Segalen-Bordeaux II.
- Coutarel, F., Daniellou, F., Dugué, B., 2005. *La prévention des troubles musculo-squelettiques: quelques enjeux épistémologiques*. Activités 2.
- Cox, T., 1993. *Stress Research and Stress Management: Putting theory to work*. HSE Books.
- Dale, B., 2015. *Total quality management*. Wiley Online Library.
- Dayar, T., 2012. *Analyzing Markov Chains using Kronecker Products*, SpringerBriefs in Mathematics. Springer New York, New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4190-8>
- de Zwart, B.C., Frings-Dresen, M.H., van Dijk, F.J., 1995. *Physical workload and the aging worker: a review of the literature*. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 68, 1–12.
- Deb, K., Kalyanmoy, D., 2001. *Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA.
- Di Pasquale, V., Miranda, S., Iannone, R., Riemma, S., 2015. *A Simulator for Human Error Probability Analysis (SHERPA)*. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 139, 17–32. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.02.003>
- Dorigo, M., Stützle, T., 2003. *The ant colony optimization metaheuristic: Algorithms, applications, and advances*, in: *Handbook of Metaheuristics*. Springer, pp. 250–285.
- Doumeings, G., Clave, F., Ducq, Y., 1995. *ECOGRAI—a method to design and to implement performance measurement systems for industrial organizations—concepts and application to the maintenance function*, in: *Benchmarking—Theory and Practice*. Springer, pp. 350–368.
- Drucker, P.F., 2008. *Management Rev Ed*. Zondervan.
- Durand, M.-J., Vézina, N., Baril, R., Loisel, P., Richard, M.-C., Ngomo, S., 2011. *Relationship between the margin of manoeuvre and the return to work after a long-term absence due to a musculoskeletal disorder: an exploratory study*. *Disabil. Rehabil.* 33, 1245–1252. <https://doi.org/10.3109/09638288.2010.526164>
- Durand, M.J., Vézina, N., Loisel, P., Baril, R., Richard, M.C., Diallo, B., 2007. *Workplace Interventions for Workers with Musculoskeletal Disabilities: A Descriptive Review of Content*. *J. Occup. Rehabil.* 17, 123–136. <https://doi.org/10.1007/s10926-006-9036-1>

- Dyer, J.H., 1996. Does Governance Matter? *Keiretsu* Alliances and Asset Specificity as Sources of Japanese Competitive Advantage. *Organ. Sci.* 7, 649–666. <https://doi.org/10.1287/orsc.7.6.649>
- El ahrache, K., Imbeau, D., Farbos, B., 2006. Percentile values for determining maximum endurance times for static muscular work. *Int. J. Ind. Ergon.* 36, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2005.08.003>
- El Mouayni, I., Etienne, A., Siadat, A., Dantan, J.-Y., Lux, A., 2016. A simulation based approach for enhancing health aspects in production systems by integrating work margins. IFAC-Pap., 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2016Troyes, France, 28–30 June 2016 49, 1697–1702. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.826>
- Ellegard, K., 1997. The development of a reflective production system layout at Volvo's Uddevalla Car Assembly Plant, in: *Transforming Automobile Assembly*. Springer, pp. 189–208.
- Elmaraghy, W.H., Nada, O.A., Elmaraghy, H.A., 2008. Quality prediction for reconfigurable manufacturing systems via human error modelling. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* Vol.21, p.584-598. <https://doi.org/10.1080/09511920701233464>
- Engström, T., Jonsson, D., Medbo, L., 1996. *The Volvo Uddevalla Plant: Production Principles, Work Organization, Human Resources and Performance Aspects. Some results from decade's efforts toward reformation of assembly work (Report)*. Chalmers University of Technology.
- Erik Mathiassen, S., Åhsberg, E., 1999. Prediction of shoulder flexion endurance from personal factors. *Int. J. Ind. Ergon.* 24, 315–329. [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(98\)00039-0](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(98)00039-0)
- European Agency for Safety and Health at Work (Ed.), 2010. *OSH in figures: work-related musculoskeletal disorders in the EU - Facts and figures, European risk observatory report*. Office for Official Publ. of the Europ. Communities, Luxembourg.
- Farmer, R., Sundberg, N.D., 1986. Boredom Proneness--The Development and Correlates of a New Scale. *J. Pers. Assess.* 50, 4–17. https://doi.org/10.1207/s15327752jpa5001_2
- Feo, T.A., Resende, M.G., 1995. Greedy randomized adaptive search procedures. *J. Glob. Optim.* 6, 109–133.
- Fisherl, C.D., 1993. Boredom at Work: A Neglected Concept. *Hum. Relat.* 46, 395–417. <https://doi.org/10.1177/001872679304600305>
- Fleishman, E.A., 1967. Performance Assessment Based on an Empirically Derived Task Taxonomy1. *Hum. Factors J. Hum. Factors Ergon. Soc.* 9, 349–366.
- Fujimoto, T., 1999. *The Evolution of a Manufacturing System at Toyota*. Oxford University Press.

- Gall, B., Parkhouse, W., 2004. Changes in physical capacity as a function of age in heavy manual work. *Ergonomics* 47, 671–687. <https://doi.org/10.1080/00140130410001658691>
- Galland, S., Grimaud, F., Beaune, P., Campagne, J.-P., 1999. Multi-agent methodological approach for distributed simulation, in: 11th European Simulation Symposium. p. pp–104.
- Game, A.M., 2007. Workplace boredom coping: health, safety, and HR implications. *Pers. Rev.* 36, 701–721. <https://doi.org/10.1108/00483480710774007>
- Garg, A., Chaffin, D.B., Herrin, G.D., 1978. Prediction of metabolic rates for manual materials handling jobs. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 39, 661–674. <https://doi.org/10.1080/0002889778507831>
- Garg, A., Hegmann, K.T., Schwoerer, B.J., Kapellusch, J.M., 2002. The effect of maximum voluntary contraction on endurance times for the shoulder girdle. *Int. J. Ind. Ergon.* 30, 103–113. [https://doi.org/10.1016/S0169-8141\(02\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-8141(02)00078-1)
- Gartman, D., 1986. *Auto Slavery: The Labor Process in the American Automobile Industry, 1897-1950*. Rutgers University Press.
- Genaidy, A.M., Mital, A., Obeidat, M., 1989. The validity of predetermined motion time systems in setting production standards for industrial tasks. *Int. J. Ind. Ergon.* 3, 249–263.
- Gero, J.S., Kannengiesser, U., 2004. The situated function–behaviour–structure framework. *Des. Stud.* 25, 373–391. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2003.10.010>
- Givi, Z.S., Jaber, M.Y., Neumann, W.P., 2015. Modelling worker reliability with learning and fatigue. *Appl. Math. Model.* 39, 5186–5199. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.03.038>
- Glover, F., Kochenberger, G.A., 2003. *Handbook of Metaheuristics*. Springer US, Boston, MA.
- Goldich, R.L., 1995. *Military Retirement and Personnel Management: Should Active Duty Military Careers be Lengthened?* DTIC Document.
- Graham, L., 1995. *On the Line at Subaru-isuzu: The Japanese Model and the American Worker*, 1 edition. ed. ILR Press, Ithaca, NY.
- Hackman, J.R., Lawler, E.E., 1971. Employee reactions to job characteristics. *J. Appl. Psychol.* 55, 259.
- Hall, R.W., 1983. *Zero Inventories*. Dow Jones-Irwin.
- Handfield, R.B., 1993. A resource dependence perspective of just-in-time purchasing. *J. Oper. Manag.* 11, 289–311.
- Harmon, R.L., Peterson, L.D., 1990. *Reinventing the factory: productivity breakthroughs in manufacturing today*. Free Press.

- Heath, G.W., Hagberg, J.M., Ehsani, A.A., Holloszy, J.O., 1981. A physiological comparison of young and older endurance athletes. *J. Appl. Physiol.* 51, 634–640.
- Hignett, S., McAtamney, L., 2000. Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Appl. Ergon.* 31, 201–205. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0003-6870\(99\)00039-3](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0003-6870(99)00039-3)
- Hon, K.K.B., 2005. Performance and evaluation of manufacturing systems. *CIRP Ann.-Manuf. Technol.* 54, 139–154.
- Hoogendoorn, W.E., van Poppel, M.N., Bongers, P.M., Koes, B.W., Bouter, L.M., 2000. Systematic review of psychosocial factors at work and private life as risk factors for back pain. *Spine* 25, 2114–2125.
- Hopp, W.J., Spearman, M.L., 2001. *Factory physics: foundations of manufacturing management*, 2. ed. ed. Irwin/McGraw-Hill, Boston.
- Hounshell, D., 1985. *From the American System to Mass Production, 1800-1932: The Development of Manufacturing Technology in the United States*. JHU Press.
- HSE, 1999. The costs to Britain of workplace accidents and work-related ill health in 1995/96.
- INRS, 2015. *Statistiques AT-MP 2012 de l'Assurance Maladie - Actualité - INRS* [WWW Document]. URL <http://www.inrs.fr/actualites/statistiques-ATMP-2012.html> (accessed 10.30.15).
- Jaber, M.Y., Bonney, M., 1997. A comparative study of learning curves with forgetting. *Appl. Math. Model.* Vol.21, p.523-531. [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(97\)00055-3](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(97)00055-3)
- Jaber, M.Y., Givi, Z.S., Neumann, W.P., 2013. Incorporating human fatigue and recovery into the learning forgetting process. *Appl. Math. Model.* Vol. 37, 7287–7299.
- Jackson, J.R., 1956. A Computing Procedure for a Line Balancing Problem. *Manag. Sci.* 2, 261–271. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2.3.261>
- Jade, 2015. *Java Agent DEvelopment Framework* [WWW Document]. URL <http://jade.tilab.com/> (accessed 9.18.15).
- Kanawaty, G., International Labour Office, 1992. *Introduction to work study*. International Labour Office, Geneva.
- Karhu, O., Kansil, P., Kuorinka, I., 1977. Correcting working postures in industry: a practical method for analysis. *Appl. Ergon.* 8, 199–201.
- Karwowski, W., 2006. *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors, Second Edition - 3 Volume Set*. CRC Press.
- Kenney, M., Florida, R.L., 1993. *Beyond mass production: the Japanese system and its transfer to the U.S.* Oxford University Press.

- Kenny, G.P., Yardley, J.E., Martineau, L., Jay, O., 2008. Physical work capacity in older adults: Implications for the aging worker. *Am. J. Ind. Med.* 51, 610–625. <https://doi.org/10.1002/ajim.20600>
- Kirwan, B., 1996. The validation of three human reliability quantification techniques — THERP, HEART and JHEDI: Part 1 — technique descriptions and validation issues. *Appl. Ergon.* 27, 359–373. [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(96\)00044-0](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(96)00044-0)
- Koukoulaki, T., 2014. The impact of lean production on musculoskeletal and psychosocial risks: An examination of sociotechnical trends over 20 years. *Appl. Ergon.* Vol.45, p.198-212.
- Kowalski-Trakofler, K.M., Steiner, L.J., Schwerha, D.J., 2005. Safety considerations for the aging workforce. *Saf. Sci.* 43, 779–793. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2005.08.014>
- Krafcik, J.J., 1988. Triumph of the Lean Production System. *Sloan Management Review* 30, 41–52.
- Lanfranchi, J.B., Duveau, A., 2008. Explicative models of musculoskeletal disorders (MSD): biomechanical and psychosocial factors to clinical analysis of ergonomics. *Rev. Eur. Psychol. Appliquée* 58, 201–213.
- Latham, G.P., Locke, E.A., 1991. Self-regulation through goal setting. *Organ. Behav. Hum. Decis. Process.* 50, 212–247.
- Le Moigne, J.-L., 1994. La théorie du système général: théorie de la modélisation. jeanlouis le moigne-ae mcx.
- Linton, S.J., 2001. Occupational psychological factors increase the risk for back pain: a systematic review. *J. Occup. Rehabil.* 11, 53–66.
- Ma, L., Zhang, W., Wu, S., Zhang, Z., 2015. A new simple local muscle recovery model and its theoretical and experimental validation. *Int. J. Occup. Saf. Ergon.* 21, 86–93. <https://doi.org/10.1080/10803548.2015.1017961>
- McAtamney, L., Corlett, E.N., 1993. RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Appl. Ergon.* 24, 91–99.
- McKenzie, S., 2015. Rise of the robots: The evolution of Ford's assembly line [WWW Document]. CNNMoney. URL <http://money.cnn.com/gallery/technology/2015/04/29/ford-factory-assembly-line-robots/> (accessed 8.3.17).
- Meyer, M.W., 2002. Rethinking performance measurement: beyond the balanced scorecard.
- Michalos, G., Makris, S., Chryssolouris, G., 2013. The effect of job rotation during assembly on the quality of final product. *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 6, 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2013.03.001>

- Mielczarek, B., Uziarko-Mydlikowska, J., 2012. Application of computer simulation modeling in the health care sector: a survey. *SIMULATION* 88, 197–216. <https://doi.org/10.1177/0037549710387802>
- Milano, M., Roli, A., 2004. MAGMA: A Multiagent Architecture for Metaheuristics. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part B Cybern.* 34, 925–941. <https://doi.org/10.1109/TSMCB.2003.818432>
- Milkman, R., 1997. *Farewell to the Factory: Auto Workers in the Late Twentieth Century*. University of California Press, Berkeley.
- Monden, Y., 2011. *Toyota Production System: An Integrated Approach to Just-In-Time*, 4th Edition. CRC Press.
- Monod, H., Scherrer, J., 1965. THE WORK CAPACITY OF A SYNERGIC MUSCULAR GROUP. *Ergonomics* 8, 329–338. <https://doi.org/10.1080/00140136508930810>
- Monostori, L., 2014. Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges. *Procedia CIRP* 17, 9–13. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.115>
- Murrell, K.F.H., 1965. *Human Performance in Industry*. Reinhold Publishing Corporation.
- Nance, R.E., 1994. The conical methodology and the evolution of simulation model development. *Ann. Oper. Res.* 53, 1–45.
- Naseer, A., Eldabi, T., Jahangirian, M., 2009. Cross-sector analysis of simulation methods: a survey of defense and healthcare. *Transform. Gov. People Process Policy* 3, 181–189. <https://doi.org/10.1108/17506160910960568>
- National Research Council (NRC), Institute of Medicine, 2001. *Musculoskeletal Disorders and the Workplace: Low Back and Upper Extremities*. National Academies Press, Washington, D.C. <https://doi.org/10.17226/10032>
- Neely, A., 2007. *Business Performance Measurement: Unifying Theory and Integrating Practice*. Cambridge University Press, Leiden.
- Negahban, A., Smith, J.S., 2014. Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis. *J. Manuf. Syst.* 33, 241–261. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2013.12.007>
- Negahban, A., Yilmaz, L., 2014. Agent-based simulation applications in marketing research: an integrated review. *J. Simul.* 8, 129–142.
- Neto, A., Ramalho, P., Vila, E., Filho, G., 2010. A simulation-based evolutionary multiobjective approach to manufacturing cell formation. *Comput. Ind. Eng.* 59, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.02.017>

- Neumann, W.P., Medbo, P., 2009. Integrating human factors into discrete event simulation of parallel flow strategies. *Prod. Plan. Control* Vol. 20, p.3-16. <https://doi.org/10.1080/09537280802601444>
- Neumann, W.P., Winkel, J., Medbo, L., Magneberg, R., Mathiassen, S.E., 2006. Production system design elements influencing productivity and ergonomics: A case study of parallel and serial flow strategies. *Int. J. Oper. Prod. Manag.* 26, 904–923. <https://doi.org/10.1108/01443570610678666>
- Nguyen, V.V., Hartmann, D., König, M., 2012. A distributed agent-based approach for simulation-based optimization. *Adv. Eng. Inform.* 26, 814–832. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2012.06.001>
- Occhipinti, E., 1998. OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Ergonomics* 41, 1290–1311. <https://doi.org/10.1080/001401398186315>
- Pace, D.K., 2000. Ideas about simulation conceptual model development. *Johns Hopkins APL Tech. Dig.* 21, 327–336.
- Perez, J., de Looze, M.P., Bosch, T., Neumann, W.P., 2014. Discrete event simulation as an ergonomic tool to predict workload exposures during systems design. *Int. J. Ind. Ergon.* 44, 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2013.04.007>
- Pidd, M., 2004. *Computer Simulation in Management Science*, 5 edition. ed. Wiley, Chichester, England ; Hoboken, NJ.
- Putz-Anderson, V., Bernard, B.P., Burt, S.E., Cole, L.L., Fairfield-Estill, C., Fine, L.J., Grant, K.A., Gjessing, C., Jenkins, L., Hurrell Jr, J.J., others, 1997. *Musculoskeletal disorders and workplace factors*. Natl. Inst. Occup. Saf. Health NIOSH.
- Queyranne, M., 1985. Bounds for Assembly Line Balancing Heuristics. *Oper. Res.* 33, 1353–1359. <https://doi.org/10.1287/opre.33.6.1353>
- Raouf, A., Ben-Daya, M. (Eds.), 1995. *Flexible manufacturing systems: recent developments, Manufacturing research and technology*. Elsevier, Amsterdam.
- Rekiek, B., Delchambre, A., 2006. *Assembly line design: the balancing of mixed-model hybrid assembly lines with genetic algorithms*, Springer series in advanced manufacturing. Springer, London.
- Rinehart, J., Huxley, C., Robertson, D., 1997. *Just Another Car Factory?: Lean Production and Its Discontents*. Cornell University Press, Ithaca, NY.
- Robinson, S. (Ed.), 2011. *Conceptual modeling for discrete-event simulation*, A Chapman & Hall book. CRC Press, Boca Raton, Fla.

- Robinson, S., 2006. Conceptual modeling for simulation: issues and research requirements, in: Proceedings of the 38th Conference on Winter Simulation. Winter Simulation Conference, pp. 792–800.
- Robinson, S., Brooks, R., Kotiadis, K., Zee, D.-J.V.D., 2010. Conceptual Modeling for Discrete-Event Simulation. CRC Press.
- Rodde, G., 1989. Les systèmes de production: Modélisation et performances. Hermes Sciences Publicat., Paris.
- Rohmert, W., 1960. Ermittlung von Erholungspausen für statische Arbeit des Menschen. Springer.
- Rooda, J.E., Vervoort, J., 2007. Analysis of manufacturing systems. Univ. Technol. Eindh. Eindh.
- Rose, L., Ericson, M., Ortengren, R., 2000. Endurance time, pain and resumption in passive loading of the elbow joint. *Ergonomics* 43, 405–420. <https://doi.org/10.1080/001401300184495>
- Ruiz, N., Giret, A., Botti, V., Fera, V., 2014. An intelligent simulation environment for manufacturing systems. *Comput. Ind. Eng.* 76, 148–168. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.06.013>
- SATO, H., OHASHI, J., IWANAGA, K., Yoshitake, R., SHIMADA, K., 1984. Endurance time and fatigue in static contractions. *J. Hum. Ergol. (Tokyo)* 13, 147–154.
- Scholl, A., Becker, C., 2006. State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. *Eur. J. Oper. Res.* 168, 666–693. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.022>
- Scholl, A., Voss, S., 1997. Simple assembly line balancing-Heuristic approaches. *J. Heuristics* 2, 217–244. <https://doi.org/10.1007/BF00127358>
- Schonberger, R., 1982. Japanese Manufacturing Techniques: Nine Hidden Lessons in Simplicity. Simon and Schuster.
- Shen, W., Hao, Q., Yoon, H.J., Norrie, D.H., 2006. Applications of agent-based systems in intelligent manufacturing: An updated review. *Adv. Eng. Inform.* 20, 415–431. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2006.05.004>
- Shephard, R.J., 1999. Age and Physical Work Capacity. *Exp. Aging Res.* 25, 331–343. <https://doi.org/10.1080/036107399243788>
- Smith, A., Krueger, A.B., 2003. The Wealth of Nations, annotated edition edition. ed. Bantam Classics, New York.
- Spencer, S.M., 1993. Competence at Work: Models for Superior Performance, 1 edition. ed. Wiley, New York etc.

- Steinbruner, J.D., 2002. *The Cybernetic Theory of Decision: New Dimensions of Political Analysis*. Princeton University Press.
- Stützel, T., 2006. Iterated local search for the quadratic assignment problem. *Eur. J. Oper. Res.* 174, 1519–1539. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.01.066>
- Taylor, F.W., 1998. *The Principles of Scientific Management*. Dover Publications.
- Terzi, S., Cavalieri, S., 2004. Simulation in the supply chain context: a survey. *Comput. Ind.* 53, 3–16. [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(03\)00104-0](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(03)00104-0)
- Tolin, P., Simon, J.R., 1968. Effect of Task Complexity and Stimulus Duration on Perceptual-Motor Performance of Two Disparate Age Groups. *Ergonomics* 11, 283–290. <https://doi.org/10.1080/00140136808930972>
- Treville, S., Antonakis, J., 2006. Could lean production job design be intrinsically motivating? Contextual, configurational, and levels-of-analysis issues. *J. Oper. Manag.* 24, 99–123. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2005.04.001>
- Treville, S.D., 1987. *Disruption, Learning, and System Improvement in Just-in-time Manufacturing*. Helsinki School of Economics and Business Administration.
- Tuncel, S., Genaidy, A., Shell, R., Salem, S., Karwowski, W., Darwish, M., Noel, F., Singh, D., 2008. Research to practice: Effectiveness of controlled workplace interventions to reduce musculoskeletal disorders in the manufacturing environment—critical appraisal and meta-analysis. *Hum. Factors Ergon. Manuf. Serv. Ind.* 18, 93–124. <https://doi.org/10.1002/hfm.20104>
- van der Windt, D.A., Thomas, E., Pope, D.P., de Winter, A.F., Macfarlane, G.J., Bouter, L.M., Silman, A.J., 2000. Occupational risk factors for shoulder pain: a systematic review. *Occup. Environ. Med.* 57, 433–442.
- Vasiljevic, D., Trkulja, Z., Danilovic, M., 2014. Towards an extended set of production line performance indicators. *Total Qual. Manag. Bus. Excell.* Vol.25, p.618-634. <https://doi.org/10.1080/14783363.2013.850811>
- Vézina, N., 2001. La pratique de l'ergonomie face aux TMS: ouverture à l'interdisciplinarité. *Comptes Rendus Congrès SELF-ACE*.
- Viitasalo, J.T., Era, P., Leskinen, A.-L., Heikkinen, E., 1985. Muscular strength profiles and anthropometry in random samples of men aged 31–35, 51–55 and 71–75 years. *Ergonomics* 28, 1563–1574. <https://doi.org/10.1080/00140138508963288>
- Voss, C.A., 1995. Operations management—from Taylor to Toyota—and beyond? *Br. J. Manag.* 6, S17–S29.
- Walleigh, R.C., 1986. What's Your Excuse for Not Using JIT? [WWW Document]. *Harv. Bus. Rev.* URL <https://hbr.org/1986/03/whats-your-excuse-for-not-using-jit> (accessed 3.1.17).

- Wemmerlov, U., Johnson, D.J., 1997. Cellular manufacturing at 46 user plants: Implementation experiences and performance improvements. *Int. J. Prod. Res.* 35, 29–49. <https://doi.org/10.1080/002075497195966>
- Whitney, D.E., 2004. *Mechanical assemblies: their design, manufacture, and role in product development*, Oxford series on advanced manufacturing. Oxford University Press, New York.
- Wright, T.P., 1936. Factors Affecting the Cost of Airplanes. *J. Aeronaut. Sci.* Vol.3, p.122-128. <https://doi.org/10.2514/8.155>
- Xu, Z., Ko, J., Cochran, D.J., Jung, M.-C., 2012. Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models. *Comput. Ind. Eng.* 62, 431–441. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.10.008>
- Yoon, S.-Y., Ko, J., Jung, M.-C., 2016. A model for developing job rotation schedules that eliminate sequential high workloads and minimize between-worker variability in cumulative daily workloads: Application to automotive assembly lines. *Appl. Ergon.* 55, 8–15. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2016.01.011>
- Zandin, K.B., 2002. *MOST Work Measurement Systems, Third Edition*,. CRC Press.
- Zeigler, B.P., 1991. *Object-oriented simulation with hierarchical, modular models: intelligent agents and endomorphic systems*, 2. print. ed. Acad. Press, Boston.
- Zeigler, B.P., Praehofer, H., Kim, T.G., 2000. *Theory of Modeling and Simulation: Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems*. Academic Press.
- Zhang, X., Schmidt, L., Schlick, C.M., Reuth, R., Luczak, H., 2008. A human task-oriented simulation study in autonomous production cells. *Int. J. Prod. Res.* 46, 5013–5041. <https://doi.org/10.1080/00207540701222768>

Annexes

Annexe 1 : Les tableaux des temps de récupération (Kanawaty and International Labour Office, 1992)

Les tableaux des temps de récupération sont utilisés pour déterminer le temps nécessaire pour avoir une récupération quand la fatigue a eu lieu. Ces tableaux attribuent des points à des facteurs de stress causant l'augmentation de la fatigue dans une situation de travail. La somme totale de ces points donne le pourcentage du temps réservé à la récupération sur le temps total du service. Cette section détaille des tableaux relatifs à certains de ces facteurs de stress.

1.1. Nombre de points en fonction de la force appliquée

Les points accordés suite à l'application d'une force dépend du poids manipulé (exprimé en pound) et du niveau du stress. Le Tableau 33 permet de déterminer les nombres de points accordés à une force donnée lorsque le stress est bas.

Tableau 33 : Points accordés au facteur « force appliquée » lorsque le stress est bas

lb.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	3	4	7	8	9	10
10	11	12	13	14	14	15	16	16	17	18
20	19	19	20	21	22	22	23	23	24	25
30	26	26	27	27	28	28	29	30	21	31
40	32	32	33	34	34	35	35	36	36	37
50	38	38	39	39	40	41	41	42	42	43
60	43	43	44	44	45	46	46	47	47	48
70	48	49	50	50	50	51	51	52	52	53
80	54	54	54	55	55	56	56	57	58	58
90	58	59	59	60	60	60	61	62	62	63
100	63	63	64	65	65	66	66	66	67	67
110	68	68	68	69	69	70	71	71	71	72
120	72	73	73	73	74	74	75	75	76	76
130	77	77	77	78	78	78	79	80	80	81
140	81	82	82	82	83	83	84	84	84	85

La première ligne du tableau spécifie l'unité de la valeur de la force appliquée. La première colonne spécifie les dizaines de cette valeur. Par exemple, pour le nombre de points accordés à l'application d'une force de 82, il faut se mettre en première ligne sur la valeur 2 et sur la première colonne sur la valeur 80. L'intersection donne le nombre 54 (comme encadré dans le Tableau 33).

Le Tableau 34 permet de déterminer le nombre de points accordés pour l'application d'une force avec un stress modéré. Le Tableau 35 permet de déterminer ce nombre de points quand la force est appliquée avec un stress élevé.

Tableau 34 : Nombre de points accordés suite à l'application d'une force lorsque le stress est modéré

lb.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	0	3	6	8	10	12	14
10	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
20	25	26	27	28	29	30	31	32	32	33
30	34	35	36	37	38	39	39	40	41	41
40	42	43	44	45	46	46	47	48	49	50
50	50	51	51	52	53	54	54	55	56	56
60	57	58	59	59	60	61	61	62	63	64
70	64	65	65	66	67	68	69	70	70	71
80	72	72	72	73	73	74	74	75	76	76
90	77	78	79	79	80	80	81	82	82	83
100	84	85	86	86	87	88	88	88	89	90
110	91	92	93	94	95	95	96	96	97	97
120	97	98	98	98	99	99	99	100	100	100
130	101	101	102	102	103	104	105	106	107	108
140	109	109	109	110	110	111	112	112	112	113

Tableau 35 : Nombre de points accordés pour l'application d'une force donnée avec un stress élevé

lb.	0	1	2	3	3-4	4	5	6	7	8	9
0	0	0	0	3	6	8	11	13	15	17	18
10	20	21	22	24		25	27	28	29	30	32
20	33	34	35	37		38	39	40	41	43	44
30	45	46	47	48		49	50	51	52	54	55
40	56	57	58	59		60	61	62	63	64	65
50	66	67	68	69		70	71	72	73	74	75
60	76	76	77	78		79	80	81	82	83	84
70	85	86	87	88		88	89	90	91	92	93
80	94	94	95	96		97	98	99	100	101	101
90	102	103	104	105		105	106	107	108	109	110
100	110	111	112	113		114	115	115	116	117	118
110	119	119	120	121		122	123	124	124	125	126
120	127	128	128	129		130	130	131	132	133	134
130	135	136	136	137		137	138	139	140	141	142
140	142	143	143	144		145	146	147	148	148	149

Dans la suite, les tableaux permettant de déterminer le nombre de points concernant les facteurs posture, vibrations et le temps cycle sont présentés.

1.2. Posture

La nature de la posture adoptée lors de la réalisation du travail implique un taux spécifique de fatigue. Selon ces postures, le Tableau 36 donne les points accordés à ce facteur de stress.

Tableau 36 : Points accordés selon la nature de posture du travail

	Points
Position assise	0
Position assise inconfortable ou alternance entre position assise et debout	2
Debout ou en mouvement libre	4
Montant ou descendant un escalier librement	5
Position debout ou en mouvement avec un poids	6
Montant ou descendant une échelle, penchant, ou position fléchie	8
En ramassant un objet avec un posture inconfortable ou en manipulant du ballast	10
Penchant, ramassant ou jetant des objets constamment	12
Extraction du charbon avec des pioches	16

1.3. Vibrations

La présence ou non des vibrations peut impacter l'évolution de la fatigue. Ainsi, selon la nature de la tâche exécutée, à savoir, s'il donne lieu plus ou moins à des vibrations mécaniques, un nombre de points est accordé (Tableau 37).

Tableau 37 : Nombre de points accordés à une tâche selon la nature des vibrations présentes.

	Points
Manipulant des objet légers	1
<ul style="list-style-type: none"> • Machine à coudre électrique • Presse ou une guillotine, si l'opérateur tient le matériau • Sciage 	2
<ul style="list-style-type: none"> • Manipulation du ballast • Perceuse manipulée par une seule main 	4
Pioche	6
Perceuse manipulée avec deux mains	8
Perceuse du goudron ou du ciment	15

1.4. Temps de cycle

Selon le temps de cycle d'une tâche, la fatigue est plus ou moins prononcée. Le Tableau 38 donne le nombre de points selon la durée moyenne du cycle.

Tableau 38 : Nombre de points accordés à une tâche selon son temps de cycle moyen

Temps cycle moyen (10 ² minutes)	Points
16-17	1
15	2
13-14	3
12	4
10-11	5
8-9	6
7	7
6	8
5	9
Moins de 5	10

1.5. Habillement restrictif

L'habillement de l'opérateur lors de la réalisation d'une tâche impacte sa fatigue. Par conséquent, différents nombres de points sont accordés aux facteurs habillement selon la nature de celui-ci. Le Tableau 39 détaille le nombre de points à accorder à une tâche selon la nature d'habillement adopté.

Tableau 39 : Nombre de points accordés à une tâche selon la nature d'habillement de l'opérateur

	Points
Gants fins en caoutchouc	1
Gants ménagers en caoutchouc	2
Bottes en caoutchouc	
Lunettes de protection	3
Gants industriels en caoutchouc ou en cuire	5
Masque de visage	8
Combinaison protectrice, manteau à fourrure	15
Vêtements protectrices restrictives avec masque de respiration	20

1.6. Concentration – anxiété

Selon le niveau de concentration nécessaire par la réalisation d'une tâche ou l'anxiété éprouvée par l'opérateur, un nombre de points évaluant le besoin en termes de récupération est accordé. Le Tableau 40 détaille la valeur de points à accorder à une tâche en considérant la concentration et/ou l'anxiété impliquée par son exécution.

Tableau 40 : Points accordés à une tâche selon le niveau de concentration demandé ou/et l'anxiété présente

	Points
Opération d'assemblage routinière	0
Manipuler du ballast	
Opération de conditionnement, d'arrangement ou de nettoyage	1
Pousser un chariot le long d'un couloir	
Alimenter une presse, dégager un produit	2
Charger une batterie	
Peindre des murs	3
Assembler des lots simples et petits sans grande concentration	4
Utiliser une machine à coudre automatique	
Effectuer des opérations d'inspection	5
Chercher des commandes dans un magasin et les mettre sur un chariot	
Charger/décharger une presse	6
Peindre par spray des structures métalliques	
Sommer des chiffres	7
Inspection détaillée des composants	
Effectuer des opérations de polissage	8
Guider la couture par main sur une machine à coudre	10
Mémoriser de aspects, les employer pour faire de la sélection	
Effectuer des opérations d'assemblage très complexes	
Souder de pièces	
Conduire un bus dans un trafic dense	15

1.7. Monotonie

La monotonie génère de la fatigue psychologique. Par conséquent, selon la nature de la tâche, des points sont à accorder. Ceux-ci permettent de déterminer le temps de récupération nécessaire. Tableau 41 détaille le nombre des points à accorder selon la nature de la tâche.

Tableau 41 : Points accordés à une tâche selon la monotonie

	Points
Deux opérateurs qui réalisent un travail en binôme	0
Nettoyage des chaussures	3
Opérateur dans un travail répétitif	5
Opérateur travaillant seul, sur une tâche non répétitive	
Inspection routinière	6
Sommer des colonnes de chiffres similaires	8
Opérateur opérant seul une tâche très répétitive	11

1.8. Tension visuelle

Selon la tension visuelle causée par l'exécution de la tâche, la fatigue de l'opérateur est plus ou moins prononcée. Le Tableau 42 donne le nombre de points à accorder à une tâche en considérant la tension visuelle susceptible d'avoir lieu :

Tableau 42 : Points à accorder selon la tension visuelle

	Points
Travail industriel normal	0
Inspection de défauts visibles	2
Rangement d'articles selon leurs couleurs	
Travail industriel dans un environnement qui n'est pas bien éclairé	
Inspection détaillée de défauts	4
Classer des pommes	
Lire un journal dans un bus	8
Soudage en arc en utilisant un masque	10
Inspection visuelle continue	

1.9. Bruit

La présence du bruit peut impacter l'opérateur et l'évolution de sa fatigue. Ainsi, dans des environnements de travail où le bruit est présent, des points sont à accorder afin de calculer le temps de récupération nécessaire. Le Tableau 43 donne le nombre de points à accorder selon la nature de l'environnement de travail.

Tableau 43 : Points à accorder selon le bruit présent dans la situation du travail

	Points
Travail dans un environnement calme, sans bruit	0
Usine d'assemblage léger	
Travail dans un bureau en ville avec un bruit continu causé par le trafic routier	1
<ul style="list-style-type: none"> • Atelier de machines légères • Bureau ou atelier d'assemblage avec un bruit léger 	2
Machine pour traiter du bois	4
Forgeage	5
Rivetage	9
Opération de perçage sur du goudron	10

1.10. Conversion de la somme des points en pourcentage

Après avoir déterminé les points accordés à chaque facteur de stress et avoir fait leur somme, le Tableau 44 permet de convertir ce nombre en pourcentage. La première colonne verticale contient les dizaines des points cumulés. La première ligne correspond aux unités de cette somme. L'intersection correspond au pourcentage du temps de récupération à accorder pour la tâche.

Tableau 44 : Tableau de conversion de la somme cumulée des points en pourcentage

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	10	10	10	10	10	10	10	11	11	11
10	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12
20	13	13	13	13	14	14	14	14	15	15
30	15	16	16	16	17	17	17	18	18	18
40	19	19	20	20	21	21	22	22	23	23
50	24	24	25	26	26	27	27	28	28	29
60	30	30	31	32	32	33	34	34	35	36
70	37	37	38	39	40	40	41	42	43	44
80	45	46	47	48	48	49	50	51	52	53
90	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
100	64	65	66	68	59	70	71	72	73	74
110	75	77	78	79	80	82	83	84	85	87

Annexe 2 : Fichier d'entrée du simulateur

2.1. Structure globale

Le fichier d'entrée de l'outil de simulation formaté en XML est composé de deux parties :

- La structure physique notée *PS_PHYSICAL_STRUCTURE* ;
- La structure organisationnelle notée *PS_ORGANIZATIONAL_STRUCTURE*.

La première partie contient la déclaration des différentes composantes du système : opérateurs ; moyens transfert ; postes de travail manuels, etc. Elle spécifie également les paramètres de chaque entité. La deuxième partie décrit les activités et les tâches réalisées par les opérateurs. Le Code 1 donne un aperçu de la structure globale du fichier.

```
<PS_DESIGN>
  <PS_PHYSICAL_STRUCTURE>
    <!-- définition de la structure : les composantes du système -->
  </PS_PHYSICAL_STRUCTURE>

  <PS_ORGANIZATIONAL_STRUCTURE>
    <!-- définition de l'organisation : activités et organisation correspondante -->
  </PS_ORGANIZATIONAL_STRUCTURE>
</PS_DESIGN>
```

Code 1 : Structure globale du fichier d'entrée de l'outil de simulation

2.2. Déclaration d'un opérateur

La déclaration d'un opérateur sous la partie structure physique se fait comme le spécifie le Code 2 :

```
<worker id="01" name ="Worker1" >
  <physics      age="38"  recoveryRate="0.11"/>
  <cognition    learningRate="0.8"  motSlope="3"  borSlope="3"  motivationLimit="180"/>
  <initialPosition  stride="3"  unit="meter"  x="0"  y="0"  z="0"  />
  <basicAbilitiesLevels  value="0.8 0.4 0.6"/>
</worker>
```

Code 2 : Déclaration d'un opérateur

L'entête contient l'identifiant et le nom de l'opérateur. Un sous-nœud permet de définir le module physique (*physics*) de l'opérateur. Il contient l'attribut âge (*age*) et le taux de récupération (*recoveryRate*). Le sous-nœud *cognition* contient l'attribut permettant de définir le taux d'accoutumance (*learningRate*), le taux de motivation (*motSlope*), le taux de lassitude (*borSlope*) et la durée maximale de motivation (*motivationLimit*). Le nœud *initialPosition* permet de spécifier la position initiale de l'opérateur. Le nœud *basicAbilitiesLevels* contient les valeurs des niveaux des capacités de base de l'opérateur. L'ordre des sous-nœuds n'est pas obligatoire.

2.3. Déclaration d'un moyen de transfert

La déclaration d'un moyen de transfert se fait par l'insertion d'un nœud *transferMean* dans le fichier xml d'entrée comme le spécifie le code suivant :

```
<transferMean id="01" name="TM001" destinationId="02" bhType="infiniteInput">
  <position stride="3" unit="meter" x="-3.4" y="1.3" z="0" />
  <behavior pattern="exponential" parameters="0.5" arNumber="1" unit="min" productTypes="PartB
PartA" proportions="0.5 0.5"/>
</transferMean>
```

Code 3 : Déclaration d'un moyen de transfert

L'entête du nœud contient l'identifiant du moyen de transfert, son nom, l'identifiant de l'entité fixe de destination. Si le moyen de transfert n'est pas connecté à une entité fixe, cet attribut est mis à -1. L'attribut *bhType* permet de déclarer le comportement de ce moyen. On distingue trois comportements :

- *Normal* : comportement normal, transfert d'entités contenues dans le moyen ;
- *InfiniteInput* : le moyen se comporte comme une entrée de système, des entités mobiles sont générées d'une façon donnée décrite dans le sous-nœud *behavior* ;
- *InfiniteOutput* : le moyen détruit les entités mobiles qu'il contient à la fin de transfert avec une certaine façon décrite dans le sous-nœud *behavior*.

Quant au sous-nœud *behavior*, il permet de décrire la façon avec laquelle la création ou la destruction des entités mobiles se fait. L'attribut *pattern* spécifie la nature de la loi des arrivées (création) ou des départs (destruction). Il peut prendre les valeurs *constant*, *exponential*, *erlang* ou *normal* pour indiquer des arrivées ou des départs constants, suivant la loi Exponentielle, suivant la distribution d'Erlang ou selon une loi Normale. D'autres lois peuvent éventuellement être ajoutées dans le programme.

L'attribut *parameters* sert à spécifier les paramètres de ces distributions et l'attribut *arrNumber* (*depNumber* dans le cas d'une sortie de système) spécifie le nombre d'entités mobiles par arrivée (par départ). L'attribut *productType* permet de spécifier le type d'entités mobiles concernées par les événements d'arrivées ou de départs. Dans le cas où les événements concernent plusieurs types d'entités mobiles, l'attribut *proportion* permet de spécifier la proportion de chacun d'entre eux.

2.4. Déclaration d'un poste de travail manuel

Le Code 4 permet d'ajouter un poste de travail manuel à la structure du système :

```
<manualWorkStation id="02" name="MWS001">
  <position stride="3" unit="meter" x="0" y="1" z="0" />
</manualWorkStation>
```

Code 4 : Déclaration d'un poste de travail

L'entête permet de spécifier l'identifiant du poste et son nom. Le sous-nœud *position* permet de spécifier la position du poste en question.

2.5. Déclaration d'un produit

Pour déclarer un produit sous la partie structure organisationnelle, le Code 5 est à insérer. Dans l'entête, l'attribut *type* permet de déclarer le modèle du produit (dans le code en dessous, il s'agit de la pièce de type A). L'attribut *quantity* permet de déclarer la quantité à produire dans un horizon donné. L'attribut *weight* permet de déclarer le poids du produit (considéré constant).

```
<product type="PartA" quantity="2012" weight="2.5" weightUnit="kg">
  <geoXts dx="0.1" dy="0.2" dz="0.1" unit="meter" geomodelID="cube" color="0 0 1" />
</product>
```

Code 5 : Déclaration d'un produit

Le sous-nœud *geoXts* permet de spécifier les caractéristiques géométriques du produit, notamment les dimension suivant l'axe x (*dx*), l'axe y (*dy*) et suivant l'axe z (*dz*). L'attribut *geomodelID* spécifie l'identifiant du modèle géométrique employé pour modéliser géométriquement le produit.

2.6. Déclaration des capacités de base

Pour déclarer les capacités de base permettant d'évaluer la performance d'un opérateur, le Code 6 est à insérer dans le fichier d'entrée sous la structure organisationnelle.

```
<basicAbilities>
  <basicAbility id="01" name="lambs coordination" />
  <basicAbility id="02" name="static force" />
  <basicAbility id="03" name="dynamic force" />
</basicAbilities>
```

Code 6 : Déclaration des capacités de base considérées dans la simulation

Sous le nœud principal (*basicAbilities*), chaque sous-nœud *basicAbility* permet de déclarer une capacité de base considérée. Il contient l'identifiant *id* de la capacité et le nom (attribut *name*).

2.7. Déclaration des facteurs de stress

Le Code 7 permet de déclarer les facteurs de stress considérés dans la simulation. Il est à mettre sous la partie structure organisationnelle.

```
<stressFactors>
  <stressFactor id="01" name="Force-exerted" description="" />
  <stressFactor id="02" name="Posture" description="" />
  <stressFactor id="03" name="Vibration" description="" />
  <stressFactor id="04" name="Concentration-anxiety" description="" />
  <stressFactor id="05" name="Monotony" description="" />
  <stressFactor id="06" name="Cycle" description="" />
</stressFactors>
```

Code 7 : Déclaration des facteurs du stress

Sous le nœud principal *stressFactors*, le sous-nœud *stressFactor* permet de déclarer un facteur du stress identifié par l'attribut *id*, dont le nom est spécifié dans l'attribut *name*. L'attribut *description* permet de décrire chaque facteur.

2.8. Déclaration des compétences

Le Code 8 permet de déclarer une compétence. Il est à mettre sous la partie structure organisationnelle.

```
<skills>
<skill id="01" name="product assembly" requiredBALevels="0.8 0.2 0.5"/>
</skills>
```

Code 8 : Déclaration d'une compétence.

Sous le nœud principal, le sous-nœud *skill* permet de déclarer une compétence. L'attribut *id* permet de l'identifier. L'attribut *name* contient le nom de la compétence. L'attribut *requiredBALevels* contient la valeur des niveaux de capacités de base requis pour réaliser une tâche qui fait appelle à cette compétence. Selon ces niveaux et en comparaison avec les niveau des capacités de base de l'opérateur, la performance de ce dernier lors de la réalisation de la tâche varie (voir le modèle de la section 3.2.2-C)

2.9. Déclaration d'une tâche

Le Code 9 permet de déclarer une tâche. Celle-ci est à définir sous la partie structure organisationnelle.

```
<task id="01" productType ="PartA" averageLoad ="20" mvc ="300" D="43200" difficulty="1.765"
requiredSkillsIds="01">
  <processLogic productCurrentStage="0" productNextStage="1"/>
  <processingTime Tstat="1.26" Tdyn_1="1.26" unit ="mn" distribution ="constant" hfWeights="0.1 0.8
0.1" w1="0.44" w2="0.56"/>
  <sequenceLogic seq="GT PT PR GT PT" meanIds="02 02 02 02 03" fatigueRates="0.0 0.0 0.0 0.0 0.0" />
  <stressFactorsLevels value ="20 4 1 4 5 5" />
  <stressFactorsLevels value ="20 4 1 4 5 5" />
  <stressFactorsLevels value ="38 4 1 4 5 5" />
  <stressFactorsLevels value ="20 4 1 4 5 5" />
  <stressFactorsLevels value ="20 4 1 4 5 5" />
</task>
```

Code 9 : Déclaration d'une tâche.

L'entête permet de spécifier l'identifiant, le type du produit traité, la charge physique moyenne en newtons subie lors de la réalisation de la tâche *averageLoad*, la contraction volontaire maximale du groupe musculaire employé *mvc*, la durée d'oubli totale *D* et sa difficulté de réalisation : paramètre α du modèle de fiabilité (section 3.2.2.E).

Le sous-nœud *processLogic* permet de spécifier la logique de la réalisation de la tâche, à savoir, la phase d'évolution du produit avant et après traitement.

Le sous-nœud *processingTime* spécifie les caractéristiques du temps opératoire, notamment, T_{stat} qui représente la partie statique de ce temps, T_{dyn} qui représente la partie dynamique variable à raison des facteurs humains, la distribution de ce temps si des variations aléatoires sont à considérer, et les poids d'impact des facteurs humains sur la composante variable du temps opératoire. Les attributs *w1* et *w2* représente les paramètres du modèle de fiabilité introduit dans la section 3.2.2.E.

Le sous-nœud *sequenceLogique* permet de spécifier la logique séquentielle de la réalisation de la tâche. L'attribut *seq* contient les phases qui composent la séquence du travail. L'attribut *meanIds* spécifie les identifiants des moyens employés par chaque phase. L'attribut *fatigueRate* spécifie le taux de fatigue correspondant à chacune des phases. S'il est mis à 0, le simulateur calcule sa valeur à partir des intensités des facteurs de stress présents dans chacune des phases. Le sous-nœud à la ligne *i* permet de spécifier les points accordés aux facteurs de stress dans la phase *i*.

2.10. Déclaration d'une activité

Pour déclarer une activité, la Code 10 est à insérer sous la partie structure organisationnelle.

```
<activity activityId="01" workerId= "01" >  
  <containedTask taskId = "01" priority = "02" />  
  <ContainedTask taskId = "02" priority = "01" />  
</activity>
```

Code 10 : Déclaration d'une activité

L'entête permet de spécifier l'identifiant de l'activité *activityId*. Il permet également de déclarer l'identifiant de l'opérateur qui est responsable de l'activité. Le sous-nœud *containedTask* permet de lier une tâche déclarée à l'activité. En spécifiant son identifiant *taskId*, et sa priorité *priority*.

Annexe 3 : Mode d'emploi de l'outil AEN-PRO

Cette partie représente un guide d'utilisation du démonstrateur développé dans le cadre de ces travaux de thèse. Il est susceptible que le mode d'emploi évolue.

Il est important, en préambule, de noter que le code développé représente un démonstrateur prouvant la faisabilité des propositions faites dans ces travaux de thèse. Il n'est nullement un logiciel complet. L'optimisation du code reste à faire, et certaines fonctionnalités restent limités.

3.1. Prérequis

L'outil est présent sous deux formes :

- Sous forme d'un fichier .jar exécutable ;
- Sous forme d'un code source modifiable.

Pour faire tourner le fichier exécutable, Il faut avoir environnement d'exécution java (Java Runtime Environment JRE) 8.0 ou supérieur installé sur la machine.

Pour effectuer du développement et modifier le code source de l'outil, en plus de l'environnement de l'exécution, il faut avoir un Kit de Développement Java (Java Development Kit JDK). Ils sont disponibles tous les deux à l'adresse suivante :

<http://www.oracle.com/technetwork/java/javase/downloads/jre8-downloads-2133155.html>

La modification du code source peut se faire sur un environnement de développement intégré (IDE). Le développement de l'outil a été fait sous Eclipse Luna disponible à l'adresse suivante :

<https://eclipse.org/luna/>

Le code source contient également les bibliothèques nécessaires pour le développement des systèmes multi-agents (JADE) et la modification du moteur graphique (jogl-2.1). Cependant il faut les lier au projet de développement car leur chemin d'accès est défini d'une manière absolue. Ce mode d'emploi ne traite pas cette partie.

3.2. Charger une conception

En lançant l'outil, l'interface illustrée dans la Figure 68 est affichée. L'interface dispose d'une barre de menu (1) qui permet de charger le fichier de configuration et de paramétrer l'outil selon les préférences de l'utilisateur. La barre d'outils (2) contient les outils nécessaires pour gérer un projet de simulation. Notamment les options de lancement et de pause de la simulation, l'ajout d'entités et le sauvegarde du projet. Elle permet de visualiser la vitesse de simulation et de la contrôler. La fenêtre 3 permet de visualiser la conception sous forme d'un arbre. La fenêtre 4 permet de visualiser la conception sous forme d'un arbre.

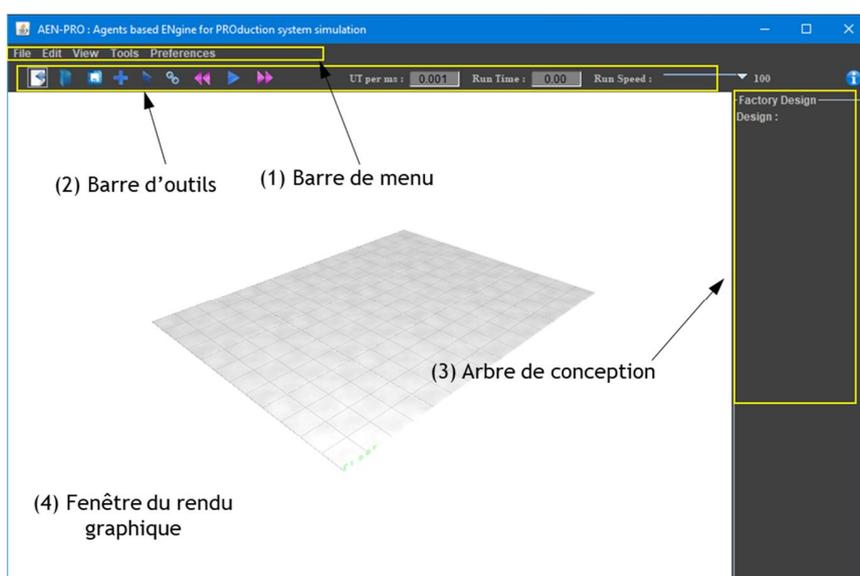


Figure 68 : Interface de l'outil AEN-PRO.

Pour charger une conception, appuyer sur l'onglet *Fichier*, puis *Load*, puis *Load Design*. Une deuxième fenêtre apparaît (transition 1) permettant de naviguer et de trouver le fichier à charger. Si sa structure est correcte, une deuxième fenêtre notifie le succès de l'opération (transition 2)

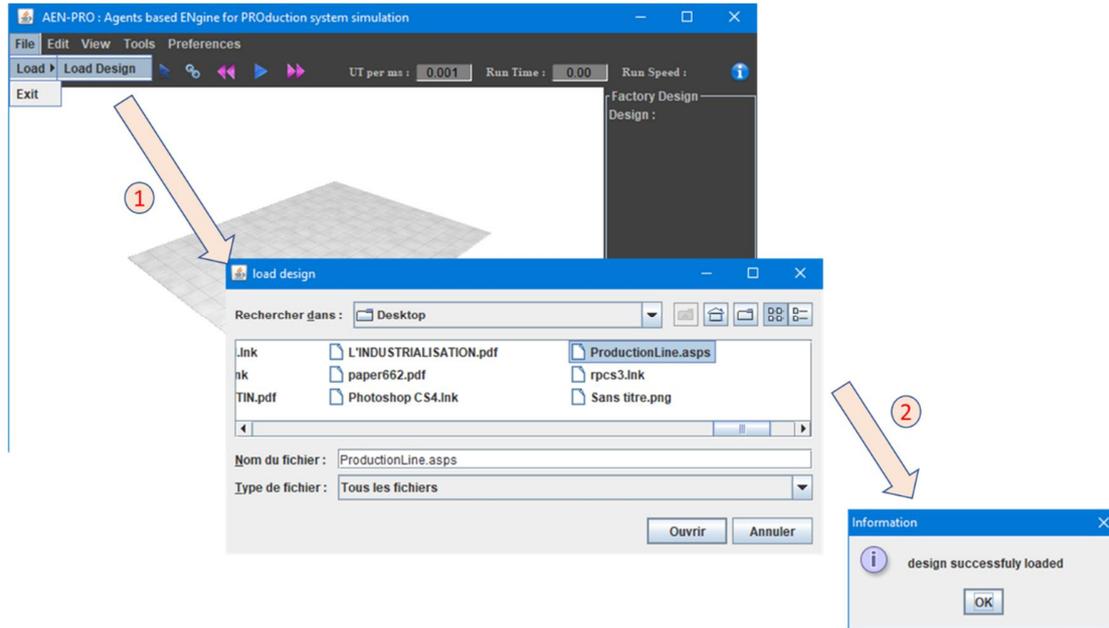


Figure 69 : Opération de chargement d'un fichier de conception.

Quand le fichier est chargé, le modèle 3D apparaît sur la fenêtre du rendu. L'arbre de conception est actualisé pour décrire la composition du système de production.

3.3. Lancement d'une simulation

Pour lancer une simulation, il suffit d'appuyer sur l'icône correspondante (Figure 70).

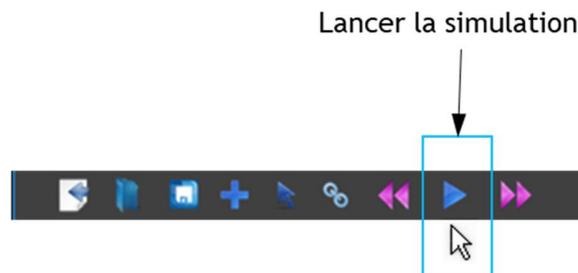


Figure 70 : Lancement de la simulation.

Par le biais de l'animation, l'outil donne un premier rendu du comportement du système. Des messages sont également affichés sur la console. Des fichiers sont générés automatiquement sous le répertoire « Results/ results of dd-MMMM-yyyy HH-mm ». La chaînes dd désigne le jour en

chiffre, MMMM désigne le mois en lettres. La chaîne yyyy désigne l'année en chiffres. HH-mm désigne l'heure de la simulation.

3.4. Résultats de la simulation

A la fin de la simulation, le message suivant est affiché « *simulation end time reached* ». Il est également possible que l'utilisateur arrête manuellement la simulation. Les sous-répertoires suivants contiennent les résultats obtenus :

- La sous-répertoire « */fatigue* » contient les fichiers nécessaires pour tracer les courbes de fatigue ;
- La sous-répertoire « */learning* » contient les fichiers nécessaires pour tracer les courbes des temps de traitement des tâches. ;
- Le sous-répertoire « *motivation* » contient les fichiers nécessaires pour tracer les courbes de la motivation ;
- Le sous-répertoire « */workRequirement* » contient les fichiers nécessaires pour tracer les courbes des paramètres *RT*, *TM* ainsi que les durées des séquences de travail. Ces sorties sont également exploitées pour tracer l'indicateur N_m .

Le nombre des produits réalisés, le nombre des produits rejetés ainsi que la distribution des états élémentaires sont affichés sur la console de simulation. Le Tableau 45 donne les différents fichiers Matlab utilisés pour de tracer les courbes de sortie. Ils sont inclus dans support de numérique.

Tableau 45 : Fichiers Matlab pour le traçage des courbes

Fichier Matlab	Fonction
taskProcTimePloter_v1.m	Tracer les temps opératoires
workers_fatigue_ploter_v3.m	Tracer les courbes de fatigue
motivation_ploter_v1.m	Tracer les courbes de motivation
TM_ploter_v1.m	Tracer l'évolution de la marge de manœuvre temporelle d'un opérateur donné
RT_ploter_v3.m	Tracer l'évolution du paramètre RT pour un opérateur donné
Nm_ploter_v1.m	Tracer l'évolution de l'indicateur N_m pour un opérateur donné
taskSeqDuration_v1.m	Tracer les durées totales de la séquence de travail pour un opérateur donné

Proposition d'une méthode outillée pour améliorer les aspects santé-sécurité dès les premières phases de conception des systèmes de production par la prise en compte des marges de manœuvre temporelles

RESUME : Les systèmes de production actuels sont soumis à des contraintes de réactivité et de productivité. Par conséquent, les variabilités du flux physique sont de plus en plus prononcées. Ces variabilités s'amplifient en raison d'un ensemble de facteurs humains. Elles impactent la productivité et peuvent donner lieu à des facteurs de risque qui peuvent contribuer à la genèse des maladies professionnelles. Par conséquent, les systèmes de production doivent offrir la flexibilité nécessaire afin de mieux amortir cette variabilité et en particulier, son incidence sur l'opérateur. Dans ce contexte, ces travaux de thèse proposent une approche pour instaurer la flexibilité temporelle nécessaire dans un système de production : les marges de manœuvre temporelles. Ce travail décrit le développement d'un outil permettant de simuler un système afin d'évaluer son comportement. L'outil développé est baptisé AEN-PRO : Agent based ENgine for PROduction system simulation. Ces travaux proposent également la définition d'un indicateur permettant de mesurer les marges de manœuvre temporelles disponibles sur un poste de travail. L'analyse par états élémentaires est aussi proposée pour évaluer le comportement des entités du système afin de proposer des modifications de la conception qui améliorent les marges de manœuvre et la productivité du système.

Mots-clefs : Conception et gestion des systèmes de production ; flexibilité temporelle ; simulation ; systèmes multi-agents ; facteurs humains

Proposition of a tooled method for enhancing health and safety aspects during production system's design phases by integrating temporal margins of maneuver

ABSTRACT: Today's production systems are subject to reactivity and productivity constraints. Consequently, variability in the physical flow are increasingly pronounced. This variability affects productivity and may contribute to occupational diseases through different kind of risk factors. Therefore, production systems must have the needed flexibility to better cushion this variability and its impact on workers. In this context, this article proposes a tooled approach to establish temporal flexibility in production system: temporal margins of maneuver. The developed tool is used to simulate a production system and assess its behavior with respect to variability. This work also proposes the definition of an indicator to measure the temporal margins of maneuver in the simulated system. Elementary states analysis is proposed to evaluate the behavior of the system's entities. This analysis leads to improvements that aim to enhance the temporal margins of maneuver and the productivity of the system as well.

Keywords: Design and management of production systems; temporal flexibility; simulation; multi-agent systems; human factors