

Contribution à la modélisation de la dynamique du comportement d'opérateurs humains

Sabeur Elkosantini

▶ **To cite this version:**

Sabeur Elkosantini. Contribution à la modélisation de la dynamique du comportement d'opérateurs humains. Autre [cs.OH]. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2007. Français. NNT : . tel-00369774

HAL Id: tel-00369774

https://theses.hal.science/tel-00369774

Submitted on 21 Mar 2009

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

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

Université Blaise Pascal **N° d'ordre : D.U. 1798**

École doctorale des sciences pour l'ingénieur **EDSPIC : 391**

Contribution à la modélisation de la dynamique du comportement d'opérateurs humains

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 3 décembre 2007

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université Blaise Pascal – Clermont Ferrand

(spécialité informatique)

par

Sabeur Elkosantini

Composition du jury

Président :	David Hill	Pr. à l'Université Blaise Pascal, Aubière
Rapporteurs :	Abdelaziz Bouras	Pr. à l'Université Lumière Lyon 2
	Christophe Sibertin-Blanc	Pr. à l'Université Toulouse 1 - Sciences sociales
Examinateurs :	Stéphane Espié	HdR à l'I.N.R.E.T.S., Paris
	Pierre-Jean Marescaux	M.C. à l'Université Blaise Pascal, Aubière
Directeur de thèse :	Denis Gien	Pr. à l'Institut Français de Mécanique Avancée, Aubière

Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes — UMR 6158

Mis en page avec la classe thloria.

Remerciements

Ce travail de thèse n'aurait pas été aussi fructueux sans l'aide de plusieurs personnes. Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation.

Je désire exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Denis Gien, Professeur à l'Institut Français de Mécanique Avancée, qui m'a accueilli dans son équipe. Je le remercie pour la qualité de son encadrement, pour les remarques constructives qu'il m'a fournies ainsi que pour ses précieux conseils durant tous mes trois années de thèse.

Ma gratitude, mon profond respect et mes remerciements à tous les membres du jury et aux rapporteurs pour leur attention consacrée à l'égard de mon travail. Je remercie ainsi Mr. Abdelaziz Bouras, Professeur à l'Université Lumière Lyon 2, et Mr. Christophe Sibertin-Blanc, Professeur à l'Université Toulouse 1 - Sciences sociales, qui ont accepté la charge de rapporteur et qui, grâce à leurs remarques et commentaires, ont permis d'améliorer la qualité de ce travail.

Mes remerciements vont aussi à Mr. Stéphane Espié, HdR et directeur de recherche à l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, et à Mr. David Hill, Professeur à l'Université Blaise Pascal de Clermont Ferrandd d'avoir accepté d'être examinateur.

J'ai particulièrement apprécié de travailler avec Mr. Pierre-Jean Marescaux, maître de conférences à l'université Blaise Pascal. Je le remercie pour ses interventions à plusieurs reprises pour améliorer ce travail.

Mes remerciements vont aussi à Mr. Yacine Ouzzani, maître de conférences à l'École Nationale d'Ingénieurs des Travaux Agricoles de Clermont-Ferrand et à Mr. Frédéric Amblard, maître de conférences à l'Université Toulouse 1 - Sciences sociales pour leurs précieux conseils.

Je tiens à adresser mes remerciements aux membres du Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes - LIMOS - et à tout le personnel de l'Institut Français de Mécanique Avancée que j'ai pu côtoyer durant la période de ma thèse et qui ont su rendre mon travail agréable.

Ne pouvant personnellement nommer tous ceux qui m'ont encouragé et soutenu au cours de ces dernières années. Je tiens à remercier plus particulièrement mes deux beaux frères Walid et Nizar et tous mes amis : Mme et Mr. M'barek (Olfa et Sofiane), Amine, Khalil, Mahmoud, Mongi, Saber, Sofiene,...(la liste est encore longue).

Enfin, je ne peux qu'être infiniment reconnaissant envers ma famille, mon épouse et ma belle

famille pour leur patience et leurs nombreux sacrifices.

À mes parents
À mes deux soeurs
À mon frère

À mon épouse

À tous les miens

Table des matières

Table des figures **ix**

Liste des tableaux **xiii**

Introduction générale **1**

1 Contexte et motivation 1

2 Objectifs et organisation du document 2

Chapitre 1 La psychologie du travail **5**

1.1 Introduction 6

1.2 Psychologie du travail 6

1.3 Étude du comportement humain 7

1.3.1 Modèles de personnalité 10

1.3.2 Modèles d'émotion 11

1.3.3 Capacité cognitive 13

1.3.4 Environnement social 14

1.3.5 Les facteurs psychologiques 16

1.3.5.1 La motivation 16

1.3.5.2 Le stress 18

1.3.5.3 La fatigue 20

1.4 Évaluation et quantification : Les outils de tests 21

1.5 Conclusion 22

Chapitre 2 Simulation sociale **23**

2.1 Introduction 24

2.2 La simulation sociale 24

2.2.1 Qu'est-ce que la simulation sociale ? 24

2.2.2 Intérêt de la simulation sociale 25

2.3 Les approches de modélisation des systèmes sociaux 26

2.3.1 Les automates cellulaires . . . 26
2.3.2 Les approches réseaux sociaux . . . 29
2.3.3 La cybernétique . . . 29
2.3.3.1 Description . . . 29
2.3.3.2 La systémique et les facteurs humains . . . 31
2.3.3.3 La dynamique des systèmes . . . 33
2.4 Modèles de comportement, Systèmes multi-agent et logique floue . . . 35
2.4.1 L'approche multi-agent . . . 35
2.4.1.1 Agent . . . 35
2.4.1.2 Les systèmes multi-agent . . . 36
2.4.1.3 Exemple d'architectures . . . 37
2.4.2 L'approche logique floue . . . 39
2.5 Synthèse . . . 41
2.6 Conclusion . . . 43

Chapitre 3 Modèle de comportement dynamique **45**
3.1 Introduction . . . 46
3.2 Comportement individuel . . . 46
3.2.1 Description formelle du comportement . . . 46
3.2.1.1 Introduction du modèle . . . 46
3.2.1.2 Modélisation des relations inter-facteurs psychologiques . . . 48
3.2.1.3 Modèle comportemental global . . . 50
3.2.1.4 Le modèle mathématique . . . 54
3.2.2 Le passage à la simulation : Exemple . . . 57
3.2.2.1 Simulation avec Simulink . . . 59
3.2.2.2 Simulation avec Vensim . . . 59
3.2.3 Scénario de test . . . 60
3.2.4 Analyse de l'exemple et résultats de la simulation . . . 62
3.3 Comportement du groupe . . . 64
3.3.1 Description formelle . . . 65
3.3.1.1 Modèle comportemental étendu . . . 65
3.3.1.2 Le modèle mathématique . . . 67
3.3.2 Analyse d'un exemple . . . 68
3.4 Conclusion . . . 70

Chapitre 4 Modèle de comportement flou **73**
4.1 Introduction . . . 74

4.2 Description floue du comportement individuel . . . 74
4.2.1 Introduction . . . 74
4.2.2 Les sous-ensembles flous . . . 75
4.2.3 Modèle flou . . . 76
4.2.4 Équation différentielle floue . . . 78
4.2.5 Méthode de simulation et résultats . . . 81
4.2.5.1 Méthode de simulation . . . 81
4.2.5.2 Amélioration de la méthode . . . 83
4.2.6 Exemple illustratif . . . 86
4.3 Description floue du comportement d'un groupe . . . 91
4.3.1 Les règles floues . . . 91
4.3.2 Méthodes d'inférence et de raisonnement . . . 94
4.3.2.1 Méthode de Mamdani . . . 96
4.3.2.2 Méthode de Larsen . . . 97
4.3.2.3 Méthode de Takagi-Sugeno . . . 98
4.3.2.4 Implémentation du système proposé . . . 99
4.4 Exemple et résultats . . . 101
4.5 Conclusion . . . 104

Chapitre 5 Expérimentation et validation **107**
5.1 Introduction . . . 108
5.2 Processus de validation . . . 108
5.3 Procédure expérimentale . . . 109
5.3.1 Maquette informatique: un environnement de travail virtuel . . . 109
5.3.2 Déroulement de l'expérience . . . 112
5.4 Évaluation des facteurs psychologiques . . . 113
5.5 Recueil des données et résultats . . . 114
5.5.1 Validation des questionnaires . . . 115
5.5.1.1 Premier questionnaire . . . 115
5.5.1.2 Deuxième questionnaire . . . 117
5.5.1.3 Troisième questionnaire . . . 119
5.5.2 Analyse des résultats . . . 121
5.6 Construction du modèle . . . 124
5.7 Conclusion . . . 128

Conclusion générale **129**

Bibliographie **132**

Annexes **149**

Annexe A Les questionnaires **149**

A.1 Premier questionnaire 150

A.2 Deuxième questionnaire 151

A.3 Troisième questionnaire 152

A.4 Analyse des gestes 153

Annexe B Normes et conormes triangulaires **155**

Table des figures

1 Organisation du rapport. 3

1.1 L'opérateur humain et les conditions de travail. 7
1.2 Le modèle de compétence de Harzallah 15
1.3 La pyramide de Maslow 16

2.1 Grille rectangulaire et toroïdale (Hegselmann et Flache, 1998). 27
2.2 Les voisinages de Von Neumann et de Moore. 28
2.3 Les boucles de rétroaction positive et négative. 30
2.4 Le concept de diagramme flux-stock (adapté de (Vogstad, 2004)). 34
2.5 Principaux symboles de la dynamique des systèmes. 34
2.6 Modélisation du stress par la dynamique des systèmes (Jones, 2005). 35
2.7 Environnement de l'agent (Ferber, 1995). 36
2.8 L'architecture BDI. 38
2.9 L'architecture d'un agent selon le modèle PECS (Schmidt, 2000). 39
2.10 Le processus émotionnel du système FLAME (Seif El-Nasr *et al.*, 2000). 40

3.1 Exemple de graphe. 48
3.2 Relations entre la fatigue et le taux de défauts. 49
3.3 Exemples de relations entre facteurs psychologiques 50
3.4 Exemple de graphe. 52
3.5 Boucle stabilisatrice. 52
3.6 Boucles explosives. 53
3.7 Exemple de boucle explosive. 53
3.8 La non-linéarité entre le stress et la motivation. 54
3.9 Évolution de la fatigue et de la satisfaction. 57
3.10 Boucle explosive et boucle de correction. 58
3.11 Simulation avec Simulink. 59
3.12 Simulation de la non-linéarité avec Simulink. 60
3.13 Simulation avec Simulink et Vensim. 61

3.14 La non-linéarité entre le stress et la motivation. 62
3.15 Évolution du comportement sans l'action C. 63
3.16 Évolution du comportement avec l'action C. 64
3.17 (a) Sociogramme orienté (Yang et Tang, 2004) et (b) Sociogramme non orienté (Gonzaléz *et al.*, 2007). 65
3.18 Graphe de comportement d'un groupe. 66
3.19 Quelques variables du modèle. 67
3.20 Groupe de 3 opérateurs. 69
3.21 Graphe de comportement d'un groupe formé par Op1, Op2 et Op3. 69
3.22 Evolution de communication (a) et du conflit (b) entre Op1 et Op2. 70

4.1 Le support, le noyau et la hauteur d'un nombre flou. 75
4.2 Les α-coupes d'un nombre flou. 76
4.3 Nombre flou triangulaire. 77
4.4 Les nombres flous utilisés dans le modèle. 77
4.5 Les états initiaux et finals flous d'un comportement en fonction des actions de corrections. 78
4.6 Relations entre les intervalles d'un modèle (adapté de (Bonarini et Bontempi, 1994)). 80
4.7 L'évolution dans le temps de la région d'incertitude. 80
4.8 Exemple de graphe de comportement. 81
4.9 La région d'incertitude à $t = 0$ formée par les 0.5-coupes. 82
4.10 Les trajectoires des différents points de la surface (pour 0.5-coupe). 83
4.11 L'évolution de la région d'incertitude pour la coupe de niveau 0.5 83
4.12 L'évolution de d_1 (degré de sentiment d'auto-efficacité) et d_2 (degré de fatigue). . 84
4.13 Calcul de la région d'incertitude pour deux niveaux successifs avec la deuxième méthode. 84
4.14 d_1 (degré de sentiment d'auto-efficacité) et d_2 (degré de fatigue) à $t = 4h$ avec les deux méthodes : a- *Première méthode*, b- *deuxième méthode*. 86
4.15 Deuxième proposition de détection de contour de la région d'incertitude. 87
4.16 L'évolution de d_1 (degré de sentiment d'auto-efficacité) et d_2 (degré de fatigue) selon la deuxième méthode. 87
4.17 Exemple de graphe. 88
4.18 Évolution des degrés du stress et de la fatigue selon le modèle numérique. 88
4.19 Évolution des degrés du stress et de la fatigue. 89
4.20 Les degrés du stress (d_2) et de la fatigue (d_3) à plusieurs instants. 90
4.21 La mesure de possibilité pour le degré du stress à $t = 2h$. 91
4.22 Simulation des relations inter-individus. 92
4.23 Les valeurs linguistiques de $Variation_g1$. 94
4.24 Méthode d'inférence de Mamdani. 97

4.25 Méthode d'inférence de Larsen. 98
4.26 Editeur FIS. 99
4.27 Ensemble de règles utilisées. 101
4.28 Valeurs linguistiques utilisées. 102
4.29 Surfaces de réponses. 103
4.30 Évolution du conflit. 104
4.31 Modèle Simulink correspondant à l'exemple de la figure 4.22. 105

5.1 Les différentes étapes pour la construction du modèle. 109
5.2 Maquette de simulation. 110
5.3 Billet de banque avec les types de défaut. 111
5.4 Déroulement de la simulation pour chaque utilisateur 112
5.5 Évolution moyenne de tous les étudiants du stress, de la motivation et de la fatigue. 123
5.6 Évolution du stress, de la motivation et de la fatigue d'un candidat. 123
5.7 Évolution des deux critères de performance. 124
5.8 Stress, motivation et fatigue simulés et expérimentaux. 125
5.9 Le taux de bonnes sélection et le gain en temps de réponse simulés et expérimentaux. 125
5.10 Stress, motivation et fatigue selon le modèle simplifié. 127
5.11 Graphe de comportement. 127

Liste des tableaux

1.1 Les différents modèles de comportement. 9
1.2 Exemples de sources de stress (CCHST, 2000). 20

2.1 La systémique appliquée aux facteurs humains. 33
2.2 Synthèse des approches de modélisation du comportement. 42

3.1 Une relation de causalité positive. 49
3.2 Une relation de causalité négative. 49
3.3 L'effet de la fatigue sur le taux de défaut. 49

4.1 Quelques opérateurs logiques. 92
4.2 Quelques opérateurs d'implications floues (A est la prémisse et B est la conclusion de la règle). 93
4.3 Quelques exemples de t-normes. 95

5.1 Analyse des résultats du premier questionnaire avec le scénario 1 (N=26). 116
5.2 Analyse des résultats du premier questionnaire avec le scénario 4 (N=26). 117
5.3 Analyse des résultats du deuxième questionnaire avec le scénario 2 (N=26). . . . 118
5.4 Analyse des résultats du deuxième questionnaire avec le scénario 5 (N=26). . . . 119
5.5 Analyse des résultats du troisième questionnaire avec le scénario 3 (N=26). . . . 120
5.6 Analyse des résultats du troisième questionnaire avec le scénario 6 (N=26). . . . 121
5.7 Tableau récapitulatif des items retenus. 122

A.1 Premier questionnaire. 150
A.2 Deuxième questionnaire. 151
A.3 Troisième questionnaire. 152
A.4 Analyse des gestes. 154

Introduction générale

1 Contexte et motivation

Le contexte de ce travail est celui des systèmes de production au sens d'organisations sociotechniques ayant pour objectif la fourniture d'un produit ou d'un service. La conduite d'une activité au sein d'une telle organisation repose, non seulement sur les compétences techniques des acteurs, mais également sur les facteurs humains entrant en jeu. Les entreprises sont souvent soumises à des contraintes de plus en plus nombreuses et sévères en termes de flexibilité et de qualité. Afin de répondre à ces sollicitations, de nombreuses démarches ont été proposées pour améliorer l'efficience des entreprises. Elles sont habituellement basées sur procédures mettant en jeux des facteurs techniques comme les coûts, les délais ou les performances qui traduisent les dimensions économique, temporelle et technique des produits.

Les systèmes de production sont des systèmes complexes composés d'un ensemble de processus. Chaque opérateur ou équipe est considéré comme le fournisseur de celui qui suit et le client de celui qui précède. Ainsi, pour faciliter l'analyse et l'étude de tels systèmes, il est nécessaire de modéliser le processus de production en se basant sur une approche exprimant des visions différentes du système considéré. L'approche de modélisation peut être :

- *Techno-centrée* : le système est caractérisé essentiellement par les facteurs techniques en négligeant dans cette approche les aspects humains. Ainsi, l'opérateur humain et la machine sont représentés de la même manière, c'est-à-dire, en ne considérant que les aspects techniques.
- *Anthropo-centrée* : l'homme est considéré comme le facteur central du système (approche individus-centrée). Ce type d'approche est souvent utilisé en psychologie du travail et sociologie industrielle. On cherche à optimiser la coopération entre l'homme et la machine en prenant en compte les besoins et les préférences des opérateurs.
- *Sociotechnique* : les systèmes de production peuvent être, dans certains cas, décomposés en deux sous-systèmes : social et technique. Cette approche cherche à améliorer l'adéquation entre ces deux sous-systèmes afin d'améliorer la performance en même temps que la satisfaction au travail.
- *Systémique* : elle repose sur la définition des limites du système à modéliser, l'identification des éléments qui le composent et les types d'interaction entre ces éléments. Dans cette

approche, plusieurs points de vu permettent de considérer différents aspects du système tels que son organisation, ses ressources ou ses informations.

Plusieurs méthodes et outils usuels de modélisation et d'évaluation des systèmes de production ont été proposés. Ces outils ont le rôle majeur d'aider les responsables d'entreprises à tester de nouvelles méthodes de travail ou à prendre les bonnes décisions pour améliorer le rendement et l'efficience des opérateurs. Cependant, les besoins et les exigences des opérateurs sont rarement considérés, ce qui ne permet pas de prendre en compte les contraintes liées aux ressources humaines. Les fondements psychologiques et sociologiques capables d'expliquer le comportement des opérateurs sont négligés. Pourtant, l'influence de la motivation des opérateurs humains sur la productivité des entreprises est manifeste. L'amélioration de la qualité de vie des personnes au sein de l'entreprise ainsi que de leurs conditions de travail sont des moyens efficaces pour l'amélioration de la productivité (Horenstein, 2006; Lowe, 2002; Ginette Clarke, 2004). Leur satisfaction, leur sentiment de sécurité, leur perception du climat social sont déterminants pour l'efficience de leur travail et par conséquent pour la qualité des produits ou des services (Pelletier, 1985).

2 Objectifs et organisation du document

L'enjeu de ce travail consiste à explorer une nouvelle voie pour l'étude du comportement des acteurs dans un système industriel. Ainsi, dans le cadre de cette thèse, une tentative de modélisation dynamique multi-niveau est proposée permettant de mieux comprendre l'effet des décisions des responsables sur la performance des opérateurs et/ou des systèmes de production en considérant certains facteurs psychologiques et psychosociaux. Ce modèle peut être utilisé comme un support permettant d'aider les managers à étudier l'impact d'éventuelles perturbations sur la stabilité et la performance des opérateurs. Les responsables pourront ainsi proposer des actions de pilotage pour améliorer le rendement et la productivité de l'entreprise.

Le modèle présenté dans ce rapport souligne la dynamique du comportement humain et comporte deux niveaux, traduisant les deux aspects comportementaux : individuel et collectif. Le premier niveau s'intéresse à la description du comportement individuel en prenant en compte des facteurs psychologiques en se basant sur une représentation graphique et mathématique. Ce modèle est étendu dans le deuxième niveau pour prendre en compte en plus le comportement collectif en intégrant des facteurs psychosociaux et les interactions qui peuvent exister entre les membres d'un groupe d'individus.

Ce rapport commence d'abord par souligner, dans le chapitre 1, l'importance de l'étude des facteurs liés aux comportements humains pour améliorer les méthodes de travail et le rendement d'opérateurs dans les entreprises. Ce chapitre présente quelques aspects la psychologie du travail ainsi que différents facteurs comportementaux qui peuvent être étudiés. Les outils de quantification de ces éléments comportementaux, utilisés dans le chapitre 5 pour la validation du modèle

proposé, seront aussi présentés.

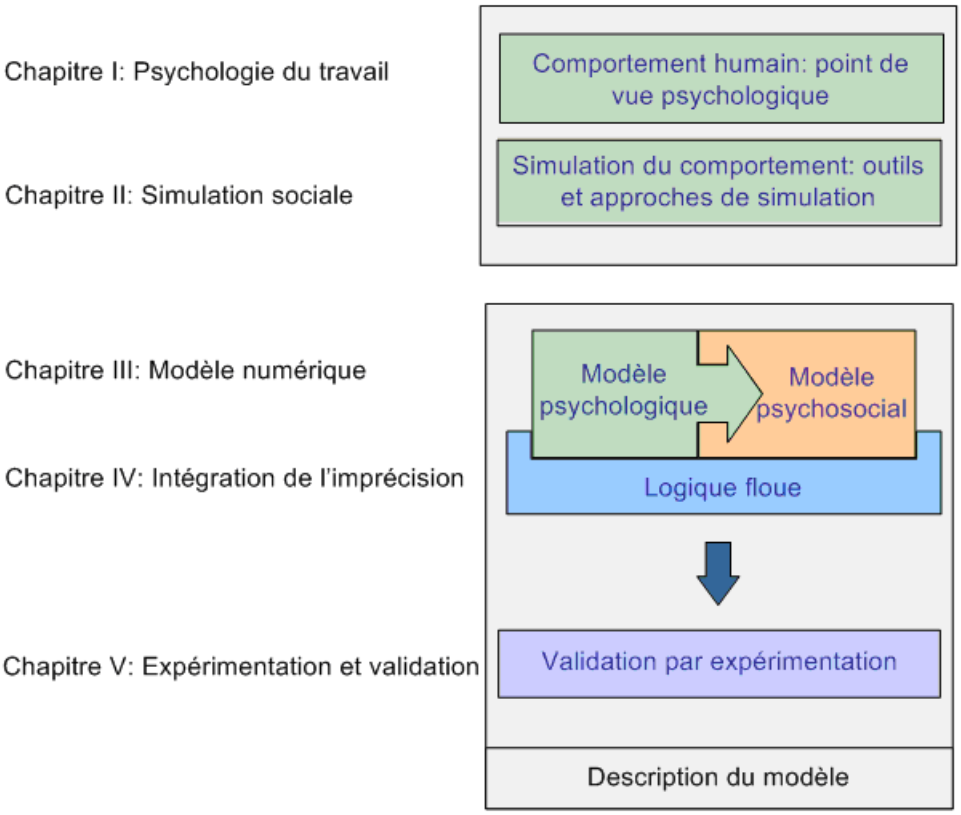


FIG. 1 – Organisation du rapport.

Quant au chapitre 2, il se focalise sur la simulation des organisations sociales en introduisant la notion de simulation sociale. Il présente également les différentes approches et outils de modélisation utilisés dans la modélisation des systèmes sociaux.

La deuxième partie de ce rapport est consacrée à la présentation du modèle proposé qui commence dans le chapitre 3, constitué de deux parties. La première partie détaille le modèle mathématique décrivant le comportement individuel d'opérateurs en se basant sur des concepts issus de la dynamique des systèmes comme la notion du rétroaction. La deuxième partie décrit le deuxième niveau du modèle qui est consacré à la prise en compte des facteurs psychosociaux influant la performance et la qualité de vie des opérateurs. Le modèle mathématique présenté dans ce chapitre est numérique et se base sur des équations différentielles ordinaires.

Dans le chapitre 4, l'incertitude et l'imperfection que peuvent avoir certains aspects comportementaux, psychologiques ou psychosociaux sont intégrées dans le modèle en utilisant la théorie des sous-ensembles flous et les systèmes d'inférences flous. En effet, elle s'appuie sur des équations différentielles floues pour la description de certains aspects cognitifs psychologiques et sur un système d'inférence constitué de règles pour décrire les relations inter-opérateurs.

Finalement, pour valider le modèle proposé, la meilleure démarche consiste à le confronter

à la réalité en menant une série d'expériences. Les hypothèses du modèle sont testées dans un environnement de simulation permettant de reproduire une tâche de contrôle de qualité de produits dans un atelier de production. Le chapitre 5 présente alors une maquette informatique permettant de reproduire un environnement de travail avec certaines contraintes et perturbations pouvant exister dans un système de production. Elle est utilisée par des étudiants jouant le rôle d'opérateurs. Les résultats des expériences obtenus - à savoir les performances et l'évolution des facteurs comportementaux - servent à la construction d'un premier modèle de comportement. Les résultats des tests obtenus sont présentés et commentés dans ce chapitre. Ce cadre expérimentale est réalisé en étroite collaboration avec Mr. Pierre-Jean Marescaux, maître de conférences au LAPSCO[1] pour le mener dans les meilleurs conditions.

[1] Laboratoire de Psychologie Sociale et Cognitive.

Chapitre 1

La psychologie du travail

Sommaire

1.1 Introduction 6
1.2 Psychologie du travail 6
1.3 Étude du comportement humain 7
1.3.1 Modèles de personnalité 10
1.3.2 Modèles d'émotion 11
1.3.3 Capacité cognitive 13
1.3.4 Environnement social 14
1.3.5 Les facteurs psychologiques 16
1.3.5.1 La motivation 16
1.3.5.2 Le stress 18
1.3.5.3 La fatigue 20
1.4 Évaluation et quantification : Les outils de tests 21
1.5 Conclusion 22

1.1 Introduction

L'ensemble des facteurs humains est l'un des éléments clés sur lesquels les responsables d'entreprise peuvent jouer pour améliorer l'efficacité et l'efficience des employés. Conjointement aux facteurs techniques liés à la tâche ou aux individus (comme les compétences ou la capacité physique), les facteurs psychologiques ont beaucoup intéressé les chercheurs et les gestionnaires de ressources humaines. Ils sont étudiés afin de proposer des méthodes de travail plus adéquates. Dans ce contexte, ce chapitre souligne l'importance de la psychologie du travail et présente un état de l'art des travaux réalisés sur le comportement humain en abordant plusieurs aspects.

1.2 Psychologie du travail

La nécessité d'adéquation entre les capacités, qu'elles soient physiques, cognitives ou morales, des opérateurs et les exigences de certaines tâches a conduit les chercheurs à s'intéresser au comportement humain en milieu de travail. Ce sujet a fait l'objet de nombreux travaux menés, par exemple, par des concepteurs, ingénieurs, ergonomes, psychologues de travail et spécialistes de sécurité. Chacun assigne des définitions aux comportements et aux facteurs humains, notions qui servent de références propres aux personnes étrangères au domaine de la psychologie.

Ce domaine de recherche, appelé *psychologie de travail*, constitue une partie de la psychologie générale et a pour objet l'étude des conditions de l'homme au travail. Ainsi, les psychologues du travail recherchent les conditions d'un accord entre l'homme et sa vie professionnelle (Jardillier, 1973).

L'objet central de l'analyse du psychologue du travail est le comportement de l'opérateur humain dans un contexte d'activité professionnelle. Les conditions de travail sont définies comme l'ensemble des facteurs déterminant le comportement du travailleur (Leplat et Cuny, 1979). Ces conditions peuvent être externes à l'opérateur comme les exigences et les contraintes qui lui sont imposées soit par la tâche, soit par les responsables. Le comportement dépend aussi des conditions internes (les caractéristiques de l'opérateur) telles que les facteurs physiologiques, psychologiques et psychosociaux (fatigue ; motivation, confiance en soi, satisfaction ; conflit).

La psychologie du travail traite de près plusieurs domaines qui touchent directement l'opérateur. En effet, l'un des premiers rôles du psychologue industriel est la *sélection* de personnels et d'opérateurs permettant de maximiser le rendement. Cependant, cette sélection brutale suscite moins d'intérêt puisque, de nos jours, les responsables préfèrent accompagner les opérateurs et les aider à examiner la situation eux-mêmes. Les psychologues interviennent souvent aussi dans le domaine de la *formation*. Ils essaient d'améliorer les conditions optimales d'apprentissage de tâches de manière accélérée et ceci quelque soit la personne comme dans le cas de la méthode de formation T.W.I[2].

[2]Training Within Industry (twi-institue.org) : méthode de formation.

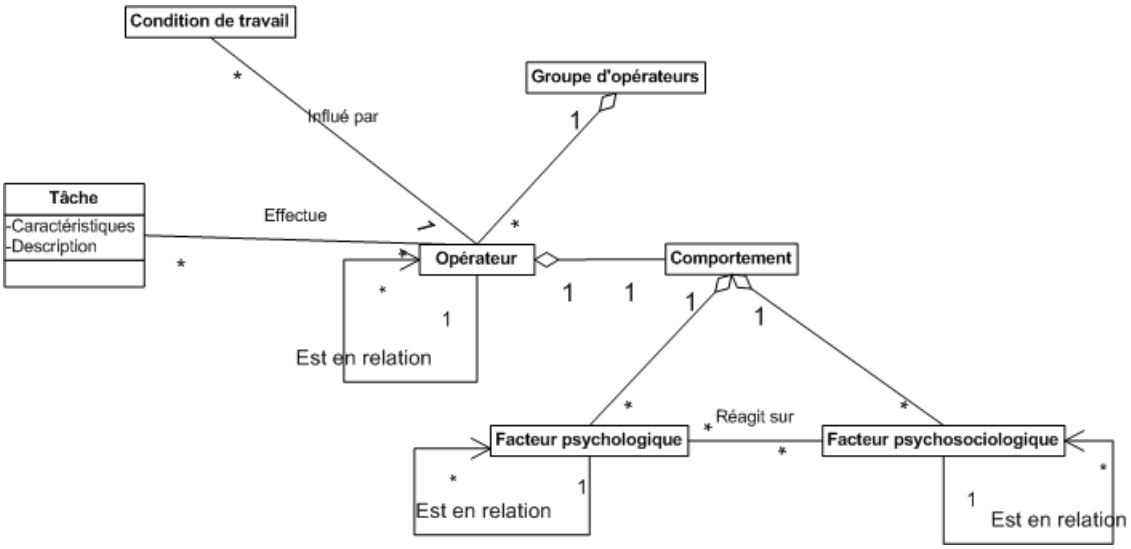


FIG. 1.1 – L'opérateur humain et les conditions de travail.

En outre, le psychologue doit aussi travailler sur la **motivation** des travailleurs qui a été souvent négligée. L'augmentation du salaire est, évidemment, un des moyens pour assurer la motivation mais ce n'est pas suffisant pour assurer une totale satisfaction aux employés. Ces derniers ont aussi besoin d'être reconnus socialement, de s'accomplir et se réaliser dans leur travail.

Le dernier rôle que nous évoquons dans ce paragraphe est celui de l'amélioration de la *communication* entre les opérateurs et de la disponibilité de l'*information*. En effet, dans toute organisation ou entreprise, les employés ont besoin de communiquer et cela au niveau opérationnel et au niveau motivationnel (Rousson, 1972). Les employés ont besoin d'être informés des objectifs à atteindre, de connaître leurs positions par rapport à la tâche et dans l'organisation et d'interpréter ces informations afin de mettre en œuvre les moyens nécessaires pour atteindre l'objectif.

1.3 Étude du comportement humain

Plusieurs tentatives d'étude du comportement humain ont vu le jour en essayant de considérer plusieurs aspects psychologiques et cognitifs. L'être humain est toujours étudié selon un point de vue précis, par exemple culturel (Miodownik, 2006), compétence (Harzallah et Vernadat, 2002), performance (Siebers *et al.*, 2004), capacité cognitive (Schmidt, 2000), facteurs psychologiques ou psychosociaux (Jones, 2005; Oren et Ghasem-Aghaee, 2003). La modélisation du comportement dépend aussi du contexte dans lequel l'individu se trouve : opérateur dans un système de production (Martinez-Miranda Juan *et al.*, 2006), patient dans un système hospitalier (Brailsford *et al.*, 2006), militaire dans une unité en opération (Mulgund *et al.*, 2000).

Nous proposons dans ce qui suit, une brève étude comparative de quelques modèles de comportement traitant l'homme selon plusieurs aspects. Le tableau 1.1 passe en revue quelques travaux proposant des modèles de comportement en les classant selon le point de vue considéré. Il présente également des exemples de systèmes informatiques utilisant ces modèles pour implémenter des agents autonomes, émotionnels et intelligents.

Facteur considéré	**Modèle**	**Implémentation informatique**	
		Référence	**Détails**
Personnalité	Five Factor Model (McCrae et John, 1992; Howard, 2000)	(Oren et Ghasem-Aghaee, 2003; Ghasem-Aghaee et Ören, 2003)	Implémentation d'OCEAN en utilisant la logique floue
		(Kshirsagar et Magnenat-Thalmann, 2002; Ball et Breese, 2000)	Simulation du comportement d'un homme virtuel en utilisant les réseaux bayésiens
		(El Jed *et al.*, 2004)	Environnement virtuel d'entraînement pour des pompiers
		(André *et al.*, 1999)	Personnaliser le dialogue homme-machine en tenant compte, entre autres, de la personnalité
	Modèle d'Hermann (Hermann, 1999)	(Silverman et Bharathy, 2005)	Simulation de la prise de décision chez les responsables politiques et militaires
Émotion	OCC (Ortony *et al.*, 1988)	(Elliot, 1990; Wong, 2004)	Génération d'émotions dans les systèmes multi-agent
		(Gratch, 2000)	Intégrer la dimension émotionnelle dans des agents virtuels
	Modèle de Roseman (Roseman *et al.*, 1990)	FLAME (Seif El-Nasr *et al.*, 2000)	Simulation de l'émotion chez les agents en utilisant des règles floues en se basant sur les modèles de Roseman et d'Orthoy.
		(Read *et al.*, 2006)	Intégration de l'émotion dans des agents intelligents pour développer un environnement virtuel d'entrainement pour des militaires
Suite page suivante			

Facteur considéré	**Modèle**	**Implémentation informatique**	
		Référence	**Détails**
Suite ...			
	Le modèle Em (Reilly et Bates, 1992)		Développement d'agents intelligents et émotionnels en étendant le modèle OCC proposé par Orthoy.
Capacité cognitive	(Martinez-Miranda *et al.*, 2006)		Prise en compte de la capacité et la complexité cognitive dans la modélisation du comportement
Environnement social	(Schmidt, 2000)		Intégration de la composante sociale dans la simulation du comportement humain.
	(Nowak et Latané, 1994)		SITSIM : simulation du changement d'attitudes et croyances d'un individu et son effet sur le comportement des autres.
Autre	Performance	(Dahn et Laughery, 1997; Toriizuka, 2001)	Propositions de modèles de performance liées à plusieurs type de tâches (militaires, maintenance, etc.).
		(Bertolini, 2007)	Proposition d'une approche étudiant l'impact de certain facteur humain sur la performance en se basant sur les cartes cognitives floues.
	Culture	(McAlinden et Clevenger, 2006; Miodownik, 2006)	Intégration de la culture dans le modèle de comportement des agents.

TAB. 1.1: Les différents modèles de comportement.

Bien que cette classification sépare certains facteurs de comportement, certains modèles intègrent de nombreux facteurs dans une architecture plus complète. Par exemple, l'émotion a été toujours associée à la personnalité (Egges *et al.*, 2003) et aux facteurs sociaux dans la modélisation du comportement des agents virtuels ou des individus (Schmidt, 2000).

Le tableau précédent fait aussi référence à quelques travaux modélisant le comportement en considérant sa culture (McAlinden et Clevenger, 2006; Miodownik, 2006). Dans (McAlinden et Clevenger, 2006), McAlinden et Clevenger proposent un environnement d'entraînement virtuel

pour des militaires intégrant l'influence sociale et culturelle sur la prise de décisions dans des environnements hostiles et perturbés. La performance était aussi l'un des facteurs considéré pour modéliser le comportement humain en le liant à d'autres facteurs psychosociaux et\ou physiques. Par exemple, Toriizuka (Toriizuka, 2001) a repris le modèle de performance de Miller et Swain (Miller et Swain, 1987) pour proposer un outil permettant d'améliorer le rendement et le confort au travail.

D'autres travaux soulignent la relation qui peut exister entre la performance et certains facteurs individuels. Par exemple, Klein et al. (Klein *et al.*, 2000) montrent que la performance diminue avec l'âge puisque le vieillissement est toujours associé aux diminutions progressives de la puissance corporelle. D'autres chercheurs considèrent également que la performance est étroitement liée à l'effort, à la précision et à la qualité du travail (Seo *et al.*, 2004; Judge et Bono, 2001). Le niveau de l'effort est considéré comme une conséquence directe des processus motivationnels quant à la précision, elle est influencée par la variation du stress (Jones, 2005).

Nous présentons dans ce qui suit quelques modèles de comportement parmi les plus utilisés dans la littérature et quelques propositions de systèmes qui les implémentent.

1.3.1 Modèles de personnalité

De nos jours, il n'y a pas de consensus sur la définition de la personnalité malgré l'importance de ce thème de recherche dans le domaine de la psychologie. La plupart des descriptions de la personnalité mettent l'accent sur les différences de traits de caractères entre les individus qui se retrouvent dans le comportement et les réponses émotionnelles (El Jed *et al.*, 2004). La personnalité influe sur la manière dont les individus perçoivent, agissent et réagissent (Cervone, 1999).

Plusieurs modèles de comportement se basent sur la personnalité et sa description comme un système interactif et dynamique regroupant quelques facteurs psychologiques. Un modèle de personnalité doit être le plus complet possible afin de considérer la complexité et la dynamique de la personnalité humaine, ses émotions, ses capacités cognitives, etc.

Parmi les modèles de personnalité les plus complets et le plus connus en psychologie et en simulation sociale, nous citons Five Factor Model (McCrae et John, 1992; Howard, 2000) ou appelé aussi par Acton (Acton, 2001) le modèle OCEAN. Il caractérise la personnalité par 30 attributs différents appelés aussi des facettes (Oren et Ghasem-Aghaee, 2003). Ces facettes sont regroupées en 5 groupes appelés traits ou dimensions de la personnalité : *Openness*, *Conscientiousness* *Extraversion*, *Agreeableness*, *Neuroticism* ou *Need of stability* :

- **Openness** : exprime la tendance d'une personne à être intellectuelle, son intérêt pour la culture, pour l'art et créativité (Acton-Glossary, 2002). Elle décrit le caractère de curiosité, de créativité (Howard et Howard, 2001), d'originalité et l'imagination chez un individu. Dans (Oren et Ghasem-Aghaee, 2003), une méthode d'évaluation de ce trait basée sur des valeurs linguistiques est proposée.

- **Conscientiousness** : exprime la tendance d'un individu à accomplir avec succès les tâches et de se fixer de grands objectifs (Acton-Glossary, 2002). Il traduit la bonne organisation dans le travail d'une personne, sa discipline et son honnêteté.
- **Extraversion** : exprime la sociabilité et le caractère optimiste d'une personne (Acton-Glossary, 2002). Autrement dit, il représente le nombre de personnes avec qui l'individu se sent à l'aise (Howard et Howard, 2001).
- **Agreeableness** : est la tendance d'un individu à être gentil (Acton-Glossary, 2002). Ce trait de personnalité exprime le caractère naturel, sincère, serviable et tolérant d'un individu.
- **Neuroticism** ou **Need of stability** : est le trait de personnalité associé à l'instabilité émotionnelle et exprimant l'anxiété, la nervosité et l'inquiétude d'un individu.

Plusieurs systèmes de réalité virtuelle simulant le comportement des individus dans différents contextes ont utilisé ce modèle pour définir leurs personnalités (El-Jed, 2006; Kshirsagar et Magnenat-Thalmann, 2002; Oren et Ghasem-Aghaee, 2003). Comme le modèle ne détaille pas la procédure de son implémentation dans un outil informatique, plusieurs stratégies ont été adoptées par les chercheurs. Par exemple, le réseau bayésien est utilisé dans quelques travaux afin d'exprimer l'incertitude de certains facteurs liés à la personnalité, l'émotion et l'humeur. Kshirsagar et Magnenat-Thalmann (Kshirsagar et Magnenat-Thalmann, 2002) proposent un réseau bayésien pour chaque type de personnalité. La logique floue est aussi une autre méthode souvent utilisée pour traduire les variables linguistiques associées aux différents traits de la personnalité (Seif El-Nasr *et al.*, 1999; Oren et Ghasem-Aghaee, 2003).

D'autres modèles de personnalité ont été proposés, moins utilisés dans la simulation sociale, et qui diffèrent dans le nombre de traits caractérisant la personnalité. Par exemple, le modèle PEN de Eysenck caractérise la personnalité par seulement 3 dimensions : extraversion (E), neuroticism (N) et psychoticism (P) (Eysenck et Eysenck, 1985). Quant à Silvermann, il caractérise la personnalité des Leaderships par 7 traits en s'inspirant du modèle d'Hermann. En généralisant ces modèles, Egges et al. (Egges *et al.*, 2003) définissent la personnalité par n dimensions représentées par des variables dont la valeur est dans l'intervalle $[0, 1]$.

1.3.2 Modèles d'émotion

La notion d'émotion a fait l'objet d'un grand débat et intéresse des disciplines très variées comme la psychologie, le domaine de la réalité virtuelle, l'implémentation informatique ou la robotique. Plusieurs tentatives de modélisation d'émotion ont été menées. Elles peuvent être distinguées en deux approches principales :

- Les approches continues proposent la représentation des émotions dans un espace multidimensionnel. Plusieurs chercheurs (Lang, 1994; Russel, 1980) représentent l'émotion par deux dimensions la Valence (V) et l'Activation (A). La valence décrit les caractères d'émotion positifs comme la joie et les caractères d'émotions négatifs comme la colère. L'activa-

tion correspond au degré de l'expression corporelle ou gestuelle qui se traduit par quelques réactions physiologiques (transpiration, accélération de battement du cœur, etc.).

– Les approches discrètes considèrent qu'il existe un ensemble d'émotions dites "de base" dont le nombre et l'identité ne sont pas définis de la même manière par les chercheurs. Pour Ekman (Ekman, 1982), six types d'émotions peuvent être distingués selon les expressions du visage : joie, tristesse, peur, surprise, colère et dégoût. Mowrer (Mowrer, 1960) propose 2 dimensions : douleur et plaisir. Ortony et al. présentent dans (Ortony *et al.*, 1988) une liste plus complète des différentes dimensions proposées pour caractériser les émotions.

L'un des modèles émotionnels les plus connus et les plus utilisés est celui proposé par Ortony (Ortony *et al.*, 1988) qui s'inscrit dans la deuxième approche. En effet, ce modèle appelé OCC, considère que l'émotion est le résultat de l'évaluation cognitive de trois aspects différents : conséquence d'événements, actions d'agents et aspects des objets. Ce modèle spécifie les conditions de 22 types d'émotions différents. Le processus de génération d'émotions est décomposé en 5 phases selon Bartneck (Bartneck, 2002) : classification, quantification, interaction, mapping et expression. La détermination des émotions à déclencher ainsi que leur intensité chez les agents virtuels se font à partir de leurs buts, plans, principes et préférences.

Plusieurs travaux se sont basés sur ce modèle pour définir d'autres modèles émotionnels comme *Em* de Reilly et Bates (Reilly et Bates, 1992) ou pour implémenter des systèmes à base d'agents autonomes et émotionnels (Gratch, 2000; Silverman, 2001; Marsella et Gratch, 2001). Dans le système émotionnel proposé par Prendinger et al. (Prendinger *et al.*, 2002) un module d'évaluation a été proposé permettant de déterminer la signification émotionnelle d'un événement pour un agent. Dans le système PETEEI proposé par Seif El-Nasr et al. (Seif El-Nasr *et al.*, 1999) et simulant l'émotion chez des agents autonomes, le déclenchement d'une émotion est déterminé selon la désirabilité d'un événement perçu et sa probabilité d'être réalisé. De plus, Marsella et Gratch (Marsella et Gratch, 2002) ont étudié l'influence des émotions et de la personnalité sur le comportement des agents.

D'autres modèles d'évaluation des émotions ont été proposés mais moins utilisés. Roseman et al. (Roseman *et al.*, 1990) ont proposé un modèle d'évaluation comportant 5 dimensions cognitives permettant d'évaluer les 13 types d'émotions qu'ils distinguent. Le modèle informatique FLAME proposé par Seif El-Nasr (Seif El-Nasr *et al.*, 2000) intègre un module d'évaluation des émotions qui se base sur les modèles d'Ortony et de Roseman. Les émotions sont déclenchées selon la désirabilité d'un événement. Nous citons aussi, sans les détailler, les modèles proposés par Scherer (Scherrer, 1967), Frijda (Frijda, 1988) ou Sloman (Sloman, 2001). Adam et Evrard (Adam et Evrard, 2005) présentent un aperçu plus détaillé sur les différents modèles émotionnels ainsi qu'une revue critique sur quelques travaux implémentant des agents émotionnels.

1.3.3 Capacité cognitive

La capacité cognitive chez une personne a été aussi intégrée dans des modèles informatiques afin de simuler le comportement humain. Elle se traduit souvent par l'habilité d'une personne à raisonner, à apprendre et à résoudre des problèmes. Une grande capacité cognitive chez un individu est associée à sa capacité à analyser rapidement et efficacement des informations de plusieurs sources et prendre les bonnes décisions. La complexité cognitive, considérée par certains chercheurs comme une dimension de la personnalité, est définie par Streufert et Swezey (Streufert et Swezey, 1986) comme la capacité à résoudre un problème, de le décomposer en sous-problèmes élémentaires et établir les relations entre eux. Plusieurs méthodes de mesure quantitative de la complexité cognitive ont été proposées, chacune étant associée à un contexte de travail précis. Par exemple, l'approche de Kornwachs (Kornwachs, 1987) est conçue pour mesurer la complexité des individus dans le contexte d'interaction homme-machine. D'autres mesures sont présentées dans (Rauterberg, 1996) avec des exemples d'application.

Ören (Ören, 1978) souligne l'importance d'améliorer la capacité cognitive d'un individu pour améliorer son efficacité face à des situations variées et complexes. Selon ses compétences et ses capacités cognitives, un opérateur arrive à gérer des situations variées, mais à partir d'un certain seuil de complexité, la performance diminue.

Amati et Shallice (Amati et Shallice, 2007) énumèrent plusieurs types de capacité cognitive qui distinguent l'homme des animaux. A titre d'exemple, nous pouvons citer la capacité de l'être humain à établir des méta-représentations des événements perçus ou la capacité d'établir des entités dynamiques, c'est-à-dire établir des causes à un évènement ou des conséquences à une action.

Dans les années 90s, une théorie appelée théorie de la charge cognitive a été élaborée par Sweller et Chandler (Sweller et Chandler, 1994) pour la conception de méthodes d'apprentissage afin d'améliorer la performance. Elle distingue deux types de connaissances :

- Les connaissances primaires qui correspondent aux capacités cognitives de bases comme celles introduites par Amati et Shallice (Amati et Shallice, 2007) : parler sa langue maternelle, reconnaître des visages ;
- Les connaissances secondaires qui correspondent aux acquisitions récentes de l'espèce humaine comme le raisonnement mathématique et la résolution des problèmes.

L'échec de certaines méthodes d'apprentissage, traduit par la baisse de performance chez un opérateur ou un étudiant, fait souvent référence à cette théorie. Dans certain cas, un individu n'arrive pas à gérer un flux d'information important traduit par une surcharge cognitive accompagnée par l'incapacité de stocker des données dans la mémoire de travail (mémoire à court terme) (Halford *et al.*, 2007). La surcharge cognitive peut être alors une explication de la baisse de performance d'un opérateur ce qui impose un changement de méthode d'apprentissage.

Sawicka (Sawicka, 2007) a formalisé la théorie de la charge cognitive en utilisant l'approche de la dynamique des systèmes afin de proposer un outil prédictif utilisable pour tester de nouvelles

méthodes d'apprentissage. Ce passage à la formalisation mathématique de certaines théories permet, selon Simon (Simon, 1982), d'améliorer les aspects théoriques et de souligner les ambiguïtés qui sont parfois cachées par la description et les définitions verbales.

Dans le modèle comportemental proposé par Martinez-Miranda et al. (Martinez-Miranda Juan *et al.*, 2006), la capacité cognitive d'un individu est définie par son degré d'expertise dans un domaine particulier. Ils proposent un ensemble de classes cognitives pour représenter les connaissances techniques d'une personne travaillant dans une équipe : Responsable de projet, Coordinateur, Spécialiste, Technicien et Assistant. En plus, chaque membre de l'équipe est défini par deux autres paramètres : niveau d'expérience et niveau de créativité.

Comme nous l'avons souligné ci-dessus, la capacité cognitive est étroitement associée aux compétences. Dans le modèle de comportement de Zachary et al. (Zachary *et al.*, 2001), les compétences individuelle sont définies comme le résultat de l'utilisation des expertises internes au comportement dans un contexte externe :

Individual competence = processing mechanisms + internal expertise + external context

Un modèle de compétence plus complet est proposé par Harzallah (Harzallah, 2000) dans lequel on distingue le savoir, le savoir-être et le savoir-faire (figure 1.2). Harzallah et Vernadat (Harzallah et Vernadat, 2002) ont dégagé les principales caractéristiques de compétences, il en ressort quatre :

- Deux types de compétences existent : les compétences acquises (par un ou plusieurs individus) et les compétences requises (par un système, nécessaires pour la réalisation d'une tâche, d'une mission).
- Les compétences possèdent des ressources hiérarchisables en catégories et sous catégories (étudiées plus loin dans cette partie).
- Les compétences se réalisent dans un contexte : cela impose alors des contraintes pour l'aboutissement de la compétence, mais le contexte lui fournit également des outils (équipement, réseaux relationnels, réseaux informationnels, etc.) qui la favorise.
- Les compétences sont liées à l'accomplissement d'une ou plusieurs tâches ou missions.

1.3.4 Environnement social

Les interactions sociales sont parfois absentes des modèles de comportement vu la difficulté d'établir les liens entre cette composante et les facteurs psychologiques. L'un des premiers travaux élaborés autour de l'analyse des réseaux sociaux est la sociométrie développée par Moreno. En effet, la sociométrie est une méthode d'observation des relations inter-individus des membres d'un même groupe, à partir d'analyses quantitatives. Turner (Turner *et al.*, 2006) annonce que la sociométrie ne permet pas que l'étude de la dynamique des groupes (Sonnemans *et al.*, 2006), mais aussi l'identification des propriétés et des attributs communs des membres du groupe. La

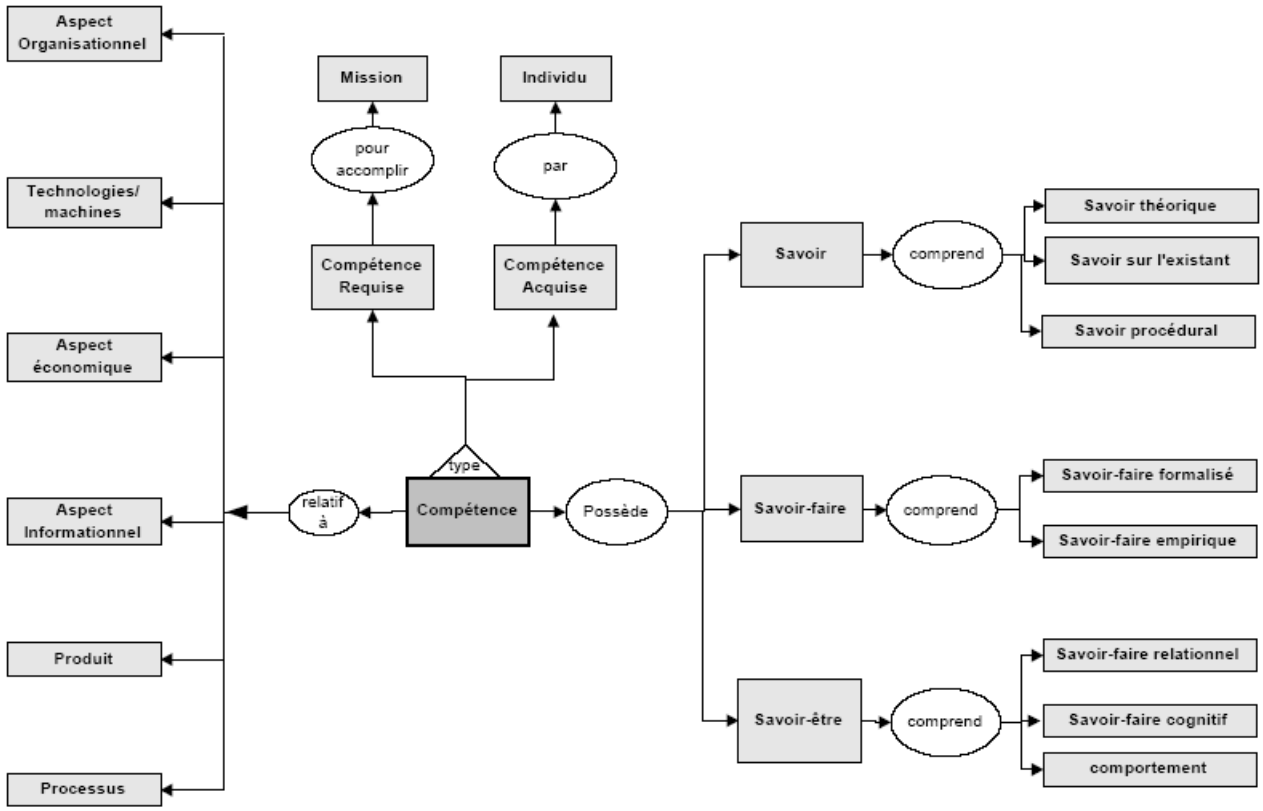


FIG. 1.2 – Le modèle de compétence de Harzallah .

sociométrie est largement utilisée pour étudier les types de relations sociales au sein d'un groupe comme le conflit, la cohésion ou le leadership. Cependant, peu de travaux se sont intéressés à l'étude des structures des groupes et de leur effet sur la performance.

En se basant sur la théorie de l'impact social (*social impact theory*), Nowak et Latané (Nowak et Latané, 1994) développent un système SITSIM simulant le comportement d'un groupe d'individus. Ils notent que le changement d'attitudes ou croyances d'une personne sur un sujet précis influe celles des autres selon une relation non linéaire. Sonnemans et al. (Sonnemans *et al.*, 2006) se sont aussi intéressés aux relations inter-individus en étudiant la mutualité des relations sociales.

Dans le même contexte, Kitts (Kitts, 2006) a étudié les relations inter-individuelles et s'est intéressé plus précisément aux relations d'amitié et de conflit et propose un modèle social basé sur les réseaux de neurones, souvent utilisés dans le domaine de l'intelligence artificielle.

Finalement, Levine et Doyle (Levine et Doyle, 2002) ont étudié la dynamique de la relation entre les enseignants et les étudiants en modélisant le "sentiment d'auto-efficacité" de l'enseignant et son effet sur la relation avec l'étudiant. Le modèle proposé utilise les diagrammes de flux utilisés dans la dynamique des systèmes pour étudier l'effet d'un facteur psychologique, qui est

le sentiment d'auto-efficacité d'un enseignant, sur la performance des étudiants.

1.3.5 Les facteurs psychologiques

Le comportement humain est aussi souvent étudié par ses aspects psychologiques comme la motivation le stress, la fatigue, la confiance en soi, etc. Dans ce paragraphe, nous ne cherchons pas à être exhaustif mais nous nous limitons à quelques facteurs humains que nous utilisons dans la phase expérimentale (Cf. chapitre 5).

1.3.5.1 La motivation

La motivation des employés est l'un des facteurs humains qui a le plus préoccupé les entreprises puisqu'il a une influence directe sur l'efficience au travail. Le concept de motivation a fait l'objet de travaux de recherches. Selon Vallerand et Thill (Vallerand et Thill, 1993), la motivation représente le construit hypothétique utilisé afin de décrire les forces internes et/ou externes produisant le déclenchement, la direction, l'intensité et la persistance du comportement.

Plusieurs théories autour de ce concept ont été proposées depuis le début du vingtième siècle et nous ne citons dans ce paragraphe que quelques-unes à titre illustratif. La première théorie que nous présentons, celle des besoins de Maslow, considère que l'homme est instinctif, biologique et fondamental. Elle repose sur la catégorisation et la hiérarchisation des besoins de l'homme en 5 groupes, c'est la pyramide de Maslow (figure 1.3) :

- Les besoins physiologiques (l'entretien de la vie matérielle)
- Sécurité (survie, confort)
- Appartenance et relation (fraternité, solidarité)
- Reconnaissance (estime, honneur)
- Réalisation de soi (plénitude psychologique)

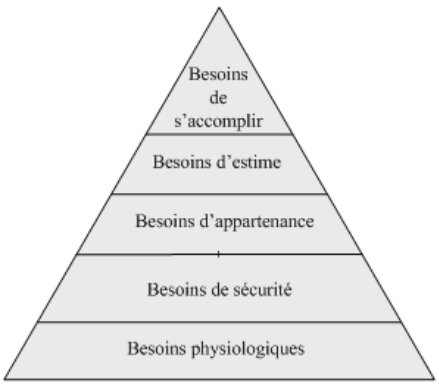


Fig. 1.3 – La pyramide de Maslow

Pour Maslow, la satisfaction d'un besoin chez un individu n'est assurée que lorsque celui du rang inférieur est déjà satisfait. Ainsi, les besoins du premier niveau doivent être satisfaits en

premier lieu. Par exemple, le sentiment de sécurité n'est possible que si les besoins physiologiques sont satisfaits. Cette théorie est souvent critiquée car énormément de données montrent que plus on assouvit un besoin, plus on cherche à le satisfaire.

Quant à la théorie bi-factorielle d'Herzberg, elle affirme également que la motivation est étroitement liée à la satisfaction de certains besoins. Herzberg distingue seulement deux types de facteurs qui interviennent de manière très différente dans le mécanisme de la motivation. La première catégorie regroupe les facteurs intrinsèques ou motivateurs qui peuvent apporter de la satisfaction aux individus. Herzberg propose une liste de facteurs intrinsèques qui est la suivante :

- Les accomplissements (réalisation d'un travail bien fait),
- La reconnaissance des accomplissements (d'eux-mêmes),
- Le travail proprement dit (objet du travail),
- La responsabilité,
- L'avancement,
- La possibilité de développement.

Quant à la deuxième catégorie, les facteurs appelé extrinsèques ou facteurs d'hygiène ou encore d'ambiance, n'ont pas la capacité d'apporter de la satisfaction, mais au contraire, ils pourraient générer de l'insatisfaction. Ces facteurs d'hygiène nécessaires au bon équilibre mental de l'individu (Roussel, 2000) sont :

- le supérieur (qualités et défauts),
- la politique et l'administration de l'entreprise,
- les conditions de travail, les relations avec les collègues,
- les subordonnés et les supérieurs,
- le prestige,
- la sécurité de l'emploi,
- la rémunération,
- les facteurs de vie personnelle.

Finalement, la théorie d'auto-détermination de Deci et Ryan (Deci et Ryan, 1985) propose de caractériser la motivation non pas comme un ensemble de facteurs mais par la distinction de trois types de motivation :

- *L'amotivation* correspond à l'absence de la motivation. L'individu ne trouve plus aucun intérêt à la pratique d'une activité. Ainsi, une personne est amotivée lorsqu'elle ne perçoit plus de relation entre les gestes qu'elle pose et les résultats obtenus (Deci et Ryan, 1985). Elle considère que son comportement est causé essentiellement par des facteurs externes et hors de son contrôle.
- *La motivation extrinsèque* se définit par le fait de pratiquer une activité pour des raisons instrumentales ou pour en tirer quelques choses de bénéfiques ou encore afin d'éviter quelques choses de déplaisant une fois l'activité terminée. Plusieurs formes de motivation extrinsèque sont distinguées : motivation extrinsèque par régulation externe, motivation

extrinsèque par introjection, motivation extrinsèque par identification et extrinsèque par intégration.

- *La motivation intrinsèque* se réfère au fait d'accomplir une activité pour le plaisir et la satisfaction que l'on retire pendant la pratique plutôt que pour des raisons externes. Deci et Ryan distinguent trois types de motivation intrinsèques : motivation intrinsèque aux stimulations, motivation intrinsèque à la connaissance et motivation intrinsèque à l'accomplissement.

Ce type de classification est souvent utilisé lors la construction de questionnaires pour l'évaluation de la motivation dans lesquels des items sont proposés pour chaque élément (Blais *et al.*, 1993; Simoneau *et al.*, 2004).

Quelques tentatives de modélisation du processus motivationnel chez les opérateurs humains dans les systèmes de production ont vu le jour comme le modèle MODERE et son extension MODMIL. Ces modèles ne proposent pas de nouvelles théories mais l'intégration de plusieurs théories parfois complémentaires. Le modèle MODERE (MOtivation DEsire REalité), exprimé dans le formalisme de la dynamique des systèmes (voir chapitre 2), et DODMIL sont utilisés pour la formation de gestionnaires des ressources humaines.

1.3.5.2 Le stress

Le stress est l'un des facteurs étudiés pour comprendre le comportement humain essentiellement en milieu de travail. Ce concept a été étudié par les physiologistes et les psychologues. Pour les physiologistes, le stress est le résultat d'un ensemble de réactions physiologiques chez un individu qui vise à maintenir constants les paramètres biologiques face aux modifications du milieu extérieur. Pour les psychologues, le stress est le résultat de tout facteur émotif, physique, social, économique ou autre qui exige une réponse ou un changement dans une situation précise.

D'une manière générale, le stress peut être défini comme un ensemble de réactions physiologiques et psychologiques face à une situation contraignante. Selon Frère (Frere, 2000), cette dernière est engendrée par la perception, de la part de l'opérateur humain, d'un écart entre les exigences de la situation dans laquelle il se trouve et sa capacité à y faire face.

Le processus du stress, représenté souvent par un modèle de la forme "facteurs de stress-conséquences de stress" (Hart et Cooper, 2001), peut-être décomposé en trois phases majeures : *les facteurs de stress*, *le stress*, et *les conséquences* (Harvey *et al.*, 2006).

Les facteurs de stress sont souvent assimilés au stress lui-même sous-entendant que celui-ci est causé par quelque chose. Les sources de stress sont souvent répertoriées selon qu'elles proviennent de l'environnement de travail, de la responsabilité de l'individu, etc. Le tableau ci-dessus présente un exemple de sources de stress proposé par le CCHST[3]. La deuxième phase du processus - le stress - et la plus importante, peut-être de courte ou longue durée selon la nature des facteurs de stress. Elle peut être traduite par l'interprétation psychologique des événements

[3]Centre Canadien d'Hygiène et de Sécurité au Travail

vus comme stressants par un individu. Finalement, les conséquences sont les résultats et les manifestations comportementales, psychologiques, physiologiques et organisationnelles résultant d'un stress prolongé ou aigu.

Catégories de contraintes professionnelles	**Exemples**
Facteurs uniques à l'emploi	– Charge de travail (surcharge et charge insuffisante) – Autonomie (par exemple : la capacité de prendre ses propres décisions au sujet de son propre emploi ou de tâches précises) – Travail par équipes / heures de travail – Milieu physique (bruit, qualité de l'air, etc.) – Isolement au travail (émotionnel ou travail solitaire)
Rôle dans l'organisation	– Conflit de rôles (demandes contradictoires liées à l'emploi, nombreux superviseurs/gestionnaires) – Ambiguïté d'un rôle (manque de transparence au sujet des responsabilités, des attentes) – Niveau de responsabilité
Perfectionnement professionnel	– Aucune chance de promotion/trop de promotion – Sécurité d'emploi (peur de l'excédent de personnel, que ce soit en raison de l'économie ou d'un manque de travail) – Possibilités de perfectionnement professionnel – Satisfaction liée à l'emploi en général
Relations au travail	– Superviseurs – Collègues – Subalternes – Menaces de violence, harcèlement, etc. (menace à la sécurité personnelle)
Suite page suivante	

Catégories de contraintes professionnelles Suite ...	**Exemples**
Structure/climat organisationnel	– Participation (ou non-participation) à la prise de décision – Style de gestion – Habitudes de communication

TAB. 1.2: Exemples de sources de stress (CCHST, 2000).

1.3.5.3 La fatigue

La fatigue est aussi un des facteurs souvent étudié de près afin d'améliorer les méthodes de travail et l'efficience des individus (opérateurs, militaires, etc.) (Hursh *et al.*, 2003). La fatigue, selon Scherrer (Scherrer, 1967), est une baisse d'activité d'un système vivant, pour une incitation constante et liée à l'activité de ce système. Elle peut être exprimée par exemple, par un épuisement, une somnolence ou un manque de sommeil.

Plusieurs formes et causes de fatigues sont distinguées par (Allain, 1999) :

- La fatigue musculaire qui survient à la suite d'une activité exigeant un travail musculaire conséquent.
- La fatigue nerveuse qui se manifeste par une impossibilité à maintenir le régime initial avec une déconcentration accompagnée d'une augmentation des erreurs et d'une baisse de vigilance. Les fatigues visuelle et auditive peuvent accentuer la fatigue nerveuse.
- La fatigue écologique est le résultat de l'interférence entre les rythmes biologiques et sociaux qui sont imposés à un individu. Ce type de fatigue entraîne une hypersensibilité à la fatigue musculaire et nerveuse ainsi qu'une propension à éviter la vie en société.
- La fatigue organique résulte principalement de problèmes de santé.
- La fatigue subjective se traduit par les sensations perçues par l'individu au cours de l'activité ou lorsque celle-ci cesse.

La fatigue chez un être humain peut se manifester sous plusieurs formes comme les plaintes perceptibles par le dialogue ou par des gestes et des signes. Ainsi, elle peut être quantifiable en ayant recours à des échelles de mesure validées comme le FSS (Fatigue Syndrome Scale) proposée par Schwartz et al. (Schwartz *et al.*, 1993), le FDS (the Fatigue Descriptive Scale) proposée par Iriarte et al. (Iriarte *et al.*, 1999) ou celle proposée par Schwid et al. (Schwid *et al.*, 2002).

1.4 Évaluation et quantification : Les outils de tests

La quantification des aspects psychologiques et psychosociaux est toujours une tâche difficile. Pour cela, la psychométrie et la sociométrie proposent des instruments de mesure et des méthodes d'analyse nécessaires à cette évaluation.

La psychométrie est une science qui comprend l'évaluation des capacités psychiques d'un individu à l'aide de tests et d'autres techniques de mesure scientifique. Elle concerne l'ensemble des théories et des méthodes de mesure en psychologie. Ces mesures sont généralement des questionnaires ou des tests proposés aux individus et portant sur des aspects psychologiques tels que : la satisfaction, le stress, la motivation, etc.

Pour quantifier les interactions inter-opérateurs, on peut utiliser la sociométrie. C'est une science qui met à disposition des méthodes de mesure permettant d'évaluer ces rapports à l'aide d'indices numériques. Dans notre cas, l'évaluation de "l'entente avec le groupe" fera appel à la sociométrie. Quant aux méthodes d'évaluation des aspects tels que les compétences ou la précision dans le travail, elles feront appel à d'autres techniques adaptées.

Le principal instrument de mesure de la psychométrie et de la sociométrie est le questionnaire regroupant de nombreux items portant sur un même sujet. La fiabilité et la validité des instruments sont à la base de toute activité de mesure et doivent être vérifiées avant leur mise en œuvre. La fiabilité des questionnaires peut être déterminée par le calcul de la cohérence interne d'un instrument qui est considéré bon lorsque les utilisateurs répondent de manière cohérente à des items similaires et mesurant le même facteur.

Un questionnaire dans lequel les items sont étroitement liés possède un indice de cohérence interne acceptable ou élevé. L'indice de cohérence le plus utilisé est l'alpha de Cronbach qui se calcule selon la formule suivante :

$$\alpha = \frac{n_{items} \times corr}{1 + (n_{items} - 1) \times corr} \qquad 0 \leq \alpha \leq 1 \tag{1.1}$$

Où n_{items} est le nombre d'items qui composent le questionnaire et $corr$ est la corrélation moyenne entre tous les couples d'items. Une cohérence est considérée comme acceptable si la valeur d'alpha de Cronbach est supérieure à 0.6. Notons aussi qu'il est possible d'améliorer le coefficient alpha de Cronbach pas à pas en retirant du questionnaire les items dont l'exclusion augmente le plus la fiabilité et de recalculer l'alpha de Cronbach et ainsi de suite.

Le nombre d'items qui constituent le questionnaire joue aussi un rôle important dans sa fiabilité. En effet, plus le nombre d'items est grand, plus la fiabilité ou la cohérence interne est grande. Ainsi, une échelle de mesure d'un facteur psychologique qui compte moins d'items, sera moins cohérente qu'une autre plus longue et risque de donner lieu à plus de fluctuations dans les résultats obtenus par les candidats en raison de réponses au hasard. Cependant, l'ajout d'un trop grand nombre d'items accroît la durée de l'expérimentation ce qui limite le gain en fiabilité en raison de la lassitude (Ferrand et Martel, 1985).

1.5 Conclusion

Ce chapitre a traité la psychologie du travail comme un domaine central pour l'analyse du comportement humain, essentiellement des travailleurs, et pour l'amélioration du rendement des entreprises. L'étude du comportement dépend du contexte du travail et des aspects considérés. Cette étude fait appel souvent à des outils de mesures afin de quantifier les facteurs psychologiques ce qui reste toujours une tâche sensible vu la nature de la mesure.

Afin de faciliter cette étude, plusieurs outils informatiques sont proposés, se basant sur la simulation sociale. Elle consiste à simuler les organisations en considérant, non seulement les contraintes techniques, mais aussi psychologiques et psychosociales. Cette technique de simulation est détaillée dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Simulation sociale

Sommaire

2.1 Introduction 24
2.2 La simulation sociale 24
2.2.1 Qu'est-ce que la simulation sociale ? 24
2.2.2 Intérêt de la simulation sociale 25
2.3 Les approches de modélisation des systèmes sociaux 26
2.3.1 Les automates cellulaires 26
2.3.2 Les approches réseaux sociaux 29
2.3.3 La cybernétique 29
2.3.3.1 Description 29
2.3.3.2 La systémique et les facteurs humains 31
2.3.3.3 La dynamique des systèmes 33
2.4 Modèles de comportement, Systèmes multi-agent et logique floue . 35
2.4.1 L'approche multi-agent 35
2.4.1.1 Agent 35
2.4.1.2 Les systèmes multi-agent 36
2.4.1.3 Exemple d'architectures 37
2.4.2 L'approche logique floue 39
2.5 Synthèse 41
2.6 Conclusion 43

2.1 Introduction

Afin de clarifier l'objet de notre travail, la simulation du comportement des opérateurs dans les systèmes de production, nous allons présenter, dans cette partie, un état de l'art des modèles proposés dans le domaine de la simulation sociale. La première partie de ce chapitre définit la simulation sociale et présente l'intérêt de simuler les systèmes complexes en considérant les facteurs psychologiques et psychosociaux. Quant à la deuxième partie, elle présente quelques exemples d'architectures et de modèles de comportement utilisés dans les systèmes multi-agent.

2.2 La simulation sociale

2.2.1 Qu'est-ce que la simulation sociale ?

La simulation sociale, dérivant des intérêts des psychologues, des sociologues, des anthropologues et de quelques économistes, s'intéresse à l'étude des modèles comportementaux et des phénomènes sociaux. Elle permet l'analyse des structures et des organisations sociales regroupant un ensemble d'acteurs (individus, animaux, etc.) en interaction. Axelrod (Axelrod, 1997) décrit la simulation comme la troisième façon de "faire de la science", complémentaire avec les deux méthodes standards dans les sciences sociales, celles d'induction et de déduction. Selon Gilbert et Troitzsch (Gilbert et Troitzsch, 1999), le but de la simulation est de mieux comprendre un phénomène ou de prédire l'évolution d'un système. La simulation permet en outre d'étudier assez finement des processus dynamiques qui prennent en compte naturellement l'évolution temporelle. Les chercheurs se sont souvent intéressés à la simulation en tant que méthode de développement et de test des théories sociales (Whicker et Sigelman, 1991).

Ainsi, nous pouvons la considérer comme un pont reliant les psychologues et les sociologues aux chercheurs de divers domaines. En effet, des chercheurs du domaine militaire (McAlinden et Clevenger, 2006; Mulgund *et al.*, 2000; Gratch et Marsella, 2001) ont proposé des modèles comportementaux de combattant pour les intégrer dans des environnements d'entraînement virtuels. Elle a été aussi utilisée par les économistes (Gou, 2006; Hammond et Sun, 2003), les écologistes (Robert *et al.*, 2005), les politiciens (Schneider, 1996), les éducateurs (Parker et Asher, 1993). Elle a été également employée dans la gestion du transport aérien (Nguyen-Duc *et al.*, 2004; Nguyen-Duc *et al.*, 2005) ou du trafic routier (Kumar et Mitra, 2006).

Conte et Castelfranchi (Conte et Castelfranchi, 1992) identifient deux approches classiques s'appliquant à la simulation des phénomènes sociaux appelés *top-down* et *bottom-up*. L'approche *top-down* consiste à décomposer progressivement un système social. Autrement dit, le modélisateur part d'une vue macroscopique des organisations dans lesquelles les phénomènes de type coopératifs et les interactions sociales sont considérés puis s'intéresse aux phénomènes microscopiques tels que les buts ou les motivations individuelles. Le choix de ce type d'approche de modélisation est justifié par certains concepteurs (Guye-Vuillème, 2004) par les spécifications de

haut niveau qu'il permet d'intégrer au modèle. L'approche *bottom-up* correspond, contrairement à l'approche *top-down*, à étudier dans un premier temps le comportement de chaque individu, élément de base d'un système social. Ces éléments sont par la suite reliés pour former un système plus grand. On commence alors par le niveau microscopique en étudiant le comportement des individus, leurs motivations ou leurs modalités d'interactions. L'observation de leur comportement collectif est alors comparée aux phénomènes macroscopiques observés dans le système modélisé pour discuter les hypothèses émises au niveau microscopique (Epstein et Axtell, 1996).

Dans la pratique, il est plus judicieux d'étudier un modèle réduit d'un système social complexe avec un certain niveau d'abstraction plutôt que de l'étudier en considérant toutes les contraintes (Gilbert, 1993). Ce modèle, plus accessible et à échelle plus réduite, doit être suffisamment similaire au système global pour être capable d'en tirer des conclusions pouvant être généralisées. Le modèle de nature mathématique ou algorithmique doit être vérifié sur plusieurs systèmes sociaux de même catégorie avant d'être finalement validé.

2.2.2 Intérêt de la simulation sociale

La simulation sociale a été souvent utilisée pour implémenter, vérifier et valider des théories et tester les hypothèses proposées par les sociologues qui sont souvent discursives et plus rarement mathématiques. Gilbert et Troitzsch (Gilbert et Troitzsch, 1999) affirment que les phénomènes ou les systèmes étudiés dans les sciences sociales sont complexes, dynamiques et non stationnaires. Ainsi, leur modélisation analytique s'avère très difficile puisqu'il s'agit de systèmes à comportement non-linéaire tandis que la plupart des méthodes statistiques conventionnelles se basent sur des hypothèses de linéarité. Gilbert et Troitzsch concluent que la méthode la plus efficace pour étudier le comportement non-linéaire de systèmes complexes est de les modéliser en construisant des modèles assez fiables et ensuite de passer à la simulation.

Selon Lewandowsky (Lewandowsky, 1993), le but de la plupart des modèles informatiques en sciences sociales est la validation des théories plutôt que la construction de modèles prédictifs. Par exemple, Sibertin-Blanc et al. (Sibertin-Blanc *et al.*, 2006) ont implémenté la théorie de la Sociologie de l'Action Organisée. Jacobsen et Bronson (Jacobsen et Bronson, 1997) ont essayé d'implémenter un modèle de simulation basé sur la théorie de l'action de Parsons (Parsons, 1937) alors que Andriamasinoro et Courdier (Andriamasinoro et Courdier, 2001) ont proposé un modèle dynamique de comportement d'agent en utilisant la pyramide des besoins de Maslow (Maslow, 1943). La vérification des théories sociales en utilisant des langages de programmation informatique standard ou procéduraux, comme proposé par Axelrod (Axelrod, 1997), rend difficile la transformation des modèles comportementaux en modèles informatiques. Une alternative est d'utiliser des environnements de programmation comme Soar (Newell, 1994) ou ACT-R (Anderson et Lebiere, 1998; Anderson *et al.*, 2004) qui sont basés sur des théories cognitives.

Une autre finalité de la simulation des organisations sociales dans lesquelles un grand nombre d'acteurs mène des activités collectives (collaboratives ou concurrentes) est la proposition d'outils

informatiques pour la prévision. Notons que les acteurs concernés peuvent être des opérateurs dans des systèmes de productions (Martinez-Miranda Juan *et al.*, 2006), des pilotes ou des militaires (Silverman et Bharathy, 2005). On cherche alors par ces simulations à tester de nouvelles stratégies ou de nouvelles méthodes de travail et à prévoir le comportement du système avant de les appliquer. Le modélisateur doit transférer une partie des connaissances humaines dans le modèle pour se rapprocher de la réalité. Cette étape, considérée comme un processus de modélisation de comportement, doit s'effectuer grâce à un dialogue entre le concepteur du modèle, un expert du système social et les acteurs. Cette méthode traditionnelle rencontre des difficultés face à des connaissances informelles provenant de l'expérience de l'acteur plutôt que d'un apprentissage classique (Nguyen-Duc, 2005).

L'amélioration de la performance des acteurs d'un système social est aussi l'un des enjeux de la simulation. Plusieurs tentatives de modélisation ont été proposées pour lier des modèles de performances, associés à divers domaines comme le contrôle du trafic aérien (Remington *et al.*, 2004; Lee et Remington, 2004), et des modèles comportementaux. Des outils d'aide à la décision sont proposés afin d'améliorer la performance du système et d'évaluer au vu du comportement du modèle simulé, des scénarios prospectifs de type "que se passe-t-il si"[4] (Deffuant *et al.*, 2002).

Le dernier rôle des modèles de phénomènes sociaux que nous citons est la clarification des liens qui existent entre les phénomènes sociaux envisagés au niveau de la société dans son ensemble, au niveau collectif ou global, et les phénomènes locaux, envisagés au niveau de l'individu (Amblard, 2003). Plus particulièrement, la simulation sociale permet d'étudier le passage des dynamiques individuelles à des dynamiques globales par le jeu complexe des interactions entre individus.

Dans le cadre de notre travail, nous utilisons la simulation sociale pour analyser le comportement des opérateurs afin d'optimiser leur efficacité.

2.3 Les approches de modélisation des systèmes sociaux

Les modèles comportementaux se basent sur plusieurs techniques pour décrire le comportement des acteurs sociaux. Nous présentons dans ce paragraphe, à titre illustratif non restrictif, certaines d'entre elles. Les premières techniques que nous abordons sont celles issues de la cybernétique, de la systémique et de la dynamique des systèmes. Ensuite, nous présentons les modèles dits *connexionnistes* qui définissent le comportement d'un acteur à partir d'un ensemble de capteurs et d'effecteurs reliés entre eux par un réseau de nœuds transformant l'information (Tisseau *et al.*, 2006).

2.3.1 Les automates cellulaires

L'automate cellulaire (AC) est l'une des approches les plus utilisées dans le cadre de la modélisation de phénomènes sociaux. Il s'agit d'un ensemble de cellules interagissant localement de

[4] Terme en anglais : "What-if"

manière simple mais avec un comportement global complexe. À l'origine, ils ont été utilisés pour l'étude de l'autoreproduction de systèmes biologiques (Von Neumann, 1951; Von Neumann, 1966; Lobry, 1991) et ce n'est qu'au cours de la dernière décennie que leur utilisation est devenue plus fréquente dans les sciences sociales et comportementales (Hegselmann et Flache, 1998; Wolfram, 2002; Klüver, 2002; Ahmed et Elgazzar, 2001). L'exemple d'automate cellulaire le plus connu est le "jeu de la vie", inventé par le mathématicien J. Conway, qui est formé d'un ensemble de règles simples. L'état de l'automate dans une étape est uniquement fonction de son état à l'étape précédente. L'évolution de l'état d'une cellule dépend de l'état de ses 8 plus proches voisins.

Les *ACs* étaient souvent associés à l'étude des aspects et des phénomènes liés aux ensembles d'acteurs. Informellement, le groupe est représenté par une grille composée de cellules (figure 2.1), représentant chacune la position "sociale" d'un individu, et se trouvant dans un état qui évolue dans le temps en fonction de l'état de ses voisins.

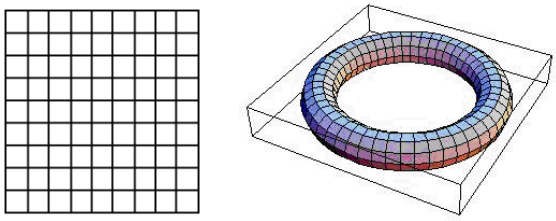


FIG. 2.1 – Grille rectangulaire et toroïdale (Hegselmann et Flache, 1998).

Formellement, un automate cellulaire A est défini par le quadruplet $< Z^d, Q, V, f >$, où l'entier d est la dimension de A qui est constant au cours du temps, Z^d est l'espace cellulaire (Z est l'ensemble des entiers relatifs), Q est l'ensemble fini d'états que va prendre chaque cellule, $V = \{v_1, v_2, \ldots, v_m\}$ est le vecteur de voisinage d'une cellule, f est la fonction de transition locale défini comme $f : Q^{|V|} \longrightarrow Q$ qui détermine le nouvel état d'une cellule en fonction des états des cellules voisines. La fonction locale de transition f peut être la même pour toutes les cellules, on parle alors d'automates cellulaires uniformes. On peut définir aussi la fonction de transition globale F comme étant la fonction qui à une configuration C de A à l'instant t associe la configuration à l'instant $t+1 : F(C)_p = f(C_{p+v_1}, C_{p+v_2}, \ldots, C_{p+v_m})$. La configuration C de A est l'ensemble des états des cellules à un instant donné (C_p est p^{eme} cellule de la configuration C). La configuration C comprend aussi la topologie d'interactions dans A qui peu évoluer de V_t à V_{t+1} par F.

Plusieurs types de voisinages sociaux ont été définis à partir des grilles des automates et les plus connus sont les voisinages de Von Neumann et de Moore. La figure 2.2.a illustre le voisinage, dit de Von Neumann, dans lequel seules les quatre cellules Nord, Sud, Est et Ouest sont considérés comme cellules voisines. Von Neumann considère la cellule centrale comme voisine d'elle-même et donc elle possède en total 5 cellules voisines. Le voisinage de Moore (figure 2.2.b) ajoute les quatre cellules diagonales à celui de Von Neumann pour former un carré entourant la cellule en

question. Ces deux types de voisinages se basent sur une grille rectangulaire. Cependant, d'autres types de grilles peuvent exister comme triangulaire, hexagonale ou même de forme irrégulière (Hegsemmann *et al.*, 1998).

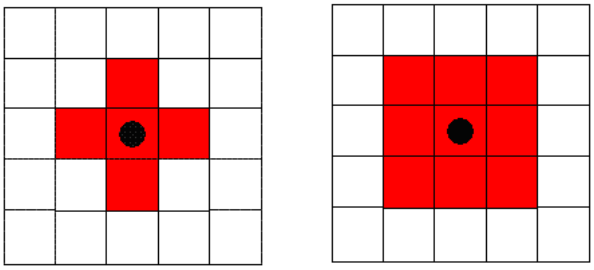


FIG. 2.2 – Les voisinages de Von Neumann et de Moore.

Dans (Hegselmann et Flache, 1998), Hegselmann et Flache exposent un exemple de modèle de la dynamique des opinions dans un groupe basé sur un automate cellulaire à grille rectangulaire (de dimension 2) et avec un voisinage de type Von Neumann. Chaque cellule représente un individu ayant des opinions qui forment l'ensemble d'état des cellules ($v_j \in [0,1]$). L'opinion de chaque personne varie en fonction de celle de ses voisins et de la fonction de transition d'une opinion à une autre définie par :

$$f_i(V) = \frac{1}{m_i} \sum_{j \in m_i} v_j \tag{2.1}$$

Avec m_i le nombre de voisinage de la personne i et f_i la fonction locale de transition de la cellule i permettant de mettre à jour l'opinion de i.

L'automate cellulaire est associé parfois aux socio-matrices[5] comme dans le modèle de Klüver et Stoica (Klüver et Stoica, 2003) qui prévoit le changement de comportement des personnes au sein d'un groupe. Ainsi, la relation entre deux membres peut être quantifiée par une valeur numérique dans la matrice ce qui facilite, d'après Klüver et Stoica, la simulation du processus d'amitié. Bin et Zhang (Bin et Zhang, 2007) ont utilisé les automates cellulaires pour étudier le comportement des groupes du point de vue qualitatif (QSIM : Qualitative SIMulation) en simulant la loyauté des personnes à leur groupe. Ils considèrent alors le groupe comme un automate cellulaire où chaque cellule de la grille représente un individu ayant un degré de loyauté qui dépend des caractères de ses voisins ainsi que des actions de pilotage des managers. A chaque personne est associé un état de loyauté qui peu avoir l'une des valeurs suivantes : haut, moyen et faible.

[5] En s'inspirant des socio-matrices de Moreno (Moreno, 1934)

2.3.2 Les approches réseaux sociaux

En comparaison avec les approches présentées ci-dessus, plusieurs chercheurs en sciences sociales ont adopté les approches statistiques pour élaborer leurs modèles (Wong, 2004; Boguñá *et al.*, 2004). Depuis les années 70s, l'analyse statistique est utilisée pour l'étude des réseaux sociaux et a fait l'objet d'un grand nombre de travaux (Wasserman et Faust, 1994). Un domaine de recherche consiste à développer des modèles probabilistes des relations entre des acteurs sociaux (élève ou opérateurs) au sein de petits groupes.

L'un des modèles statistiques que nous pouvons citer est la famille des modèles p* (Anderson *et al.*, 1999), connus aussi sous le nom *Exponential Random Graphical Models* (ERGMs) utilisés pour l'étude des réseaux sociaux. Le point fort de ces modèles est qu'ils peuvent représenter des tendances structurelles, comme la transitivité, qui définissent des relations de dépendances compliquées difficilement modélisables par des modèles de probabilité de base (Snijders *et al.*, 2006).

Dans ce type d'approche, les réseaux sociaux sont modélisés comme un ensemble de n entités - symbolisant des individus ou des agents - reliés entre eux par des relations symbolisant certaines informations ou facteurs psychosociaux. Les relations sont représentées par une matrice Y, où Y_{ij} égale à 1 si l'agent ou i est en relation avec l'agent j et égale à 0 sinon. Par exemple, $Y_{ij} = 1$ si "i considère j comme un ami". Dans une extension de ce modèle, Y_{ij} sont des valeurs numériques et non uniquement binaires (Robins *et al.*, 1999).

D'autres modèles statistiques sont proposés pouvant être considéré comme des cas particuliers des modèles ERGM comme les graphes aléatoires de Markov (Frank et Strauss, 1986), le modèle p_1 (Holland et Leinhardt, 1981) ou le modèle p_2 (Van Duijn et Snijders, 1995). Le modèle ERGM a été étendu par Snijders et al. (Snijders *et al.*, 2006) afin d'ajouter plus de robustesse dans les paramètres.

2.3.3 La cybernétique

2.3.3.1 Description

La cybernétique est une science, fondée par Norbert Wiener (Wiener, 1948), qui étudie la régulation et les communications dans des systèmes naturels et artificiels qui sont constitués de nombreux éléments organisés d'une certaine manière et en interaction dynamique (François, 1998). Elle considère que le monde est formé de plusieurs systèmes, vivants ou non-vivants, en interaction et de ce fait, les individus, les organisations sociales et les écosystèmes peuvent être considérés comme des systèmes. Un système cybernétique est un ensemble d'éléments en interaction qui peuvent se traduire par des échanges de matière, d'énergie ou d'information. Les éléments du système réagissent à cet échange en changeant d'état ou en modifiant leurs actions. Le système cybernétique utilise divers objets ou concept dont les plus utiles sont :

– Les capteurs : les variables ou les objets qui décèlent les modifications du milieu extérieur ;

- Les effecteurs : les objets ou les variables d'actions sur le monde extérieur ;
- La boîte noire : l'élément du système que l'on considère comme atomique ou élément simple, c'est-à-dire, dont l'on ignore le fonctionnement interne ;
- Boucle de rétroaction : l'un des concepts de base de tout système cybernétique est le *feed-back*, appelé aussi *rétroaction* ou *auto-alimentation* introduisant l'idée de circularité. Il s'agit d'une information que génère la variable sortante, information susceptible d'être transmise à un dispositif qui, la recevant, affectera à son tour de manière positive ou négative le flux entrant (Wiener, 1948; Lugan, 1993).

L'idée de circularité ou de rétroaction, développée par Wiener (Wiener, 1948), peut prendre deux formes : *rétroaction négatif* et *rétroaction positif* (figure 2.3). La *rétroaction négatif* contribue pleinement à la stabilisation et à la constance d'un système face à des événements de perturbation (on parle alors d'un système stable ou en équilibre). La *rétroaction positif*, étudié pour la première fois par Maruyama (Maruyama, 1963), est un processus d'amplification d'écart par rapport à l'équilibre. Le but d'une tel rétroaction est d'entretenir une variation d'un élément du système, soit dans le sens d'un accroissement continu, soit dans le sens d'une diminution continue.

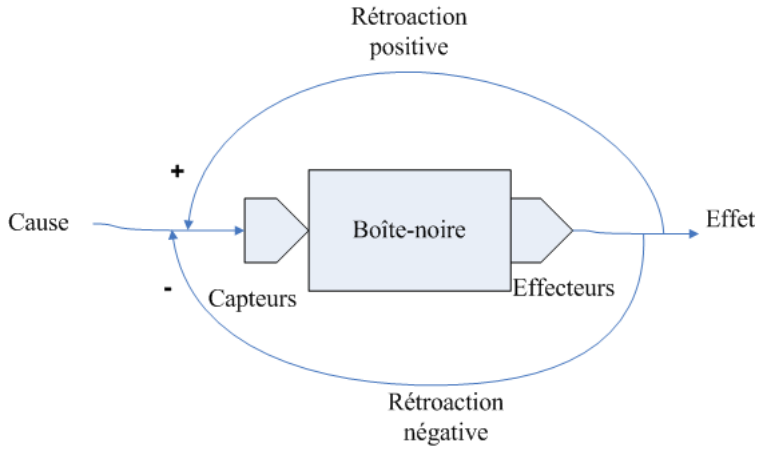


FIG. 2.3 – Les boucles de rétroaction positive et négative.

La cybernétique introduit des notions centrales qui sont utilisées par de nombreux chercheurs en biologie, physiologie, psychologie ou sociologie afin de les appliquer dans leurs domaines. Ainsi, il est possible d'étudier le comportement des individus par une approche cybernétique. Dans ce cas, il s'agit d'étudier comment évoluent les paramètres physiologiques, psychologiques et psychosociaux de l'organisme et comment ils sont fixés. Une approche cybernétique de la modélisation du comportement humain ne peut s'envisager qu'en rapport avec une modélisation des mécanismes physiologique, psychologique ou psychosocial de l'organisme (Furelaud et Calvino, 2007). Mais l'intérêt de la cybernétique, pour la modélisation des systèmes industriels, est son aptitude à couvrir les systèmes naturels et artificiels et plus particulièrement les ensembles sociotechniques

(Lhote *et al.*, 1999).

La théorie de l'information et de la communication a été développée par Shannon parallèlement à la cybernétique dont elle a semblé à un moment ne constituer qu'une partie. Cette théorie est applicable à la transmission des signaux artificiels aussi bien qu'à la linguistique ou au système nerveux. Elle s'intéresse à la forme du message et l'efficacité de sa transmission qui dépend de deux facteurs : sa redondance propre et les bruits qui peuvent perturber la transmission. Cependant, la théorie des communications ne s'intéresse pas au contenu du message qui relève du domaine de la sémantique.

2.3.3.2 La systémique et les facteurs humains

C'est à partir du structuralisme, de la cybernétique et de la théorie de l'information que le psychologue et le biologiste Von Bertalanffy a élaboré la théorie générale des systèmes (appelé aussi la théorie des systèmes) (Von Bertalanffy, 1968). La théorie des systèmes ou *systémique* est devenue une démarche, un langage ou une technique assurant la modélisation des systèmes complexes en conciliant différents points de vue (Vautier, 1999). Le système est défini par Von Bertalanffy (Von Bertalanffy, 1973) comme un complexe d'éléments en interaction mais sa modélisation ne repose pas sur une représentation unique. De Rosnay (De Rosnay, 1975) va plus loin en affirmant qu'un système est un ensemble d'éléments en interaction, organisés en fonction d'un but. L'organisme humain est, par exemple, un système complexe lui-même composé d'éléments complexes (Nunez, 2003).

L'approche systémique est souvent confrontée à l'approche analytique classique puisque la première considère le système dans sa totalité, sa complexité et sa dynamique alors que la deuxième ramène le système à ses éléments constitutifs les plus simples. L'approche analytique se base sur une vision statistique pour étudier les éléments alors que la systémique se base sur une vision dynamique pour étudier les interactions entre les éléments et leurs effets. Le Moigne propose, en réponse aux postulats épistémologiques de Descartes (évidence, réductionnisme, causalisme, exhaustivité), les quatre concepts d'une approche systémique (Le Moigne, 1977) :

- Pertinence ou prisme de perception : convenir que tout objet considéré se définit par rapport aux intentions implicites ou explicites du modélisateur,
- Globalisme : considérer l'objet à connaître par notre intelligence comme une partie immergée et active au sein d'un plus grand tout,
- Téléologie : interpréter l'objet non pas en lui-même, mais par son comportement vers une finalité donnée,
- Agrégativité : convenir que toute représentation est simplificatrice.

En psychologie, la systémique est aussi utilisée dans la thérapie familiale puisque la famille peut être considérée comme un système complexe (selon le point de vue considéré : biologique, psychologique, sociologique). Vautier propose dans (Vautier, 1999) deux méthodes pour appliquer la systémique aux facteurs humains selon le système considéré :

- *Méthodes compréhensives* : le système considéré est l'*être humain*. Avec ce type de méthode, on cherche à représenter l'enchaînement des étapes (ou états) qui caractérisent le passage à l'acte chez un individu. Par exemple, étudier l'enchaînement compétence-motivation-stress-etc. chez une personne dans des conditions données.
- *Méthodes explicatives* : le système considéré est un *groupe d'êtres humains*. Cette méthode porte sur les relations structurales entre les individus d'un même groupe.

Chacune de ces deux méthodes peut être *descriptive* ou *causale*. Pour le premier type, les relations de causalité entre les composants du système, qu'il soit un individu ou un groupe d'individus, ne sont pas détaillées et formulées. Contrairement au premier type, les méthodes de type causal traitent les liens entre les causes et leurs effets. Le tableau 2.1 résume les différentes méthodes utilisées pour l'application de la systémique aux facteurs humains avec quelques exemples d'outils de mise en œuvre de chacune.

	Descriptive	**Causale**
Compréhensives	– Fondé sur l'observation du comportement de chacun des acteurs. – Concerne les processus sensoriels de prise d'information (vision), les actions vocales ou motrices et les manifestations externes du fonctionnement interne de la personne.	– S'appuie sur des observations sur les acteurs humains couplées à des verbalisations de ces derniers pendant et après la réalisation d'une tâche. – Met en évidence chez un individu ses intentions ainsi que les écarts entre ses intentions et ses actions.
	– *Limite* : Ce type de méthode n'accède pas aux mécanismes internes de régulation des processus observables.	– *Limite* : Risque de perte d'information lors de la verbalisation (mentir ou ne pas vouloir admettre la vérité).
	– *Outils de mise en œuvre* : Théorie de l'information, Méthodes de traitement du signal.	– *Outils de mise en œuvre* : Logique floue (représentation linguistique), dynamique des systèmes (Dans notre cas, simulation du modèle dynamique de comportement humain).

Suite page suivante

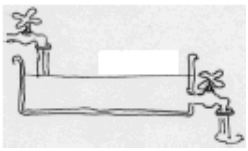
Suite ...	**Descriptive**	**Causale**
Explicatives	– Représente les relations entre les composants d'un système en utilisant des outils statistiques. – Ce type de relations provient de l'expérience des concepteurs, des vendeurs, d'études de marché classiques. – *Limite* : Ce type de méthode permet seulement aux responsables ou des managers d'avoir une vue détaillée sur le système, toujours avec un temps de retard. – *Outils de mise en œuvre* : AFC : Analyse factorielle des correspondances.	– S'appuie sur les corrélations ou les covariances entre les variables du système. – Différencie les variables caractérisant réellement les causes de celles qui le laissent uniquement paraître. – *Outils de mise en œuvre* : Le schéma de Lazarsfeld (Lazarsfeld, 1966) – La deuxième partie du modèle proposé dans ce rapport (niveau psychosocial) se situe dans ce cas. Elle se base sur des règles floues pour décrire le comportement inter-opérateurs.

TAB. 2.1: La systémique appliquée aux facteurs humains.

2.3.3.3 La dynamique des systèmes

Fortement inspiré de la cybernétique, la dynamique des systèmes est une discipline élaborée par Forrester (Forrester, 1961) qui propose des modèles mathématiques et informatiques. La description de la dynamique du comportement interne d'un système peut être assimilée à un réservoir avec un flux d'entrée et un autre de sortie. Le niveau du réservoir varie dans le temps et est déterminé par une équation différentielle comme le montre la figure 2.4.

La dynamique des systèmes se base sur des théories et des méthodes facilitant l'analyse et la compréhension du comportement dynamique des systèmes complexes quelque soit le domaine d'étude - économie (Tauheed et Wray, 2006; Meadows *et al.*, 1972), systèmes hospitaliers (Koelling et Schwandt, 2005) ou ingénierie (Hjorth et Bagheri, 2006).



$Stock(t) = Stock(t_0) + \int_0^t (Entre(t) - Sortie(t))dt$

-a- Métaphore du réservoir



$\frac{d}{dt}Stock(t) = Entre(t) - Sortie(t)$

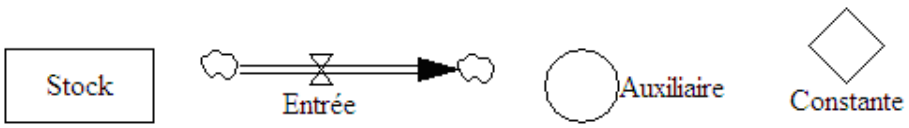
-b- Diagramme flux-stock

FIG. 2.4 – Le concept de diagramme flux-stock (adapté de (Vogstad, 2004)).

En dynamique des systèmes, le système peut être modélisé par un diagramme appelé diagramme flux-stock ou diagramme de Forrester. Ce type de diagramme représente les différents éléments qui composent un système en termes de stocks et de flux et précise les relations établies entre les différentes variables du système modélisé.

Les principaux éléments du modèle sont :

- Variables de niveau ou d'accumulation (figure 2.5.a) : varient uniquement en fonction des flux d'entrée et de sortie qui les alimentent et les vident. Elles caractérisent l'état du système à chaque instant. La variation des variables de niveaux est calculée par une équation différentielle comme montré dans la figure 2.4.b.
- Variables de flux (d'entrée ou de sortie) : modifient l'état des variables de niveau et déterminent les variations dans les différents niveaux du système (figure 2.5.b).
- Les variables auxiliaires (figure 2.5.c) : en général, elles sont des fonctions de transformation qui récupèrent les informations des autres variables (comme entrée) et les convertissent en informations de sortie.
- Les constantes (figure 2.5.d) : ne varient pas ou très faiblement dans le temps relativement au comportement du système.



-a- -b- -c- -d-

FIG. 2.5 – Principaux symboles de la dynamique des systèmes.

Cette approche de modélisation est utilisée en psychologie et en science sociale pour décrire la dynamique de certains aspects comportementaux ou des systèmes sociaux. Par exemple, Copin (Copin, 2003) utilise le diagramme de flux (issu aussi de la dynamique des systèmes) et la notion de boucles de rétroactions pour décrire quelques processus motivationnels et modéliser l'homme dans son activité biologique ou intellectuelle. Jones (Jones, 2005) modélise les relations de causalité qui existent entre des facteurs psychologiques tels que le stress, la motivation ou

l'humeur 2.6.

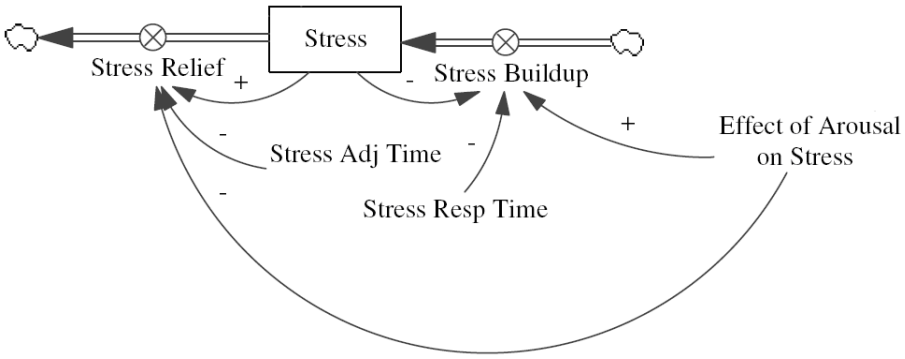


FIG. 2.6 – Modélisation du stress par la dynamique des systèmes (Jones, 2005).

Ces modèles de comportement sont souvent intégrés dans des outils de simulation basés sur des systèmes multi-agent. Dans le contexte de systèmes sociaux, les agents remplacent les individus et dont le comportement est défini par un modèle utilisant l'une des approches décrites ci-dessus.

2.4 Modèles de comportement, Systèmes multi-agent et logique floue

2.4.1 L'approche multi-agent

2.4.1.1 Agent

Il est indispensable de comprendre la notion d'agent avant de passer aux systèmes multi-agents. Selon Ferber (Ferber, 2006), on appelle agent une entité informatique ou virtuelle capable d'agir et de communiquer avec d'autres agents dans un environnement (figure 2.7). Les agents sont capables d'agir, et non pas seulement de raisonner comme dans les systèmes d'IA (Intelligence Artificiel) classiques. Un agent possède aussi un ensemble de ressources (temps CPU, mémoire...) et de compétences et peut éventuellement se reproduire.

Le concept agent repose sur trois concepts fondamentaux : l'autonomie des agents, leur sociabilité et leur interaction avec d'autres agents. L'autonomie d'un agent correspond à sa capacité d'exécuter des actions de sa propre initiative en contrôlant son comportement et qui vont modifier son environnement. Les agents ne sont pas dirigés par des commandes externes, mais par un ensemble de tendances qui peuvent prendre la forme de buts individuels à satisfaire ou de fonctions de satisfaction ou de survie que l'agent cherche à optimiser. Dans certains systèmes, les agents sont commandés selon leurs désirs ou émotions comme le système "Emile" qui implémente l'émotion dans les agents virtuels en se basant sur le modèle émotionnel OCC (Gratch, 2000).

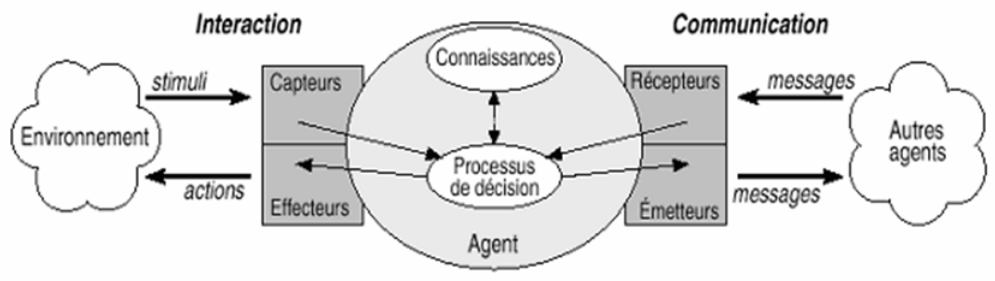


FIG. 2.7 – Environnement de l'agent (Ferber, 1995).

Le deuxième concept est la sociabilité qui signifie que les agents agissent ensemble dans une perspective sociale. Les agents ne sont pas des entités isolées mais des éléments d'un système appelé parfois un système social. Pour cette raison, les systèmes multi-agent sont utilisés en sociologie pour simuler les organismes sociaux et analyser les effets de différentes rationalités et d'échanges entre les acteurs sociaux.

Le troisième concept associé à l'agent est associé aux deux précédents. Bien que les décisions soient généralement prises d'une manière individuelle, les agents doivent collaborer afin de mener des tâches collectives. L'un des modes principaux d'interaction existant entre les agents est la communication.

Les agents n'ont qu'une perception locale et partielle de leur environnement et ne peuvent pas avoir une vision globale. Par exemple, lors de la réalisation d'un travail collectif par un ensemble d'opérateurs, chacun ne possède qu'une partie des données correspondant à sa tâche sans nécessairement avoir une vue globale et détaillée du travail. L'environnement a un effet important sur les agents intégrant leur personnalité (Kshirsagar et Magnenat-Thalmann, 2002) ou leurs états mentaux (Ochs *et al.*, 2006). L'agent met à jours régulièrement ses états mentaux en fonction des événements perçus et par conséquent adapte ses plans d'action.

Notons que le modèle proposé dans ce rapport et détaillé dans les chapitres 3 et 4 peut être utilisé pour définir le comportement des agents. Le modèle proposé couvre les principales caractéristiques de base des agents puisqu'il décrit, en plus du comportement individuel, les interactions sociales qui existent dans un système multi-agent.

2.4.1.2 Les systèmes multi-agent

Un système multi-agent est défini par Ferber (Ferber, 2006) comme une ou des organisations structurelles où les agents communiquent entre eux. Un tel système est composé d'un environnement et constitué d'un ensemble d'objets qui peuvent être perçus, détruits, créés et modifiés par les agents. Un système multi-agent est un ensemble d'entités autonomes actives (les agents). Les phénomènes ou les comportements sont distribués au niveau individuel où chacun est spécialisé

et agit de façon autonome. De ces actions individuelles, émerge la solution ou le comportement général du système, soit par une interaction due à la modification par les agents de l'environnement où ils évoluent, soit par une communication directe entre agents par le biais d'un langage symbolique, par exemple.

Plusieurs outils de simulation de comportement humain ont été développés en se basant sur des systèmes multi-agents intégrant des modèles émotionnels, de personnalité et d'autres aspects psychologiques. Ces outils sont souvent utilisés dans un cadre de formation professionnelle ou d'entraînement. Par exemple, le système MRE (Mission Rehearsal Exercise) (Gratch et Marsella, 2001) propose un environnement d'entraînement pour des militaires afin de les former à des situations d'interventions. Ce système intègre des agents virtuels basé sur un modèle comportemental permettant d'exprimer des expressions émotionnelles.

SCALE-UP (Social and Cultural Analysis and Learning Environment for Urban Pre- and Post- Conflict Operations) est un autre système d'entraînement proposé par (McDonald *et al.*, 2006a). Il permet de former l'armée de gérer des foules de personnes en considérant la diversité culturelle et sociale. Ce système utilise trois types d'agents virtuels utilisant des modèles de comportement différents définis dans la littérature : PMFserv (Silverman, 2001), iGen/VECTOR (Zachary *et al.*, 2001) et ENDER (McDonald *et al.*, 2006b).

Finalement, El jed (El-Jed, 2006) propose un environnement d'entraînement pour les pompiers intégrant un modèle d'interaction sociale capable de prendre en compte la dimension émotionnelle et sociale des interactions humaines.

2.4.1.3 Exemple d'architectures

Plusieurs architectures ont été proposées pour développer des systèmes multi-agents constitués d'agents émotionnels. Elles intègrent la notion d'états mentaux facilitant la représentation des états internes et émotionnels. Parmi les modèles les plus connus pour définir les états intentionnels et mentaux d'agents, on cite l'architecture BDI (Belief - Desire - Intention) (Rao et Georgeff, 1991) qui est basée sur les travaux de Bretman portant sur la théorie de l'action rationnelle. Le modèle BDI est utilisé pour concevoir des agents rationnels possédant les traits mentaux suivants :

- Les croyances : sont les informations que l'agent possède sur l'environnement et sur d'autres agents qui existent dans le même environnement.
- Les désirs : les états possibles envers lesquels l'agent peut vouloir s'engager,
- Les intentions : représentent les états de l'environnement, et parfois de lui-même, que l'agent aimerait voir réalisés.

Les agents BDI sont conçus comme un système composé de structures dynamiques de données correspondant aux notions cognitives de base et d'une file d'événements gardant tous les événements que l'agent doit traiter (Stratulat, 2002). L'agent doit toujours mettre à jours ses désirs et croyances en fonction des événements de son environnement, considérés comme les entrées du

modèle, choisir ses intentions et enfin déclencher les actions adéquates, représentant la sortie du modèle.

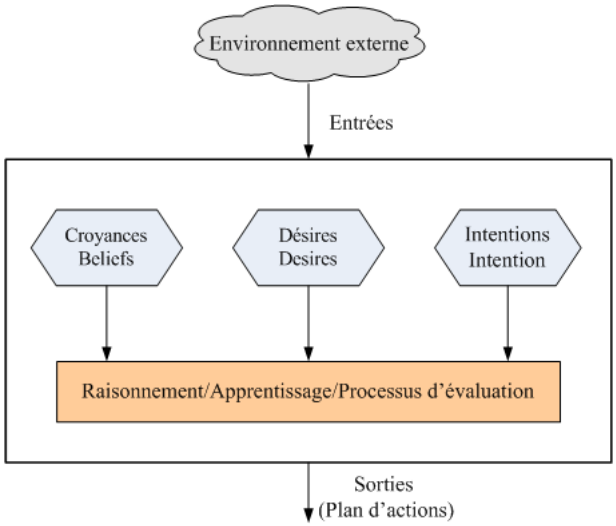


FIG. 2.8 – L'architecture BDI.

L'approche BDI est souvent critiquée pour son incapacité à prendre en compte la composante sociale d'un SMA et son inapplicabilité aux systèmes temps réel comme le modèle intentionnel statique proposé par (Rao et Georgeff, 1991). Jonker et al. (Jonker *et al.*, 2003) proposent une formalisation dynamique se basant sur une approche temporelle. Les croyances se basent sur les observations passées ou présentes de l'environnement et sont modifiées selon les changements perçus de l'environnement. Dans ce modèle, les variables dépendent du temps en tenant compte du retard qui peut exister entre les causes et les effets.

Plusieurs systèmes intégrants des agents BDI ont été élaborés comme les systèmes les plus connus PRS ou dMARS. JAM (Huber, 1999) - Java Agent Model - est un autre système dans lequel les plans d'actions sont sélectionnés et exécutés selon les buts, les intensions et les croyances.

Pour remplacer le modèle BDI, Schmidt (Schmidt, 2000) a élaboré un autre modèle de référence PECS (Physical conditions, Emotional state, Cognitive capabilities, Social status) qui permet de modéliser le comportement humain, non seulement par ses états mentaux et intentionnels, mais aussi en considérant l'environnement social. PECS intègre aussi l'état émotionnel, les capacités cognitives et physiques ce qui le rend plus complet et plus représentatif du comportement humain. Un agent autonome basé sur l'architecture PECS est modélisé comme une entité psychosomatique ayant des capacités cognitives, influencé par des facteurs physiques, émotifs et vivant dans un environnement social.

Comme le souligne Martinez-Miranda et Aldea, l'architecture PECS ne se base pas sur des théories issues de la psychologie générale ou sociale. PECS est une architecture intégrée dans laquelle plusieurs aspects comportementaux sont liés à un processus d'aide à la décision (Martinez-

Miranda et Aldea, 2005).

La figure 2.9 décrit l'influence de l'état interne sur le comportement de l'agent et sur les décisions prises selon le modèle PECS.

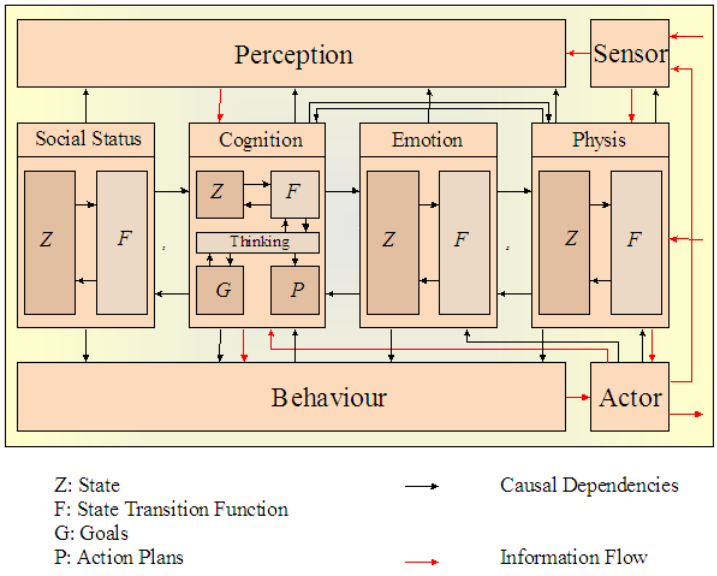


FIG. 2.9 – L'architecture d'un agent selon le modèle PECS (Schmidt, 2000).

L'architecture PECS est utilisée, par exemple, dans le système multi-agent développé par (Brailsford *et al.*, 2006) pour simuler le comportement des patients dans les systèmes hospitaliers. D'autres variables comportementales sont aussi considérées dans ce système comme l'anxiété, la connaissance sur la maladie, le niveau d'éducation et la sensibilité du patient et qui ont des valeurs numériques comprises entre 0 et 1.

Le système développé par Martinez-Miranda et al. (Martínez-Miranda *et al.*, 2002) simule le comportement des membres d'une équipe de travail en utilisant des agents émotionnels. L'état interne de chaque agent est basé sur l'architecture PECS qui est utilisée pour décrire, non seulement l'état intentionnel, mais aussi :

- La capacité cognitive : pour représenter les connaissances techniques de la personne ainsi que sa créativité et son niveau d'expérience.
- L'émotion et la personnalité : pour représenter quelques aspects émotionnels (l'anxiété ou le désir) et des traits de personnalité.
- Les caractères sociaux : pour représenter l'environnement social, c'est-à-dire les relations qui existent entre les personnes.

2.4.2 L'approche logique floue

Le comportement humain, dans sa complexité, ne peut être évalué de manière qualitative avec précision et certitude. Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour considérer les aspects

qualitatifs dans les modèles de comportement comme la théorie des probabilités, la théorie des évidences de Dempster-Shafer ou la théorie des ensembles flous. Introduite par Zadeh (Zadeh, 1965), la théorie des ensembles flous et la logique floue sont les plus utilisées dans les modèles de comportements pour représenter certaines variables linguistiques (Cf. chapitre 4 et annexe).

Le système FLAME (Fuzzy Fuzzy Logic Adaptative Model of Emotions), élaboré par El-Nasr et al. (Seif El-Nasr *et al.*, 2000), intègre les émotions dans le comportement des agents. Selon les événements extérieurs perçus par l'agent et provenant de l'environnement, le module émotionnel détermine le plan d'action en considérant aussi le but initial (figure 2.10). Le processus émotionnel utilise des sous-ensembles flous pour décrire quelques variables émotionnelles et des règles floues pour établir la correspondance entre les événements perçus et les émotions et entre les émotions et le comportement. Les règles floues sont aussi utilisées pour évaluer la désirabilité d'un événement selon son impact sur les buts.

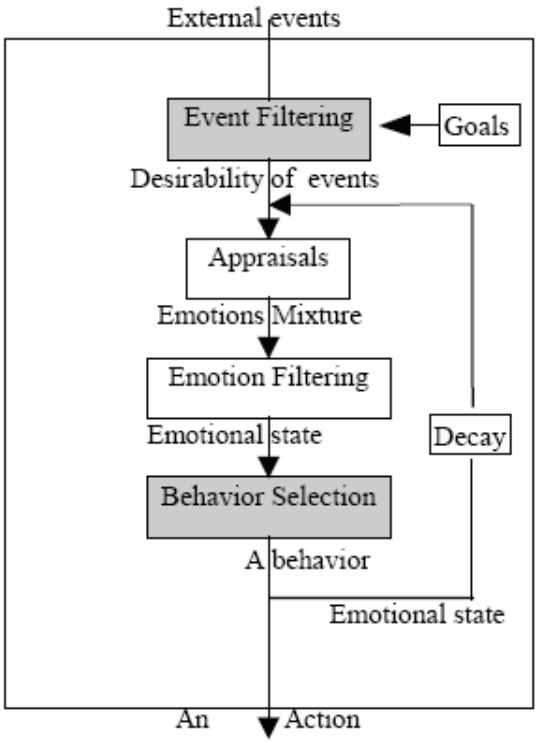


FIG. 2.10 – Le processus émotionnel du système FLAME (Seif El-Nasr *et al.*, 2000).

Dans (Martinez-Miranda Juan *et al.*, 2006), Martinez-Miranda et al. proposent un outil de simulation d'une équipe de travailleurs collaborant pour accomplir une tâche. Le modèle de comportement proposé considère les interactions sociales et les relations entre l'opérateur et la tâche. Il intègre le modèle de personnalité CLEAVER (Biegler *et al.*, 1997), des caractères émotionnels, des capacités cognitives et certaines relations sociales. La simulation du comportement se base sur trois types de règles floues :

- Un ensemble de règles floues pour modifier l'état interne d'un agent (émotions et stress) lors de son affectation à une tâche ;
- Un ensemble de règles pour déterminer la performance d'un agent en fonction de son état émotionnel et de ses traits de personnalité.
- Un ensemble de règles floues pour mettre à jour l'état interne d'un agent lorsque celui-ci termine sa tâche.

Ces modèles d'agents autonomes dont le comportement est défini par un ensemble de règles floues sont appelés par Ghasem-Aghaee et Ören les agents flous ou *fuzzy agents* (Ghasem-Aghaee et Ören, 2003). Un agent flou est doté d'un modèle de personnalité dynamique basé sur le modèle OCEAN. Chaque trait et facette de personnalité est représenté par un sous-ensemble flou et l'état de personnalité de l'agent est déterminé par un système d'inférence constitué de règles floues.

2.5 Synthèse

Les outils usuels de simulation des systèmes de production se basent plutôt sur les aspects techniques pour améliorer le rendement de l'entreprise. Par exemple, des outils d'aide à la décision ont été proposés pour dimensionner les ateliers en termes de machines, en termes de nombre d'opérateurs ou en taille de stock. Le comportement d'opérateurs humain est souvent négligé dans ces outils de simulation à cause de la complexité de l'intégrer dans les modèles existants. Rares sont les travaux qui ont proposé des démarches d'intégration des facteurs psychologiques et psychosociaux dans les outils de simulation des systèmes de production. Dans ce contexte, ce mémoire propose une modélisation dynamique du comportement des opérateurs, avec prise en compte des facteurs comportementaux. Ainsi, les décideurs et les responsables des entreprises disposeront d'informations utiles pour comprendre le comportement d'opérateurs et pour mettre en place toutes les actions de pilotage nécessaires pour améliorer leur rendement.

La modélisation de la dynamique des relations qui peuvent exister entre des éléments psychologiques et cognitifs assure une meilleure visibilité sur le comportement des opérateurs et sur la complexité des interactions. Le chapitre précédent a souligné que les modèles de comportement proposés se focalisent soit sur les facteurs psychologiques et individuels (Émotion, personnalité, capacité cognitive, stress, motivation, etc.) soit sur des facteurs psychosociaux et collectifs (environnement social, conflit, etc.). Ainsi, nous constatons qu'il y a un manque de modèles plus globaux permettant d'interconnecter ces deux types de facteurs et étudiant leurs effets sur l'efficience des opérateurs.

Dans la première partie de ce chapitre, plusieurs approches de modélisation ont été présentées permettant d'étudier le comportement d'individus. Le tableau 2.2 présente une analyse comparative de ces différentes approches. En effet, les automates cellulaires sont l'une des approches les plus utilisées pour étudier la dynamique dans un groupe d'individus. Ils se caractérisent essentiellement par leur simplicité formelle. Cependant, l'utilisation de ce type d'approche pour

étudier le comportement d'individus à deux niveaux (psychologique et psychosocial), avec la prise en compte de plusieurs facteurs, est plus compliquée. De plus, la notion de voisinage dans un automate cellulaire limite le nombre d'interactions d'un facteur avec d'autres facteurs comportementaux.

Approche de modélisation	**Exemple**	**Avantage**	**Inconvénient**
Automates cellulaires	(Bin et Zhang, 2007)	Facilite l'étude des phénomènes sociaux	Difficulté d'étudier plusieurs facteurs en même temps.
Approches statistiques	p* (Anderson *et al.*, 1999), (Wong, 2004)	Description formelle du comportement	– Manque de confrontation de la théorie aux expériences. – Limitation à la vision statistique pour étudier le comportement.
Dynamique des systèmes	(Copin, 2003; Jones, 2005)	Vision dynamique pour étudier le comportement.	Pas d'intégration des aspects mal formulés des aspects psychologiques
Logique floue	(Seif El-Nasr *et al.*, 2000)	Formalisation des aspects qualitatifs	Difficulté de traduire les expertises humaines en règles
Systèmes multi-agent	(McDonald *et al.*, 2006b)	Possibilité de simuler des phénomènes sociaux	Négligence des facteurs psychologiques

TAB. 2.2 – Synthèse des approches de modélisation du comportement.

Les approches statistiques sont aussi utilisées dans la modélisation du comportement humain et essentiellement des phénomènes sociaux. Son avantage majeur est la définition d'un cadre mathématique pour décrire formellement les réseaux sociaux. Toutefois, les travaux basés sur ces types d'approches proposent une vision statique du comportement individuel en le ramenant à ses éléments constitutifs les plus simples. En outre, ces modèles statistiques ne sont pas souvent confrontés aux expériences pour construire un modèle théorique reproduisant, avec le moins d'erreurs possible, le comportement réel.

Quant aux la dynamique des systèmes, utilisée souvent pour modéliser la dynamique des systèmes industriels, peut être utilisée comme approche pour modéliser l'interaction entre les facteurs psychologiques et psychosociaux. Cette approche fournit une vision dynamique et globale sur comportement en tenant compte de sa complexité. En outre, elle propose un cadre formel,

se basant sur des équations différentielles, permettant de modéliser l'évolution des éléments psychologique (stress, motivation, etc.). La théorie des sous-ensembles flous et la logique floue sont aussi utilisées pour modéliser, de manière qualitative, le comportement des agents ou des opérateurs. Ainsi, elles sont utilisés pour traduire certaines variables linguistiques ou formaliser le langage naturel humain.

Enfin, les systèmes multi-agent sont souvent utilisés dans la simulation sociale pour étudier et simuler les phénomènes sociaux en étudiant la dynamique du comportement collectif d'un groupe d'agents. Cependant, le comportement individuel et les interactions entre les facteurs psychologiques et inter-agents sont souvent négligés. Par exemple, peu de modèles étudient l'influence de la motivation ou le stress d'un agent sur sa prise de décision, d'une part, et sur sa communication avec les autres agents d'autre part.

Dans cette thèse, nous nous sommes basé sur la dynamique des systèmes pour modéliser le comportement individuel puisqu'il permet, comme le souligne le tableau 2.2, la prise en compte de la dynamique des interactions entre les facteurs psychologiques, comme la motivation, le stress ou le sentiment d'auto-efficacité. Le modèle de comportement générique proposé dans ce mémoire permet d'avoir une vue approximative, d'une part, de l'effet des éléments psychologique et, d'autre part, de l'effet de l'environnement de travail sur la performance et la productivité en intégrant les perturbations (blessure, changement de tâche, panne machine, etc.) et les actions de pilotage (reformer les équipes, contrôler les opérateurs, mettre en place des formations, etc.). Le chapitre 5 montre qu'aucune hypothèse a priori sur les relations inter-facteurs n'est nécessaire pour construire le modèle. Cependant, une phase expérimentale suivie d'une phase d'identification des paramètres est nécessaire pour supprimer les couplages non significatifs.

Dans un deuxième temps, nous avons utilisé les systèmes multi-agents pour étudier et simuler le comportement collectif et les relations inter-agents en nous intéressant aux facteurs psychosociaux comme le conflit ou la communication. En outre, la modélisation de manière qualitative des facteurs comme le stress ou la motivation avec précision et certitude est difficile vu la complexité de les quantifier de manière exacte. Ainsi, nous faisons appel à la théorie des sous-ensembles flous et à la logique floue pour proposer un cadre formel traduisant certaines valeurs linguistiques comme "faible stress" ou "forte motivation".

2.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la simulation sociale et son intérêt. Nous rappelons que ce travail s'inscrit dans le cadre de l'amélioration de l'efficience des opérateurs avec pour domaine d'application l'optimisation du contrôle de la qualité des produits. Nous avons présenté un état de l'art de quelques modèles de comportement proposés dans la littérature étudiant l'être humain selon plusieurs points de vue. Souvent, ces modèles ont été implémentés dans dans des systèmes multi-agents en définissant des agents autonomes, intelligents et émotionnels. Certains

systèmes décrits dans ce chapitre se basent sur la théorie des ensembles flous pour formaliser les variables "mal définies" et pour intégrer l'incertitude de certains facteurs psychologiques.

A la suite de cette étude bibliographique, nous avons constaté qu'il y a un manque d'outils efficaces pour une modélisation systémique, cohérente et fondée sur des indicateurs quantitatifs du comportement d'opérateurs dans un environnement industriel. Pour cela, nous présentons, dans le chapitre suivant, une approche systémique pour la modélisation, dans une première partie, de la dynamique du comportement humain en mettant l'accent sur les relations de causalité qui existent entre certains facteurs psychologiques. Nous nous basons sur des graphes de comportement pour la compréhension et des équations différentielles pour la simulation. Dans une deuxième partie, le modèle proposé intègre la dimension psychosociale en modélisant les relations inter-opérateurs. Ce modèle permet de considérer, en plus des éléments psychologiques du comportement, les facteurs psychosociaux comme le conflit, la communication ou l'amitié. Nous ajoutons au modèle précédent un graphe d'interaction entre les acteurs associé à des règles floues pour l'analyse du comportement dynamique

Chapitre 3

Modèle de comportement dynamique

Sommaire

3.1 Introduction 46
3.2 Comportement individuel 46
3.2.1 Description formelle du comportement 46
3.2.1.1 Introduction du modèle 46
3.2.1.2 Modélisation des relations inter-facteurs psychologiques 48
3.2.1.3 Modèle comportemental global 50
3.2.1.4 Le modèle mathématique 54
3.2.2 Le passage à la simulation : Exemple 57
3.2.2.1 Simulation avec Simulink 59
3.2.2.2 Simulation avec Vensim 59
3.2.3 Scénario de test 60
3.2.4 Analyse de l'exemple et résultats de la simulation 62
3.3 Comportement du groupe 64
3.3.1 Description formelle 65
3.3.1.1 Modèle comportemental étendu 65
3.3.1.2 Le modèle mathématique 67
3.3.2 Analyse d'un exemple 68
3.4 Conclusion 70

3.1 Introduction

Après cette étude bibliographique, notre objectif est de proposer un modèle permettant d'analyser le comportement d'opérateurs et d'étudier l'effet de certaines facteurs psychologiques et psychosociaux sur la performance individuel.

Nous présentons dans ce chapitre un modèle comportemental dynamique permettant d'avoir une meilleure description des éléments du comportement individuel d'un opérateur, d'une part, et la représentation du comportement d'un groupe d'opérateurs d'autre part. Cette approche, à deux niveaux, psychologique et psychosocial, donne aux responsables une vue plus détaillée sur les aspects psychosociaux de l'entreprise. L'approche proposée peut être considérée comme un outil d'aide à la décision utilisable par les manageurs pour tester et simuler l'effet de certaines actions ou décisions sur certains facteurs comportementaux.

3.2 Comportement individuel

3.2.1 Description formelle du comportement

3.2.1.1 Introduction du modèle

La modélisation des aspects humains à l'aide des modèles connexionnistes ou causaux n'est pas une idée nouvelle, mais sa manipulation et les aspects étudiés diffèrent d'un modèle à un autre. Par exemple, les cartes cognitives détaillées dans le chapitre précédent sont souvent utilisées pour représenter les compétences et les connaissances par un graphe orienté (Tisseau *et al.*, 2006). Le formalisme DEVS est aussi utilisé dans certains modèles (Seck, 2007) pour représenter le comportement humain par des "graphes d'états" en discrétisant le temps.

Dans ce travail, nous nous intéressons à la modélisation du comportement des opérateurs ou des individus du point de vue psychologique et psychosocial. De nombreux travaux rappellent la complexité de la modélisation du comportement humain. L'opérateur est modélisé au regard de ses compétences (savoir, savoir-être et savoir faire) (Harzallah, 2000; Harzallah et Vernadat, 2002), de ses performances (Siebers *et al.*, 2004), de ses mouvements physique (Bruzzone et Figini, 2004), de sa culture (Miodownik, 2006) des aspects psychologique et psychosocial (Jonker *et al.*, 2003; Oren et Ghasem-Aghaee, 2003). Certains travaux (Seif El-Nasr *et al.*, 2000; Schmidt, 2000) proposent des modèles basés sur des aspects psychologiques comme l'émotion, la personnalité ou la motivation pour décrire la dynamique du comportement des individus (pour plus de détails, voir chapitre 1).

Dans ce cadre, ce chapitre décrit un modèle de comportement permettant de représenter les interactions entre quelques éléments psychologiques et la performance tout en considérant la dynamique du comportement des opérateurs. Il est basé sur un graphe orienté constitué de plusieurs nœuds représentant chacun un aspect psychologique ou cognitif. Ces derniers sont connectés par des arcs valués symbolisant les relations d'influences entre eux.

Dans le graphe, chaque nœud représente un facteur comportemental psychologique. L'état psychologique d'un opérateur peut être caractérisé par plusieurs éléments, traités abondamment dans la littérature. Citons à titre d'exemple : Satisfaction (Cornet, 1995), Stress (Giambiasi *et al.*, 2005; Frere, 2000), Motivation (Ryan et Deci, 2000; Blais *et al.*, 1993; Frere, 2000), Fatigue (Giambiasi *et al.*, 2005), Sentiment de sécurité, Effort, Précision dans le travail, Capacité physique (handicap, niveau de handicap), Habileté, Charge de travail (Belyavin et Farmer, 2006), Entente avec le groupe (Cornet, 1995; Frere, 2000), Statut de l'opérateur, Conditions de travail (Cornet, 1995; Frere, 2000) et plusieurs autres éléments (Ehrhardt *et al.*, 1994).

Plusieurs théories ont été élaborées autour de ces aspects telles que celles de la motivation (Ryan et Deci, 2000; Maslow, 1970; Vroom, 1964), de la fatigue (Allain, 1999), ou du stress (Schaubroeck et Merritt, 1997). Le but de ce travail n'est pas de les présenter, mais de *montrer les liens qui peuvent exister entre elles* et de *voir comment l'opérateur réagira face à une situation précise.*

L'exemple de graphe de comportement de la figure 3.1 illustre les facteurs cognitifs et émotionnels les plus influents sur la performance d'un opérateur dans un système de production. Il s'agit d'un exemple illustratif dont les arcs ne sont connus qu'après une phase expérimentale suivie d'une identification des valuations des arcs en éliminant ceux qui sont non significatives (Cf. chapitre 5). En effet, la satisfaction, par exemple, est l'un des concepts liés à la performance. En psychologie, certains travaux montrent qu'une corrélation positive existe entre eux. Jacobs et Solomon (Jacobs et Solomon, 1977) considèrent que plus la performance est forte plus elle génère de la satisfaction alors que Iaffaldano et Muchinsky (Iaffaldano et Muchinsky, 1985), ne partageant pas le même avis, affirment que la satisfaction individuelle au travail n'est pas fortement liée à la performance.

De plus, les changements organisationnels dans les systèmes de production, qui ont pour objectif d'améliorer la performance et la qualité des produits, peuvent avoir des effets inattendus. En effet, Ils peuvent stimuler le comportement des opérateurs augmentant ainsi leur stress qui peut affecter la qualité des services et/ou des produits offerts aux clients (Elliot, 1990).

De la même manière, d'autres chercheurs considèrent que la performance est étroitement liée à l'effort, à la précision et à la qualité du travail (Seo *et al.*, 2004; Judge et Bono, 2001). Le niveau de l'effort a été souvent considéré comme une conséquence directe des processus motivationnels, quant à la précision, elle est influencée par la variation du stress (Jones, 2005). Concernant l'humeur, elle peut être influencée par le degré de motivation des opérateurs (Kanfer et Heggestad, 1997) et peut également être affectée par l'augmentation du stress chez l'individu (Douthitt et Aiello, 2000).

Dans ce type de graphe comportemental, il est important de différencier les nœuds associés au comportement de ceux qui représentent le monde extérieur. Par exemple, dans le graphe de la figure 3.1, qui n'est qu'illustratif et n'est pas issus des résultats d'expériences, les nœuds situés à l'intérieur du cadre (2, 3, 4, 6, 7 et 9) sont ceux du comportement alors que les deux autres, à

savoir 1 et 5, représentent des facteurs associés à l'environnement du travail.

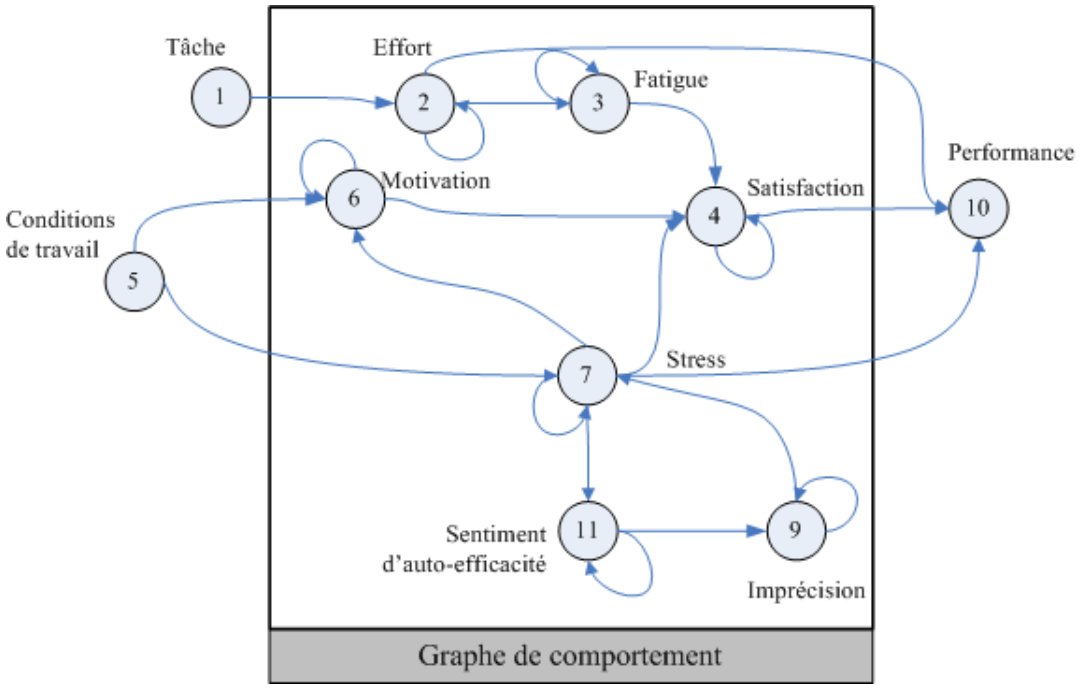


FIG. 3.1 – Exemple de graphe.

3.2.1.2 Modélisation des relations inter-facteurs psychologiques

L'un des objectifs du modèle de comportement proposé est d'étudier les relations de causalité qui existent entre les facteurs psychologiques. Nous avons souligné dans le paragraphe précédent que plusieurs travaux ont étudié les relations de causalité entre certains facteurs psychologiques de manière individuelle sans proposer de modèle générique. Par exemple, certains psychologues du travail se sont intéressés à l'impact de la variation de l'effort sur la performance alors que d'autres ont étudié l'effet de la motivation sur l'effort. Deux types de relation de causalité peuvent être distinguées : les relations positives et les relations négatives. Pour une relation positive (tableau 3.1), l'augmentation d'un facteurs (ex. motivation) entraîne l'augmentation d'un autre (ex. effort) et inversement. Quant à la relation négative (tableau 3.2), l'augmentation d'un premier facteur, considéré comme la cause, entraîne la diminution d'un autre, considéré comme l'effet, et inversement (voir tableau 3.1).

Prenons l'exemple de la relation de causalité entre la fatigue d'un opérateur dans un environnement industriel et le taux de défaut des pièces qu'il produit. le modèle de comportement doit déterminer de manière qualitative l'effet d'une augmentation (respectivement la diminution) de la fatigue sur le taux de défauts des produits. Selon le tableau 3.3, pour réduire le taux de défauts dans les produits, il est nécessaire de diminuer la fatigue de l'opérateur en réaménageant

		Cause	
		Forte	**Faible**
		+	−
Effet à diminuer	+	+	
Effet à augmenter	−		+

TAB. 3.1 – Une relation de causalité positive.

		Cause	
		Forte	**Faible**
		+	−
Effet à diminuer	+		−
Effet à augmenter	−	−	

TAB. 3.2 – Une relation de causalité négative.

l'espace de travail, par exemple, ou en accordant des pauses de temps en temps à l'ensemble des employés.

		Fatigue	
		Forte	**Faible**
		+	−
Taux de défaut diminue	+	+	
Taux de défaut augmente	−		+

TAB. 3.3 – L'effet de la fatigue sur le taux de défaut.

Cette relation de causalité entre deux facteurs est représentée graphiquement par un arc qui relie deux nœuds symbolisant la fatigue et le taux de défaut, étudié dans le tableau ci-dessus. Selon ce même tableau, la relation entre ces deux facteurs est positive et donc l'arc est accompagné par un signe "+". Rappelons que cette valuation de l'arc n'est que qualitative et nous détaillons dans le chapitre 5 la procédure d'identification de cette valuation.

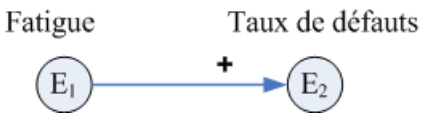


FIG. 3.2 – Relations entre la fatigue et le taux de défauts.

3.2.1.3 Modèle comportemental global

Description. Le modèle de comportement proposé est inspiré des diagrammes causaux (Forrester, 1961; Sterman, 2000) et est issu de la dynamique des systèmes (Cf. Chapitre 2). Ces diagrammes permettent la modélisation des interactions entre les différents éléments des systèmes réels, dont les systèmes de production, en utilisant des équations différentielles. Des démarches analogues, se basant sur la dynamique des systèmes et la modélisation mathématique, ont été proposées pour la modélisation du changement dans les entreprises (Larsen et Lomi, 2002), l'analyse du comportement de systèmes manufacturiers (Tesfamariam et Lindberg, 2005) ou hospitaliers (Hirsch *et al.*, 2005; Koelling et Schwandt, 2005) et la gestion des ressources humaines (Copin, 2003). Elle est surtout caractérisée par la notion de feedback ou rétroaction. Dans notre cas, nous proposons de considérer le comportement humain comme un système complexe constitué de plusieurs éléments en interaction et caractérisé par la présence de boucles de rétroaction qui sont détaillées ci-dessous.

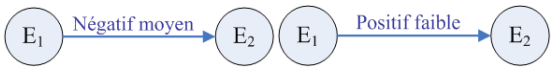
Dans ce modèle, constitué de nœuds et d'arcs modélisant la dynamique des interactions entre les facteurs psychologiques, une relation est dite "négative" (figure 3.3.a) si l'augmentation de E_1 engendre une augmentation de E_2 et inversement. En revanche, on qualifie une relation de "positive" (figure 3.3.b) si une croissance de E_1 entraîne une croissance de E_2 et inversement, une décroissance de E_1 entraîne une décroissance de E_2 .



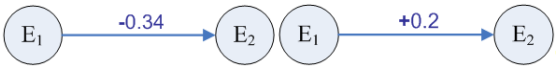
-a- Influence négative.



-b-Influence positive.



-c- Valuation linguistique.



-d- Valuation numérique.



-e- Influence non-linéaire.

FIG. 3.3 – Exemples de relations entre facteurs psychologiques

En plus de ces signes, qui peuvent être traduits par les valeurs linguistiques "positif" et "négatif", les relations inter-éléments peuvent être quantifiées par l'une des valeurs linguistiques suivantes : très faible, faible, Moyen, fort ou très fort (figure 3.3.c). Ces valeurs linguistiques, décrivant le niveau d'influence d'un élément de comportement sur un autre, sont traduites dans

ce chapitre en valeurs numériques (figure 3.3.d).

Les interactions entre les facteurs comportementaux ont, dans certains cas, un comportement plus complexe et donc non-linéaire - symbolisé par NL_{12} (figure 3.3.e) ; la relation entre le stress et la motivation détaillée dans la figure 3.8 et le paragraphe 1.2.1.3.3 en constitue un bon exemple.

Le comportement humain est alors modélisé par le triplet $G_I =< E, A, R >$ avec :

- $E = \{E_i\}_{i=1..n}$ est l'ensemble des éléments psychologiques comportementaux d'un individu et n est le nombre de facteurs psychologiques considérés. Ils représentent les nœuds du graphe de comportement.
- A est l'ensemble des arcs qui constituent le graphe. Ils relient ainsi les différents nœuds $\{E_i\}_{i=1..n}$.
- $\mathbf{R} = [r_{il}]_{i,l=1..n}$ est la matrice des valuations où r_{il} (nombre positif ou négatif) représente le degré de la relation entre E_i et E_l. Notons aussi que r_{ii} représente l'influence de l'état actuel de l'i^{eme} facteur sur sa future variation. Ces valeurs sont obtenues à la suite d'une série d'interviews et d'enquêtes[6] avec les opérateurs concernés. Un processus d'identification des paramètres du modèle permettra de déterminer la structure globale du graphe. La construction du modèle et sa validation sont détaillées dans le chapitre 5.

Le graphe de la figure 3.4 n'est qu'un exemple illustratif de modèle de comportement. Nous verrons dans le chapitre 5 que la construction d'un tel modèle ne nécessite aucune hypothèse a priori sur les relations inter-facteurs. La phase d'identification, présentée dans le chapitre 5, élimine les relations non significatives dont les valuations des arcs sont négligeables.

Le modèle de la figure 3.4 est constitué de 10 facteurs dont 2 (les éléments 1 et 5) sont liés directement à l'environnement de travail, nommés tout au long de ce travail les entrées ou les nœuds d'entrée du modèle, et l'élément 10 caractérise le résultat de l'activité. La notion de nœuds d'entrée est particulièrement utile dans la modélisation mathématique qui est présentée dans le paragraphe 3.3.1.2.

Enfin, nous verrons dans le chapitre 5 que la procédure de construction et de validation d'un tel graphe, avec un nombre élevé de facteurs, est délicate vu la complexité de la quantification de certains éléments comportementaux.

Les différentes boucles. Comme tout système à comportement dynamique complexe, le comportement humain peut être caractérisé par les boucles de rétroaction définies par l'approche systémique. Ainsi, deux types de boucles peuvent être distingués dans un diagramme causal ou dans un graphe de relations : les boucles stabilisatrices et les boucles explosives.

Les boucles stabilisatrices. Une boucle stabilisatrice ou régulatrice tend à amener de façon asymptotique la structure correspondante vers un état d'équilibre. On parle alors de comportement homéostatique ou d'équilibre (Karsky, 1995). En dynamique des systèmes, cette boucle

[6]Les questionnaires ou les interviews

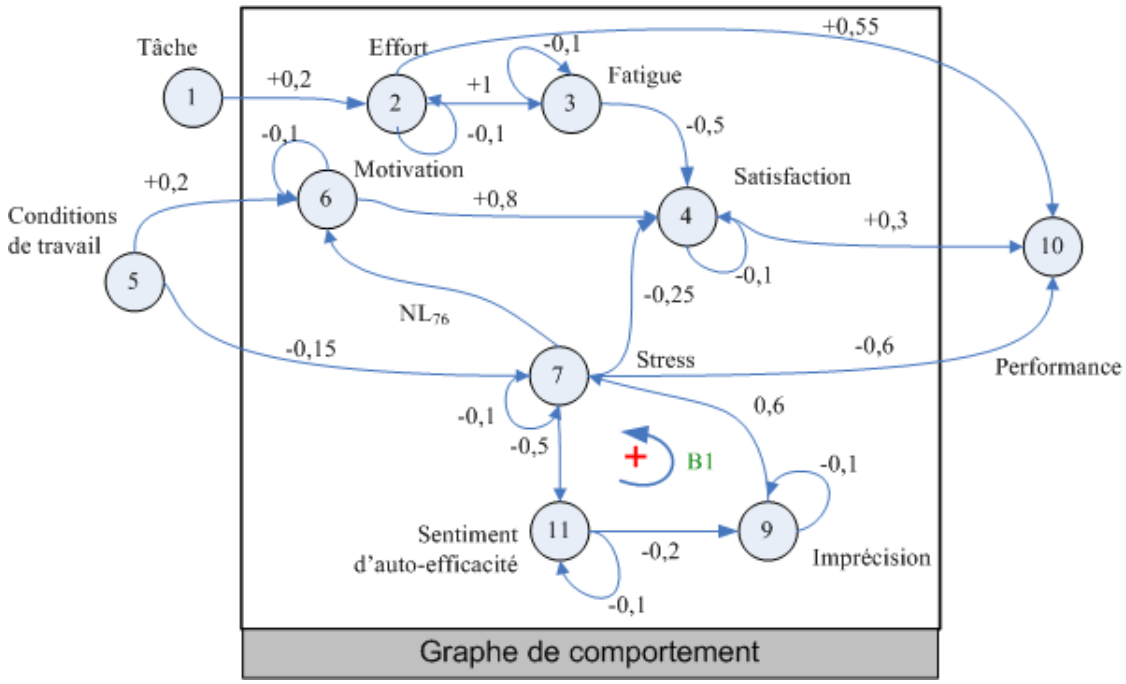


FIG. 3.4 – Exemple de graphe.

est appelé aussi "boucle négative", car caractérisée par un nombre impair de relations négatives entre les éléments (figure 3.5). Le principe de régulation consiste à limiter la divergence d'une grandeur en introduisant une correction opposée. Cependant, les coefficients et les non-linéarités ont également une importance au niveau de la stabilité des boucles.

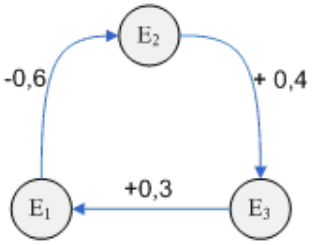


FIG. 3.5 – Boucle stabilisatrice.

On parle alors de relations négatives lorsqu'une variation d'un élément, que ce soit un accroissement ou une baisse, crée un effet en sens inverse chez d'autres éléments. Un graphe de comportement formé par de telles boucles peut traduire dans certain cas la stabilité psychologique de l'opérateur. Il peut se sentir confiant, en sécurité et satisfait de sa situation. En d'autres termes, les éléments psychologiques peuvent varier dans le temps, mais le comportement global reste stable et constant. La présence de relations trop fortes ou non linéaire peut néanmoins conduire à un comportement instable.

Les boucles explosives. Ce type de boucle a un comportement explosif et une croissance exponentielle. Il peut y avoir aussi un comportement implosif c'est-à-dire une décroissance de plus en plus rapide (figure 3.6).

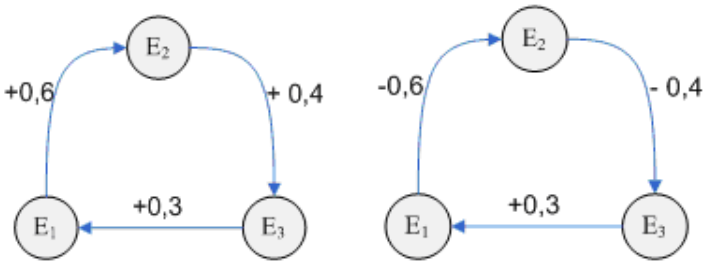


FIG. 3.6 – Boucles explosives.

Selon les éléments constituant ce genre de boucles, la croissance continue (respectivement la décroissance) peut avoir deux interprétations : une positive et une négative. Ainsi, une augmentation continue de la motivation ou une diminution du stress peut être bénéfique et alors la boucle explosive l'est aussi. Néanmoins, une boucle explosive constituée de stress et de sentiments d'insécurité peut avoir des conséquences directes sur la stabilité des opérateurs et ainsi influer leur performance et leur productivité.

Exemple (Figure 3.7) : Un accroissement de conflit de l'opérateur avec les autres membres du groupe de travail conduira à une augmentation du niveau d'absentéisme. Cette tendance aura un impact négatif sur la stabilité et entraînera à son tour une augmentation du conflit.

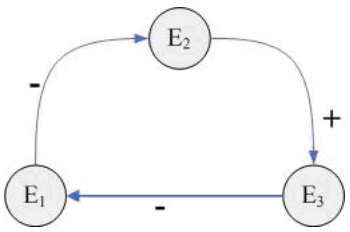


FIG. 3.7 – Exemple de boucle explosive.

Finalement, notons que si une boucle explosive est contrée par une boucle stabilisatrice, d'effet (de gain) suffisant, alors le système gagnera en stabilité.

La non-linéarité. Le dernier aspect caractérisant ce type de graphe est la non-linéarité des relations entre les facteurs humains. En effet, une relation linéaire obéit à de simples règles additives, de constances dans le rapport entre les causes et les effets, de proportionnalité entre les éléments. Cependant, le comportement humain est beaucoup plus complexe qu'un simple système régi par des actions linéaires. Par conséquent, nous proposons l'utilisation de la non-linéarité

qui se caractérise par la non-proportionnalité stricte entre les éléments comportementaux. Similairement aux systèmes non linéaires, le comportement humain, ne résultant pas d'une simple sommation des comportements élémentaires de chaque partie, n'obéit pas à la règle d'additivité.

Dans l'exemple de la figure 3.4, pour des raisons de simplification, toutes les relations sont considérées comme étant linéaires sauf celle entre la "motivation" et le "stress". La non-linéarité est modélisée par la courbe de la figure 3.8. En effet, pour un faible niveau de stress, la motivation d'un opérateur augmente avec l'accroissement du stress. Mais à partir d'un certain seuil s ($s = 0.4$ dans cet exemple), le sens de la relation change et toute augmentation de stress entraîne la démotivation. Cela entraînera à la fois une diminution de la qualité du travail et de la performance.

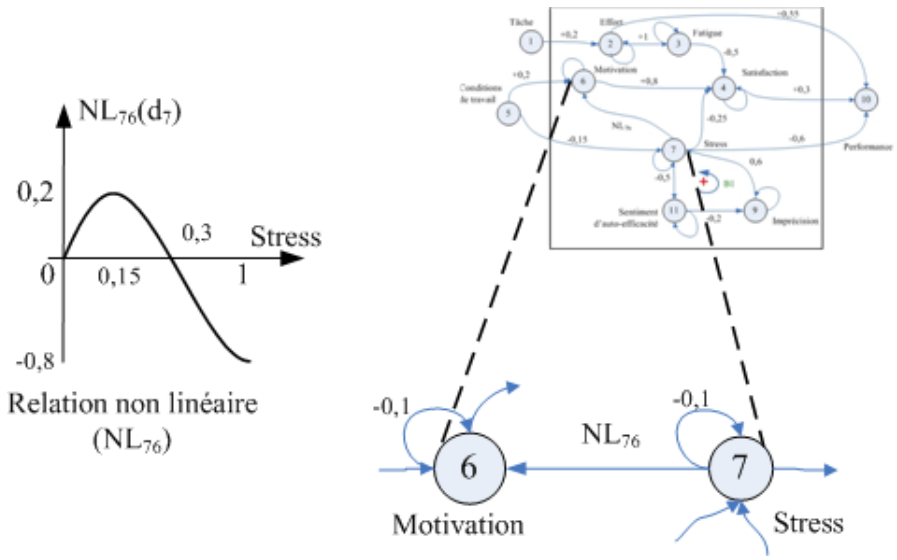


FIG. 3.8 – La non-linéarité entre le stress et la motivation.

3.2.1.4 Le modèle mathématique

En plus de la matrice R des relations internes définie précédemment, nous définissons une deuxième matrice $S = [s_{hi}]_{i=1..n,h=1..q}$ où chaque élément s_{hi} représente le degré de la relation entre h^{ieme} nœud d'entrée (ou les facteurs externes ; par exemple : 1 et 5 du graphe 3.4) et le i^{ieme} facteur humain. Notons que q est le nombre de ces facteurs externes.

Chaque élément psychologique E_i du graphe est caractérisé par son degré $d_i(t)$, à valeurs dans [0..1] qui varie dans le temps. Ainsi, d_i(t) est le degré de l'élément E_i à l'instant t. Par exemple, d_i représente le degré de satisfaction (i^{eme} élément) au cours de la journée. Nous définissons aussi le vecteur $\mathbf{d}(t) = [d_i(t)]_{i=1..n}$ et l'ensemble N des valeurs linguistiques que peut avoir chaque $d_i(t)$: N = {Très faible, Faible, Modéré, Fort, Très fort}. Dans un premier temps, ces valeurs linguistiques sont traduites en valeurs numériques appartenant à l'intervalle [0..1] ; la valeur 0

exprimant un degré très faible et la valeur 1 un degré très fort. La quantification des facteurs psychologiques peut être assurée par des questionnaires et des interviews (Cf.chapitre 5).

La description formelle de l'évolution du comportement peut être définie par des modèles mathématiques à complexité différente. Dans ce cadre, les équations différentielles ont été utilisées pour modéliser certains aspects dynamiques et complexes liés au comportement humain. Dans son modèle, Jones (Jones, 2005) a utilisé des équations différentielles pour formaliser l'effet de l'humeur et d'autres facteurs comportementaux sur la variation de la motivation humaine. Le même modèle a été également appliqué à l'effort.

Des modèles mathématiques linéaires et non linéaires ont été également employés en psychologie sociale pour décrire d'autres genres de relations interindividuelles. À titre d'exemple, Strogatz (Strogatz, 1994) a proposé un modèle mathématique pour décrire les relations d'affection entre Roméo et Juliette en s'appuyant sur une équation différentielle linéaire. D'autres modèles discrets et dynamiques associés à l'interaction verbale au sein d'un couple marié ont été proposés par Gottman et al. (Gottman *et al.*, 2002).

De la même manière, le comportement des opérateurs peut être modélisé par des équations différentielles. Le modèle d'évaluation proposé, qui se base sur la deuxième représentation, suppose que la variation d'un élément dépend de son état actuel d_i ainsi que de l'état d'autres éléments. L'équation (3.1), sous forme de fonctions matricielles R et S, est une formule générale intégrant le cas non-linéaire :

$$\frac{d}{dt}\mathbf{d}(t) = R(\mathbf{d}, t) + S(\mathbf{e}, t) \tag{3.1}$$

Avec $R(\mathbf{d}, t)$ et $S(\mathbf{e}, t)$ les fonctions, dépendant de $\mathbf{d}$ et de $\mathbf{e}$, décrivent les relations entre les éléments psychologiques. $\mathbf{e}(t) = [e_h(t)]_{h=1..q}$ est le vecteur décrivant le comportement des nœuds d'entrée symbolisant les actions externes, tels que les événements de perturbations ou les actions de pilotages proposées par les manageurs.

Puisque la non-linéarité doit être intégrée dans le modèle, les relations sont notées par la fonction non linéaire et non stationnaire suivante :

$$r_{il} = r_{il}(d_i, t); i, l = 1..n \tag{3.2}$$

Dans le cas de relations d'influences non linéaires et stationnaires (ne dépends pas du temps), le degré r_{il} de la relation dépend uniquement des degrés de E_i et E_l :

$$r_{il} = r_{il}(d_i); i, l = 1..n \tag{3.3}$$

Dans le cas de relations linéaires et non-stationnaires, la relation r_{il} dépend uniquement du temps :

$$r_{il} = r_{il}(t); i, l = 1..n \tag{3.4}$$

Enfin, dans le cas de relations d'influences linéaires et stationnaire, c'est-à-dire constant, la notation matricielle du modèle (3.1), décrivant la variation de chaque facteur, devient comme suit(3.5) :

$$\frac{d}{dt}\mathbf{d}(t) = \mathbf{R} \times \mathbf{d}(t) + \mathbf{S} \times \mathbf{e}(t) \tag{3.5}$$

Dans ce cas, $\mathbf{R}$ et $\mathbf{S}$ sont les matrices regroupant les les niveaux d'influences de toutes les relations du modèle. Rappelons que dans ce cas, les éléments des deux matrices sont constants. Selon cette équation, la variation d'un facteur (par exemple le stress) s'écrit en fonction des autres facteurs de la manière suivante :

$$\frac{d}{dt}d_i(t) = r_{ii}d_i(t) + \sum_{l=1, l\neq i}^{n} r_{li}d_l(t) + \sum_{h=1}^{q} s_{hi}e_h(t) \tag{3.6}$$

Avec :

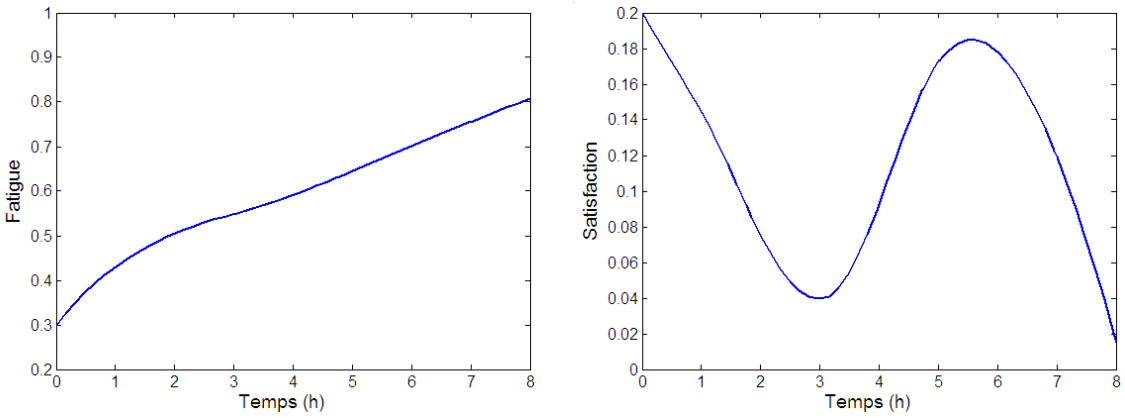
- $d_i(t)$ est le degré du i^{eme} facteur comportemental à l'instant t ;
- r_{li} est le degré de la relation (ou le degré d'influence) qui existe entre l^{eme} et i^{eme} facteur comportemental.
- n est le nombre de facteurs constituant le graphe ($n = 7$ pour l'exemple de la figure 3.4) ;
- s_{ki} est le degré de la relation entre le k^{eme} élément d'entrée et le i^{eme} élément comportemental.
- r_{ii} représente l'influence de l'état actuel de l'i^{eme} facteur sur sa future variation.

Soulignant ainsi la dépendance de la variation de chaque élément d_i, d'une part de son état actuel, et d'autre part des autres éléments (comportementaux et externes) (Elkosantini et Gien, 2006)

En effet, cette équation 3.6 illustre bien l'impact de la variation d'un ou plusieurs facteurs psychologiques sur l'évolution d'autres éléments. Les courbes de la figure 3.9 sont les résultats de la simulation de l'évolution de la fatigue et de la satisfaction du modèle de comportement présenté dans la figure 3.4 et en se basant sur le modèle mathématique (3.6) détaillé ci-dessus. Les conditions initiales et le scénario simulées qui nous ont permis d'avoir ces résultats sont présentées dans le paragraphe 3.2.3.

La figure 3.9.a montre, par exemple, que le niveau de la fatigue chez l'opérateur n'est pas stable et atteint un niveau élevé (modélisé par le degré 0.8). Quant à la satisfaction (figure 3.9.b), elle varie dans le temps sans atteindre un niveau élevé. La conclusion qui peut être tirée est que les responsables doivent entreprendre des actions de pilotage afin d'assurer un comportement

des opérateurs plus stable, notamment en veillant à l'amélioration de la qualité de vie au sein de l'entreprise. Ils peuvent, par exemple, proposer des formations, des réunions de travail ou de sensibilisation en impliquant l'ensemble des employés.



-a- -b-

FIG. 3.9 – Évolution de la fatigue et de la satisfaction.

Le but du modèle proposé est de fournir une description qui dépasse le niveau de la fonction et permet de comprendre un phénomène lié au comportement humain. Comme en physique qualitative, l'enjeu de ce travail est de disposer de modèles simplifiés, permettant d'expliquer et de comprendre les résultats régissant le comportement. Aussi, la manipulation de valeurs numériques précises ne constitue pas une des préoccupations majeurs de ce travail. Nous préférons, lors de la phase expérimentale, un modèle facilement exploitable et interprétable à un modèle précis mais complexe.

3.2.2 Le passage à la simulation : Exemple

Nous partons d'un exemple de graphe de comportement composé de quelques éléments psychologiques pour tester l'applicabilité du modèle proposé. Nous le simulons en utilisant des logiciels adaptés issus de deux domaines : l'automatique (Matlab[7]) et la dynamique des systèmes (Vensim[8] PLE) (Karsky, 1995; Karsky *et al.*, 1996). Nous ne détaillons pas dans ce paragraphe la procédure de construction et de validation du graphe (*Cf.* chapitre 5), mais expliquons et étudions le passage à la simulation de l'exemple du graphe de la figure 5. Un scénario de simulation est aussi présenté dans ce paragraphe ainsi que les résultats obtenus.

Dans l'exemple de la figure 3.4, la boucle $B1$ est une boucle explosive ou positive. Une légère variation d'un élément aura un effet exponentiel sur les autres. L'augmentation du stress chez un opérateur, traduisant par exemple son sentiment que la tâche excède ses capacités, diminue le sentiment d'auto-efficacité et donc la confiance en soi. Selon Bandura (Bandura, 1985) et Schunk

[7]Mathwork : http ://www.mathworks.com/
[8]Ventana : http ://www.vensim.com/

(Schunk, 1991), la *rétroaction physiologique*, exprimé par l'accélération du rythme cardiaque et la bouche sèche (des syndromes du stress), peut faire décroître le sentiment d'auto-efficacité. Ceci peut entraîner à son tour des effets directs sur le stress créant ainsi une boucle à comportement explosif. Pour remédier à ce problème, les responsables doivent mettre en place une (ou des) action(s) de correction C, telle qu'une formation, afin d'améliorer la confiance et l'estime de soi. La relation entre le stress et l'action est considérée comme positive puisque plus le stress augmente plus il faut intensifier la formation qui améliore la confiance en soi (figure 3.10).

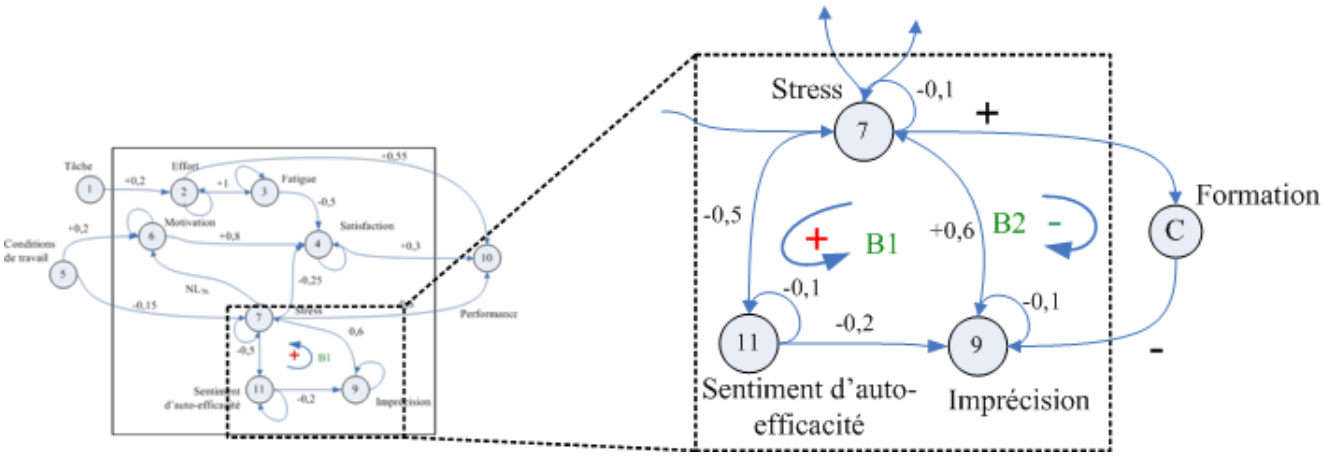


FIG. 3.10 – Boucle explosive et boucle de correction.

La mise en place d'une action de correction - appelée aussi action de pilotage - sert à atténuer la gravité de certains problèmes. Elle crée ainsi une deuxième boucle qui va stabiliser une autre. Cette action peut être, par exemple, une formation pour les opérateurs, une réorganisation des tâches, une meilleure coordination entre les services, des réunions de sensibilisation, une surveillance accrue des employés ou même l'intervention des responsables.

Ce modèle comportemental peut être utilisé pour tester l'effet d'un ensemble d'actions que les décideurs pourront mettre en place. Cependant, il est peu évident d'intégrer dans ce modèle les problèmes externes à l'entreprise, comme les problèmes familiaux, puisqu'il s'agit d'événements incontrôlables et imprévisibles. Ce modèle se limite à l'interaction entre l'opérateur et la tâche dans un environnement de travail assez réduit.

Dans ce cas d'étude, le nœud ajouté crée une boucle stabilisatrice (ou négative) B_2 qui tend à stabiliser la première boucle B_1 (figure 3.10). Par conséquent, pour une action suffisamment efficace, le comportement tend à se stabiliser après un certain temps. La mise en place d'une formation ou d'un séminaire, par exemple, permettra l'amélioration de la manière de travailler et ainsi la diminution de l'imprécision dans le travail.

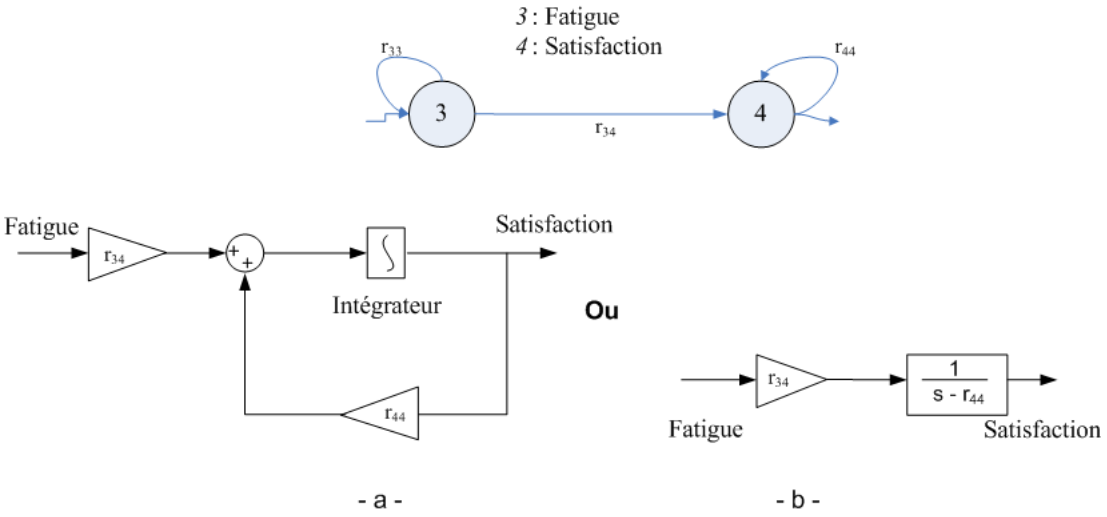


FIG. 3.11 – Simulation avec Simulink.

3.2.2.1 Simulation avec Simulink

Le premier outil de simulation qui peut être utilisé est Simulink de Matlab. La simulation du graphe de comportement, en se basant sur le modèle mathématique, utilise les blocs de Simulink (Cf. figures 3.11.a et 3.11.b). Dans la figure 3.11.a, le passage à la simulation avec Simulink utilise les blocks "intégrateur" alors que dans la figure 3.11.b, chaque nœud est remplacé par une fonction de transfert continue. Nous utilisons sous simulink le bloc "continuous transfer function" et le degré de la relation est présenté par un gain (positif ou négatif).

La non-linéarité des relations peut être simulée avec Simulink en utilisant les blocs "Look-up" ou "Fcn". Par exemple, la figure 13 représente la simulation de la relation entre la motivation et le stress de la figure 3.4.

La figure 3.13.a est une partie du modèle final de Simulink. Cette portion de modèle traduit les boucles B_1 et B_2 du graphe de la figure 3.10 tout en reprenant les équations (3.1) et (3.6).

3.2.2.2 Simulation avec Vensim

La même partie du graphe est traduite en diagramme flux-stock (figure 3.13.b) et nous retrouvons aussi les deux boucles $B1$ et $B2$. Les concepts et les variables de bases utilisés dans ce type de diagramme sont introduits dans le paragraphe 2.3.3.3 du chapitre 2. Dans notre étude, les variables de niveau du comportement sont les éléments psychologiques, c'est-à-dire les nœuds du graphe, et les événements de perturbation ou les actions de pilotage sont représentés comme des variables auxiliaires ou des constantes.

La simulation avec ces deux outils donne, bien évidemment, les mêmes résultats puisqu'ils sont basés sur le même modèle mathématique. En revanche, les méthodes d'analyse numérique

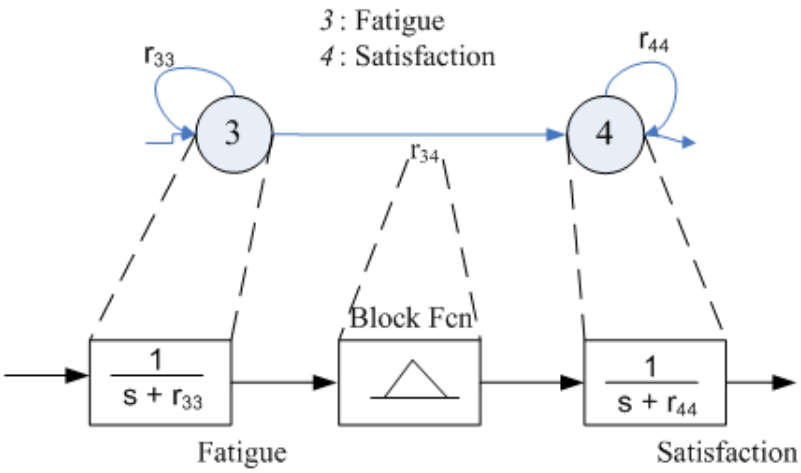


FIG. 3.12 – Simulation de la non-linéarité avec Simulink.

d'approximation de solutions d'équations différentielles diffèrent. Pour matlab, plusieurs méthodes sont proposées et c'est la méthode ODE45 que nous utilisons, laquelle utilise l'algorithme Runge-Kutta d'ordre 4. Elle utilise un pas de discrétisation variable et choisit à chaque instant le pas de temps le plus convenable de façon à satisfaire une tolérance fixée. Pour ce qui est de Vensim, la méthode de calcul d'Euler y est utilisée par défaut.

Nous avons choisi d'utiliser Matlab comme simulateur notamment en raison de sa puissance dans la simulation. En outre, il intègre des boites à outils (toolbox) de logique floue et d'optimisation qui nous seront utile plus tard.

3.2.3 Scénario de test

Le scénario de simulation qui a été appliqué sur le graphe de la figure 3.4 est le suivant :

À $t = 0$: condition initiale : Fatigue = 0.3 ; Effort = 0.2 ; Condition de travail = 0.3 ; Motivation = 0.2 ; Sentiment d'auto-efficacité= 0.5 ; imprécision= 0.2 ; Stress = 0.2.

À $t = 3h$: Suite à un changement de série, la nouvelle tâche demande plus de capacité physique et le niveau de difficulté de la tâche augmente de 20%. En parallèle, les conditions de travail chutent de 30%. L'opérateur ne se sent plus en sécurité avec le nouvel environnement (machine moins sécurisée et donc risque de blessure plus élevé).

À $t = 4.5h$: Suite à ces problèmes, l'opérateur ne se sent plus à l'aise avec sa nouvelle tâche ce qui augmente l'imprécision d'une manière conséquente (augmentation de 40%).

À $t = 5h$: Après l'intervention du service de maintenance pour sécuriser les machines, l'opérateur se sent plus en sécurité ce qui améliore son sentiment d'auto-efficacité de 30%.

Les valeurs et les hypothèses considérées dans ce scénario ne sont que des exemples qui ne sont pas issus d'une expérience. Elles sont utilisées dans ce paragraphe pour construire un exemple

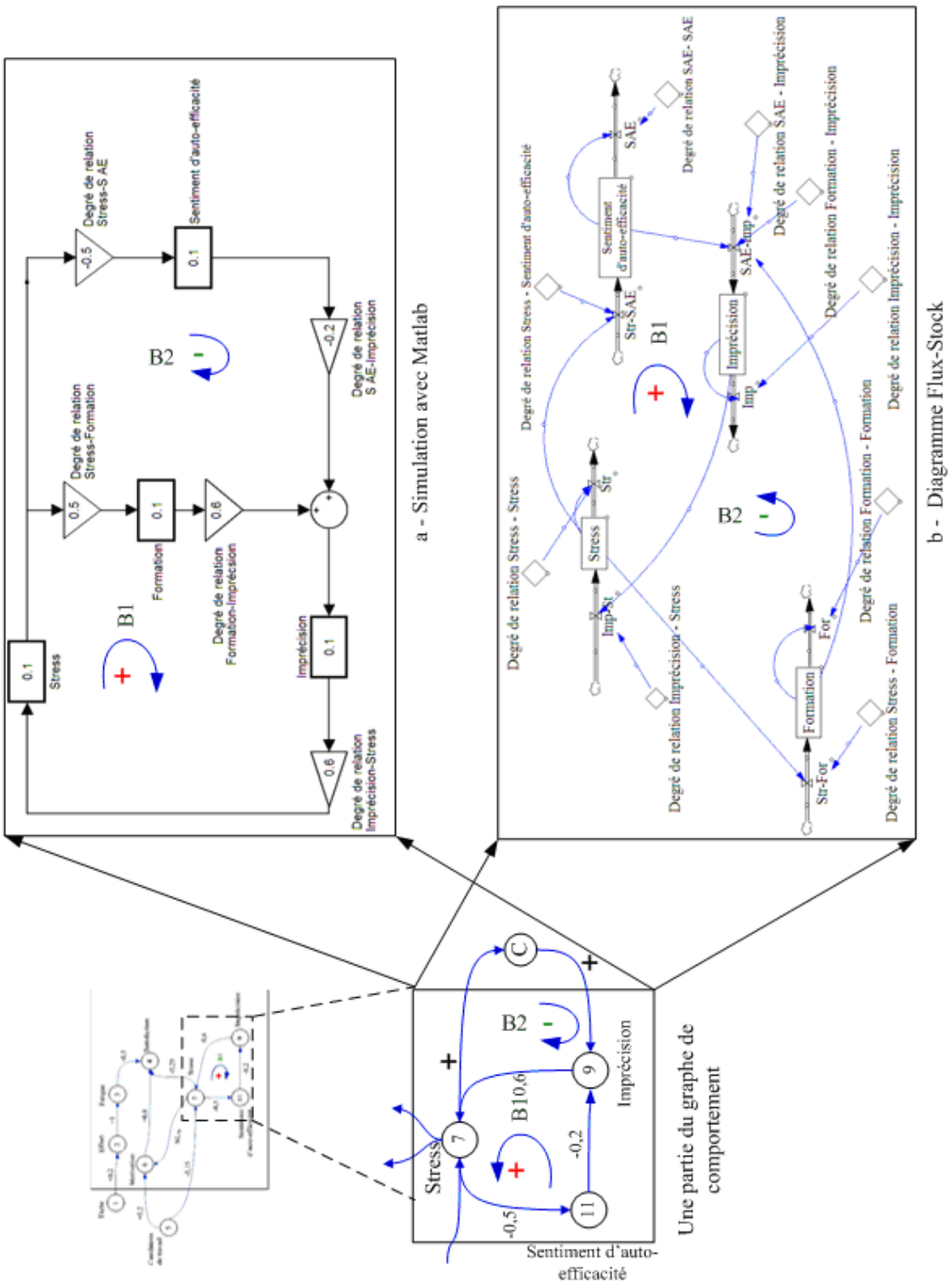


FIG. 3.13 – Simulation avec Simulink et Vensim.

de modèle de comportement qui est analysé dans le paragraphe suivant. Le scénario ci-dessus est appliqué dans la simulation pour analyser l'exemple de la figure 3.4 et tester l'applicabilité du modèle. Évidement, cette étape ne valide pas l'approche puisqu'elle nécessite une série d'expériences et le passage par une phase d'identification des paramètres du modèle qu'il faut confronter aux conditions réelles. Les résultats de la simulation sont analysés et commentés dans le paragraphe ci-après.

3.2.4 Analyse de l'exemple et résultats de la simulation

Dans ce paragraphe, nous détaillons et analysons les résultats de la simulation d'une journée de travail (1 journée = 8h), obtenus en simulant le comportement de la figure 3.4 et en se basant sur le modèle mathématique (3.6) détaillé précédemment. Les conditions initiales et le scénario simulées qui nous ont permis d'avoir ces résultats sont présentées dans le paragraphe 3.2.3. Comme nous l'avons souligné, ces résultats sont obtenus en utilisant l'un ou l'autre des outils de simulation Simulink et Vensim.

Les courbes de la figure 3.14 sont les résultats de la simulation du graphe de comportement de la figure 3.4. D'après cet exemple, la motivation continue à augmenter dans la première partie de la journée ($t = 0h$ et $t = 4h$) malgré la légère augmentation du stress ($t = 0h$ et $t = 1h$) qui ne dépasse pas le niveau 0.3. La relation entre ces deux facteurs est alors positive. Rappelons qu'un degré 0 correspond à une faible valeur alors que 1 représente un degré très élevé.

Lorsque le stress atteint les 30%, la relation change de signe et devient négative. La motivation commence à décroître d'une manière "inquiétante" à partir t = 6.5h, puisque le stress de l'opérateur continue à augmenter.

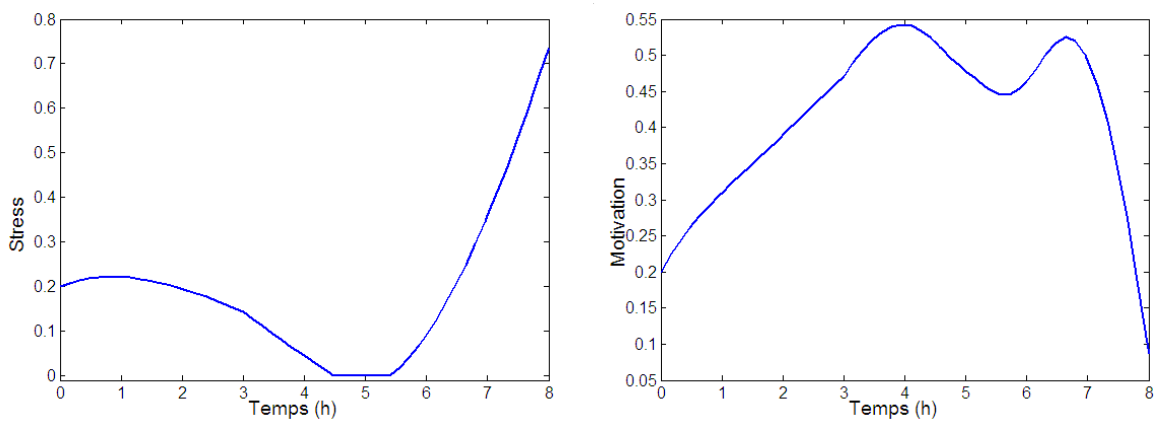


FIG. 3.14 – La non-linéarité entre le stress et la motivation.

Il faut noter également que la variation des degrés de relation inter-éléments psychologiques modifiera le comportement et peut alors mener à l'amélioration à la fois du rendement de l'opérateur et de la qualité des services et des produits.

Concernant la boucle $B1$ de la figure 3.10, l'action C mise en place joue un rôle très important pour stabiliser le comportement des opérateurs. En effet, les courbes de la figure 3.15 montrent que, sans cette action de correction, le comportement serait fortement perturbé. L'imprécision et le stress continuent à augmenter sans cesse et atteignent des niveaux très élevés exprimés par des valeurs proches de 1. De son côté, le sentiment d'auto-efficacité, initialement de niveau moyen, diminue et atteint un niveau critique, lequel exprime un manque de confiance en soi. Malgré l'augmentation du sentiment d'auto-efficacité à $t = 6h$ qui est due à un évènement externe simulé dans le scénario, l'opérateur reperd de confiance en lui à nouveau. Ce manque de stabilité dans le comportement peut influencer les autres opérateurs de la même équipe et diminuer ainsi le rendement global, d'où l'importance de l'intervention des responsables pour améliorer l'ambiance de travail.

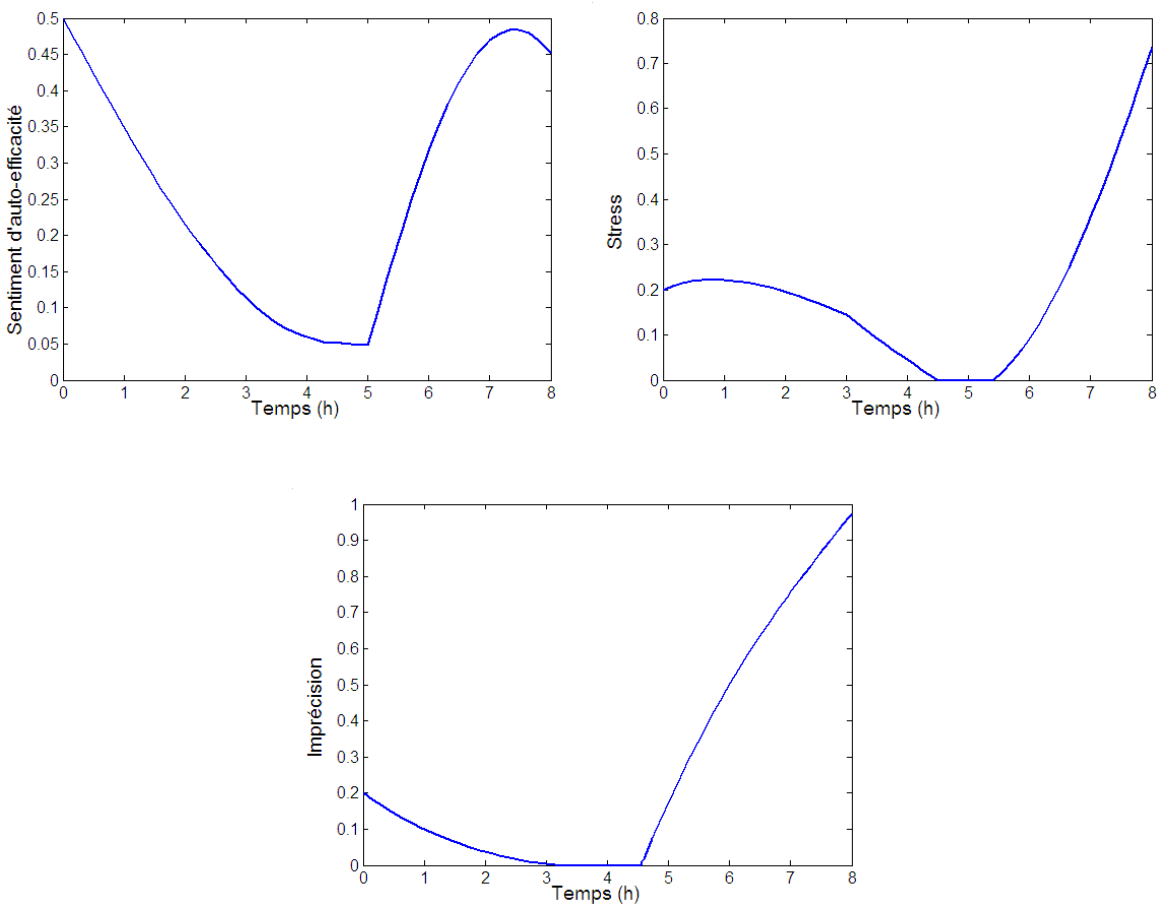


FIG. 3.15 – Évolution du comportement sans l'action C.

Pour remédier à ce problème, les responsables doivent agir en prenant un certain nombre d'initiatives : telles que l'organisation de formations ou de réunions avec les opérateurs. Ce type d'initiatives est considéré comme action de correction C (Cf. figure 3.10). Les courbes de

sentiment d'auto-efficacité, d'imprécision et de stress de la figure 3.16 illustrent l'effet de cette action. En effet, malgré les perturbations à $t = 1h$, $2h$ et $3h$, l'opérateur arrive à se stabiliser malgré la diminution du sentiment d'auto-efficacité et l'augmentation du stress au début de la journée. Dans la deuxième partie de la journée ($t > 4h$), l'opérateur deviennent plus productifs, avec un taux d'imprécision très faible (valeur 0), et avec plus de confiance en soi.

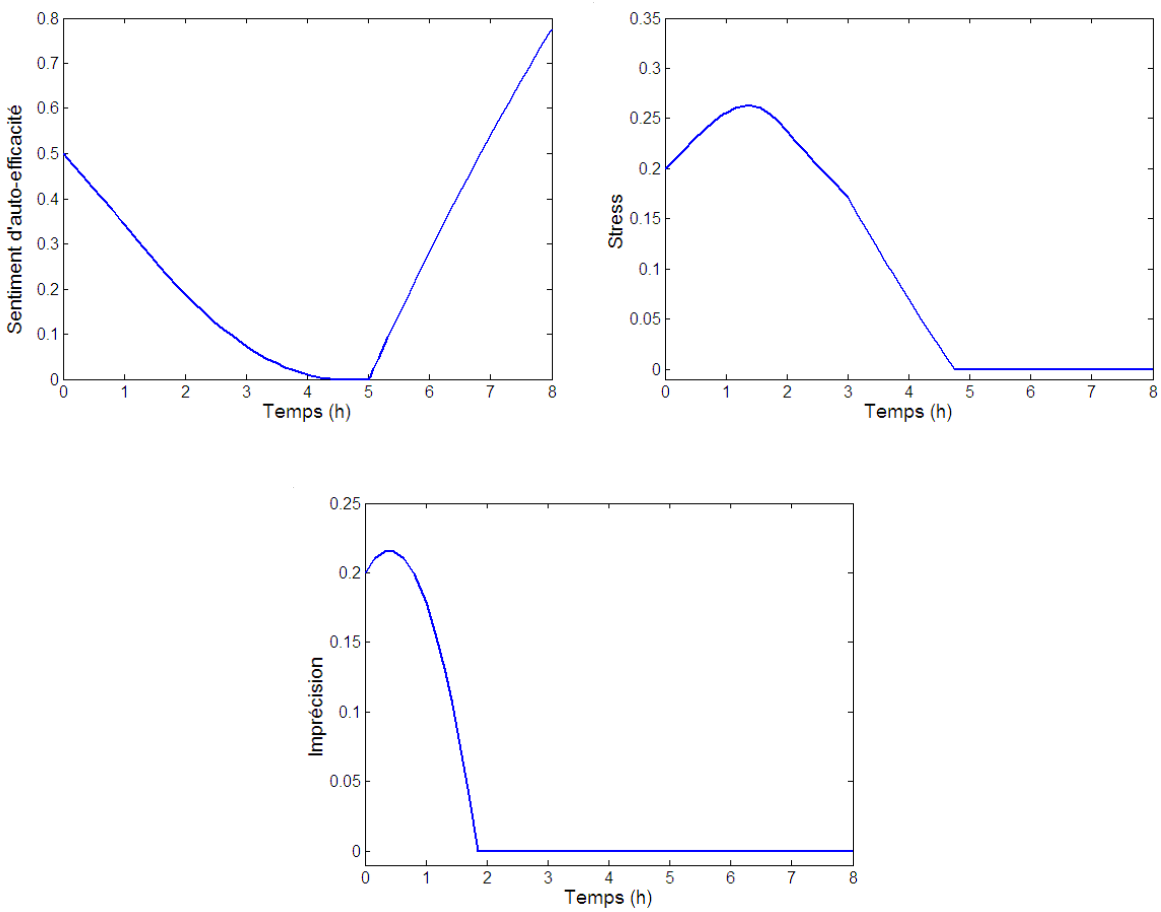


FIG. 3.16 – Évolution du comportement avec l'action C.

3.3 Comportement du groupe

La méthodologie présentée dans la première partie de ce chapitre est limitée à quelques aspects psychologiques individuels et ne prend pas en compte les relations inter-individus, en d'autres termes l'analyse des réseaux sociaux. Nous proposons de compléter la première partie de l'approche, que l'on peut qualifier de *microscopique*, par une analyse *macroscopique* plus globale. Ainsi, il est judicieux d'intégrer dans le modèle des relations inter-opérateurs en le complétant par une approche psychosociale qui est souvent utilisée pour étudier la dynamique des groupes d'individus (Sonnemans *et al.*, 2006). Cette deuxième partie traite la modélisation et l'analyse

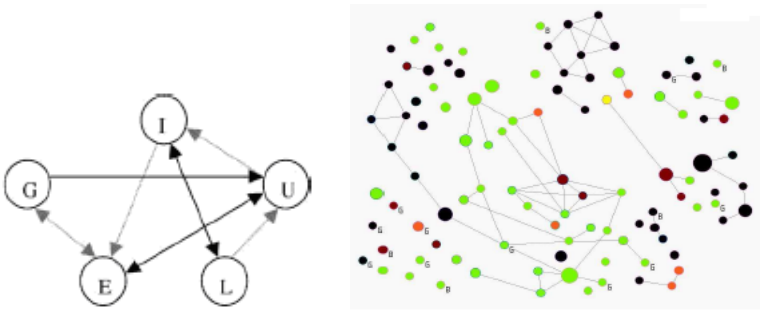
d'informations concernant l'état de rapports interpersonnels, psychosociaux et subjectifs dans le groupe.

Ce modèle de comportement peut être implémenté dans un outil de simulation basé sur un système multi-agent dans lequelle les agents simulent des individus ou des opérateurs, lesquelles collaborent pour accomplir une tâche ou une action. Le comportement individuel de chacun est défini dans le paragraphe précédent alors que les relations sociales et le comportement inter-agent est défini dans les paragraphes suivant.

3.3.1 Description formelle

3.3.1.1 Modèle comportemental étendu

La modélisation traditionnelle d'un réseau social, appelé par Moreno (Moreno, 1933; Moreno, 1934) le sociogramme, est un graphe composé de nœuds et de relations appelées aussi liens ou arcs. Dans le contexte des réseaux sociaux, les nœuds symbolisent des personnes ou des ensembles humains (groupe d'opérateurs, organisations, etc.). Quant aux liens, ils représentent les relations psychosociaux et sont caractérisés par leur "contenu" qui peut être par exemple le conflit, la communication, l'amitié, etc. Le sociogramme est dit multiplex si les relations ont plusieurs contenus et il est uniplex dans le cas d'un seul contenu. Les arcs peuvent être orientés (figure 18.a), exprimant le sens de la relation, ou pas (figure 18.b). Ils peuvent aussi être symétriques exprimant la présence d'une relation bidirectionnelle.



-a- -b-

FIG. 3.17 – (a) Sociogramme orienté (Yang et Tang, 2004) et (b) Sociogramme non orienté (Gonzaléz *et al.*, 2007).

Nous allons nous inspirer du sociogramme pour intégrer l'analyse des réseaux sociaux dans l'approche proposée. Formellement, le graphe de comportement d'un groupe est construit en étendant le graphe de comportement individuel, défini dans le paragraphe 3.2.1.3, en ajoutant les nœuds symbolisant les relations interpersonnelles. Les arcs des sociogrammes sont remplacés par des nœuds connectés aux autres nœuds symbolisant les facteurs psychologiques individuels (figure 3.18). Ce type de graphe, permet d'avoir une vue plus détaillée sur les relations entre

les individus. En effet, elles ne sont plus considérées comme de simples liens entre deux nœuds (symbolisant les opérateurs), mais plutôt comme des connexions qui lient directement les aspects comportementaux de chacun.

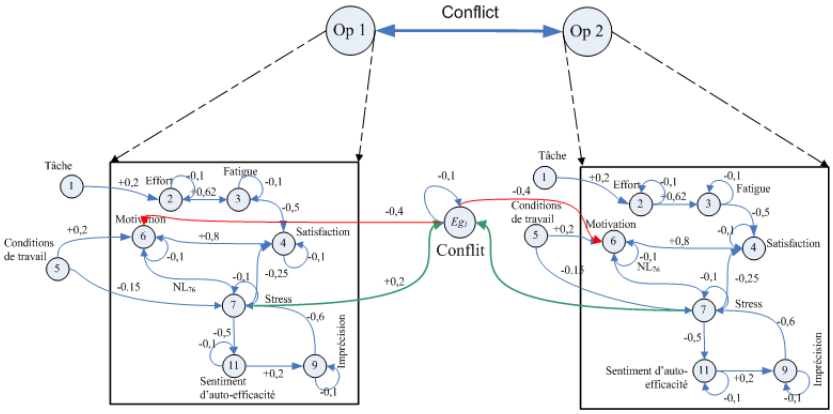


FIG. 3.18 – Graphe de comportement d'un groupe.

Notons $Eg = \{Eg_k\}_{k=1..p}$ l'ensemble de ces p relations sociales ou interpersonnelles. Dans l'exemple précédent (figure 19), Eg1 est le conflit entre les deux opérateurs Op1 et Op2. Chaque élément psychosocial Eg_k est caractérisé par son degré $g_k(t)$ qui varie dans le temps. De la même manière, nous définissons $\mathbf{g}(t) = [g_k(t)]_{k=1..p}$ le vecteur de ces degrés qui peuvent être positifs ou négatifs. En valeurs absolues $|g_k(t)|$, ces degrés peuvent avoir des valeurs linguistiques prises de l'ensemble M = {Très faible, Faible, Modéré, Fort, Très fort} qui sont traduites, dans une première partie, en valeurs numériques appartenant à l'intervalle [0..1].

Ce nouveau graphe, noté G_g, est défini par le multiplet(voir figure 20) :

$$< \{E^j\}^{j=1..m}, E_g, \{A^j\}^{j=1..m}, \{\mathbf{R}^j\}^{j=1..m}, A, \{\mathbf{Ts}^j\}^{j=1..m}, \{\mathbf{T}^j\}^{j=1..m}, \mathbf{Tp}, \{\mathbf{S}^j\}^{j=1..m}, \mathbf{Se} >$$

Où :

- $\{E^j\}^{j=1..m}$ est l'ensemble des facteurs psychologiques de tous les opérateurs qui constituent le modèle global et $E^j = \{E_i^j\}_{i=1..m}$ est l'ensemble des facteurs psychologique du j^{eme} opérateurs. m est le nombre d'opérateurs dans l'équipe.
- $Eg = Eg_{k k=1..p}$ est l'ensemble des relations interpersonnelles.
- $\{A^j\}^{j=1..m}$ est l'ensemble des arcs qui lient les facteurs psychologiques de chaque opérateurs. Ainsi, A^j est l'ensemble des arcs du modèle de comportement du j^{eme} opérateurs.
- $\{\mathbf{R}^j\}^{j=1..m}$ est l'ensemble des matrices avec $\mathbf{R}^j = [r_{il}^j]_{i,l=1..n}$ est la matrice décrivant les relations entre les facteurs associé au j^{eme} opérateurs.
- A est l'ensemble des arcs qui constitue le graphe.
- $\{\mathbf{Ts}^j\}^{j=1..m}$ est l'ensemble des matrices $\mathbf{Ts}^j = [ts_{ik}^j]_{i=1..n,k=1..p}$ où ts_{ik}^j est l'effet du i^{eme}

facteur psychologique associé au j^{eme} opérateur sur le k^{eme} facteur psychosociaux (relation sociale)

- $\{\mathbf{T}^j\}^{j=1..m}$ est l'ensemble des matrices $\mathbf{T}^j = [t^j_{ki}]_{k=1..p,i=1..n}$ où t^j_{ki} est l'effet du le k^{eme} facteur psychosocial sur le i^{eme} facteur psychologique associé au j^{eme} opérateur.
- $\mathbf{Tp} = [tp_{hk}]_{h,k=1..p}$ où $tp_{h,k}$ est la relation entre le h^{eme} et le k^{eme} facteur psychosocial (relation sociale).
- $\{\mathbf{S}^j\}^{j=1..m}$ est l'ensemble des matrices $\mathbf{S}^j = [s^j_{hi}]_{i=1..n,h=1..q}$ où chaque élément s^j_{hi} est le degré de la relation entre h^{eme} évènement (de perturbation ou d'encouragement) et le i^{eme} facteur comportemental du j^{eme} opérateur (voir paragraphe 3.3.1.2).
- $\mathbf{Se} = [se_{kh}]_{k=1..p,h=1..q}$ où se_{kh} est l'influence du k^{eme} évènement (de perturbation ou d'encouragement) et le k^{eme} facteur psychosocial.

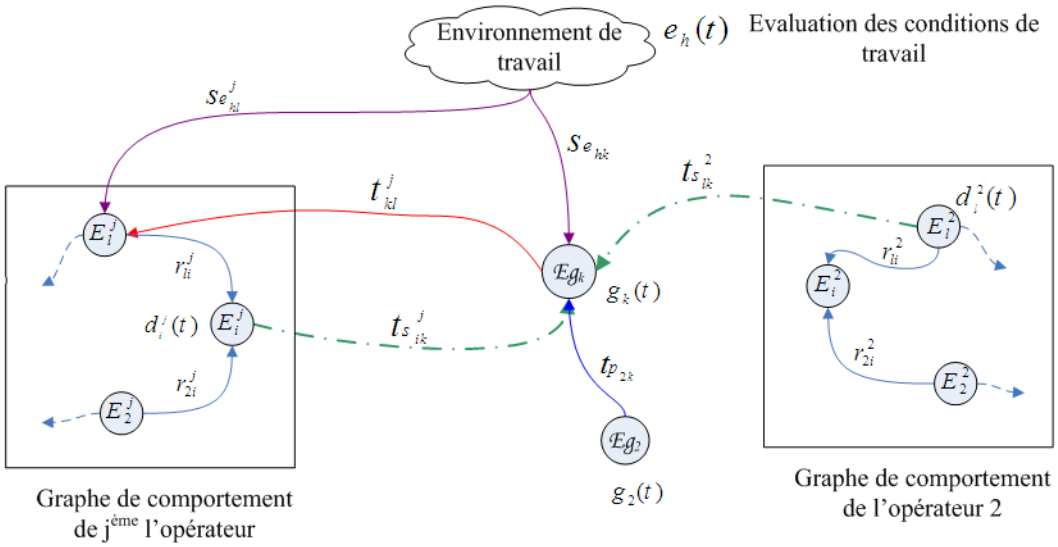


FIG. 3.19 – Quelques variables du modèle.

3.3.1.2 Le modèle mathématique

Similairement aux éléments comportementaux, l'évolution des facteurs interpersonnels est aussi modélisée par l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d}{dt}g_k(t) = tp_{kk} \times g_k(t) + \sum_{l=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} ts^j_{ik} \times d^j_i(t) + \sum_{x=1,x\neq k}^{p} tp_{xk} \times g_x(t) + \sum_{h=1}^{q} se_{hk} \times e_h(t) \quad (3.7)$$

Ce qui donne sous forme matricielle :

$$\frac{d}{dt}\mathbf{g}(t) = \mathbf{Tp}(\mathbf{g}(t)) + \sum_{j=1}^{m} \mathbf{Ts}^j(\mathbf{d}^j(t)) + \mathbf{Se}(\mathbf{e}(t)) \quad (3.8)$$

Avec $\mathbf{d}^j(t)$ est le vecteur des niveaux des facteurs psychologiques du j^{eme} opérateur.

Cette équation tient compte de la dépendance qui peut exister entre le degré $g_k(t)$ de l'élément Eg_k, des facteurs individuels (exprimé par le terme $\sum_{l=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} ts_{ik}^j \times d_i^j(t)$) et des facteurs inter-personnes (le terme $\sum_{x=1,x\neq k}^{p} tp_{xk} \times g_x(t)$). Cependant, les équations (3.1), (3.5) et (3.6), associées au comportement individuel, ne tiennent pas compte de cette dépendance et deviennent donc :

$$\frac{d}{dt}\mathbf{d}^j(t) = R^j(\mathbf{d}^j, t) + S^j(\mathbf{e}(t)) + T^j(\mathbf{g}, t) \tag{3.9}$$

Avec $d^j(t)$, R^j et S^j les vecteurs et les matrices définis précédemment et associés au j^{eme} opérateur. Si toutes les relations sont considérées comme linéaires et stationnaires, alors l'équation précédente devient :

$$\frac{d}{dt}d_i^j(t) = r_{ii}^j \times d_i^j(t) + \sum_{l=1,l\neq i}^{n} r_{li}^j \times d_l^j(t) + \sum_{h=1}^{q} s_{hi}^j \times e_h(t) + \sum_{k=1}^{m} t_{ki}^j \times g_k(t) \tag{3.10}$$

3.3.2 Analyse d'un exemple

Prenons l'exemple d'un petit groupe formé par 3 employés Op1, Op2 et Op3 qui collaborent pour effectuer une tâche en commun. La figure 3.20 illustre les liens de conflit et de communication entre eux, l'épaisseur de chaque arc représentant son degré. Ainsi, l'épaisseur de l'arc Eg_1 entre Op1 et Op2 traduit un fort conflit entre eux qui devra être résolu par les responsables de l'entreprise afin d'assurer une meilleure ambiance de travail et donc une meilleure efficience de leurs employés. Ce conflit peut également expliquer la faible communication entre eux. Contrairement à Eg_1, la relation Eg_2 est faible exprimant l'absence de discordance entre Op1 et Op3. Enfin, ce type de graphe permet la détection d'individus socialement isolés et la création de groupes cohérents et homogènes.

Pour avoir une meilleure visibilité de relations étudiées entre les opérateurs Op1, Op2 et Op3, à savoir le conflit et la communication, le graphe de la figure 3.21 détaille celui de la figure 3.20 en se basant sur le modèle comportemental étendu. Ainsi, chaque arc est remplacé par un nœud et l'épaisseur est remplacée par une valeur numérique $g_k(t)$. Ce graphe illustre l'effet de quelques facteurs comportementaux, comme le stress et la stabilité, sur les relations inter-opérateurs. Dans ce graphe, les boucles de rétroaction au niveau de chaque nœud ont été supprimées par souci de lisibilité du graphe. Cependant, elles sont prises en compte dans le modèle mathématique.

Dans cet exemple, la variation du degré du conflit entre Op1 et Op2 $g_1(t)$ dépend du stress (nœud 7) des deux opérateurs et il est influé aussi par le niveau de la communication $g_4(t)$. D'après l'équation (3.8), cette variation est calculée par :

$$\frac{d}{dt}g_1(t) = [0.2 \times d_7^1(t) + 0.2 \times d_7^2(t)] + t_{1,1}^0 \times g_1(t) + 0.4 \times g_4(t) \tag{3.11}$$

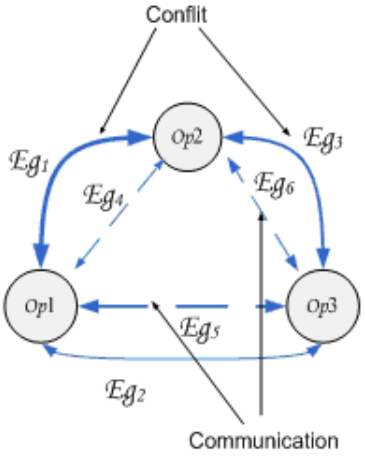


FIG. 3.20 – Groupe de 3 opérateurs.

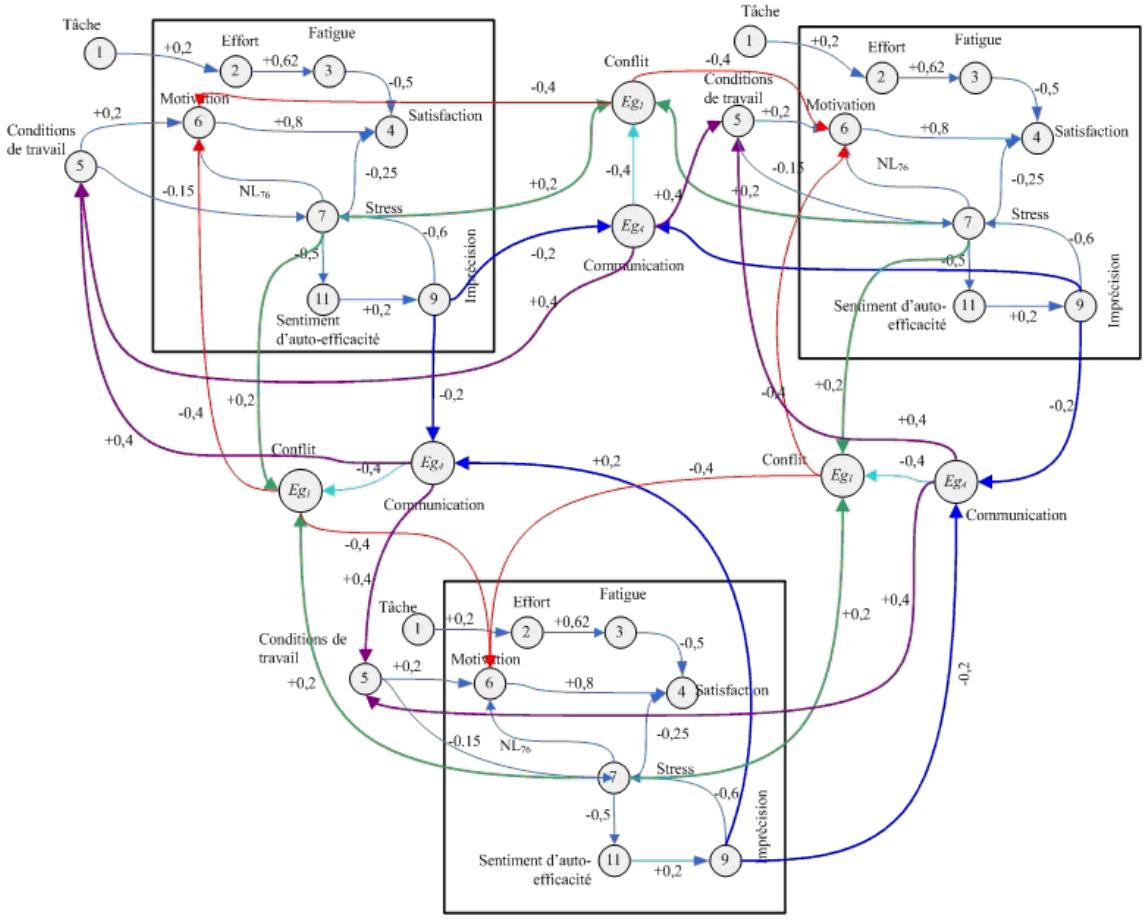
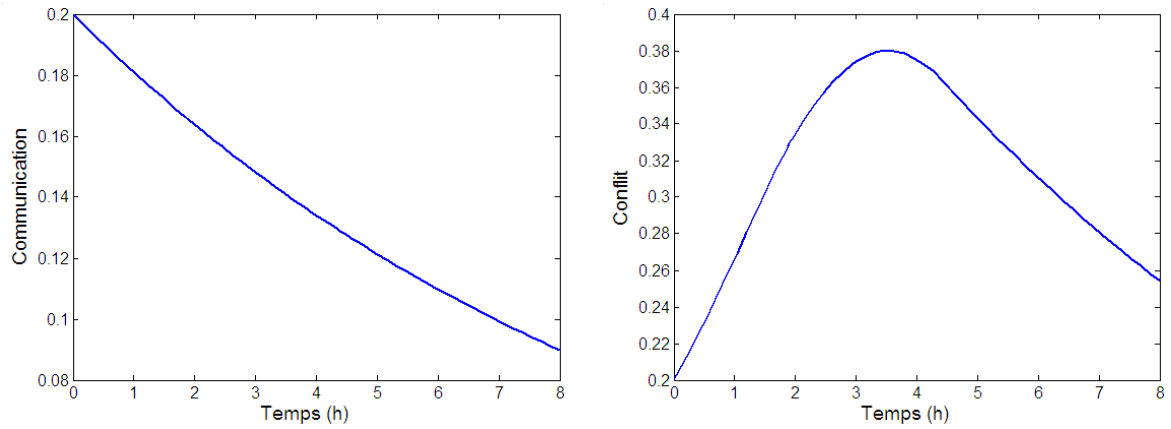


FIG. 3.21 – Graphe de comportement d'un groupe formé par Op1, Op2 et Op3.

Ce graphe montre que l'instabilité comportementale des personnes risque d'aggraver les relations et donc de créer une ambiance tendue qui ne facilitera pas l'accomplissement des tâches collectives. Par conséquent, les responsables doivent agir en proposant des actions de pilotages appropriées afin de surmonter ce type de difficultés. Ils peuvent, par exemple, reformer le groupe en remplaçant les personnes qui semblent isolées. Ils peuvent ensuite tester l'impact d'une telle décision sur le comportement en utilisant ce modèle comme un outil d'aide à la décision et y en ajoutant un nœud symbolisant l'action (*Cf.* paragraphe 3.2.2).

Cet exemple est simulé avec Simulink (*Cf.* paragraphe 3.2.2.1) en se basant sur le scénario présenté dans le paragraphe 3.2.3. En outre, l'action C, installée au niveau de chaque graphe individuel pour atténuer l'effet de la boucle explosive B1 (*Cf.* paragraphe 3.2.2), a été prise en considération. Les résultats obtenus montrent que, malgré la décision prise et simulée dans le paragraphe 3.2.4, la communication entre Op1 et Op2 reste faible (figure 3.22.a), alors que le conflit entre les deux opérateurs se rétablit dans la deuxième moitié de la journée (figure 3.22.b). Ainsi, de tels résultats sont très pertinents et importants pour les manageurs, dans la mesure où ils permettent à ces derniers de nourrir leur réflexion dans le processus de prise de décision. Dans cet exemple, pour améliorer la performance ainsi que l'état psychologique des opérateurs, les décideurs ne sont pas obligés de réorganiser l'équipe de travail, concerné par cette étude, puisque le niveau de conflit n'est pas préoccupant. Cependant, ils peuvent proposer des séminaires ou des réunions afin d'améliorer de façon significative la communication et l'échange d'information.



-a- -b-

FIG. 3.22 – Evolution de communication (a) et du conflit (b) entre Op1 et Op2.

3.4 Conclusion

Ce chapitre présente une approche de modélisation du comportement des opérateurs à deux niveaux :

1. psychologique : permettant de décrire et de reproduire le comportement individuel de chaque opérateur en considérant quelques facteurs psychologiques ;
2. Psychosociaux : permettant de considérer, en plus des facteurs psychologiques, les relations inter-opérateurs comme le conflit, la communication ou l'amitié.

Le modèle mathématique présenté décrit l'évolution des différents éléments comportementaux considérés par des équations différentielles ordinaires. Ainsi, les variables sont considérées comme numériques et donc n'intègrent pas les informations vagues et floues que peut fournir la quantification de certains aspects psychologiques et psychosociaux. Dans ce cadre, le chapitre suivant propose une amélioration de l'approche proposée pour intégrer des informations subjectives.

Chapitre 4

Modèle de comportement flou

Sommaire

4.1 Introduction 74

4.2 Description floue du comportement individuel 74

4.2.1 Introduction 74

4.2.2 Les sous-ensembles flous 75

4.2.3 Modèle flou 76

4.2.4 Équation différentielle floue 78

4.2.5 Méthode de simulation et résultats 81

4.2.5.1 Méthode de simulation 81

4.2.5.2 Amélioration de la méthode 83

4.2.6 Exemple illustratif 86

4.3 Description floue du comportement d'un groupe 91

4.3.1 Les règles floues 91

4.3.2 Méthodes d'inférence et de raisonnement 94

4.3.2.1 Méthode de Mamdani 96

4.3.2.2 Méthode de Larsen 97

4.3.2.3 Méthode de Takagi-Sugeno 98

4.3.2.4 Implémentation du système proposé 99

4.4 Exemple et résultats 101

4.5 Conclusion 104

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, une approche de modélisation du comportement des opérateurs a été présentée. Elle se base sur les diagrammes de flux, en s'inspirant de la dynamique des systèmes, et sur un modèle mathématique utilisant des équations différentielles (équation 3.1)...(équation 3.6). Dans le Chapitre 3, le passage à la simulation d'un tel modèle, par Simulink et Vensim, a été également présenté (paragraphe 3.3). Dans ce chapitre, nous introduisons dans le modèle l'incertitude de certaines variables en utilisant des équations différentielles avec variables floues puis nous exposons quelques méthodes de résolution.

4.2 Description floue du comportement individuel

4.2.1 Introduction

Les variables du modèle comportemental (degrés $d_i(t)$ des facteurs psychologiques) sont considérées comme des variables numériques. Cela signifie que toutes les variables linguistiques du modèle sont traduites en nombres réels compris dans l'intervalle [0..1]. Cette approche traditionnelle n'exprime pas la réelle imprécision exprimée par de telles variables qualitatives. L'état des individus ne peut pas être décrit par des valeurs précises en négligeant l'imprécision et l'incertitude qui existe dans certains facteurs comportementaux et environnementaux.

Pour résoudre ce problème, une première proposition consiste à caractériser chaque degré $d_i(t)$ par un intervalle $[d_i^{min}, d_i^{Max}]$. Ainsi, le degré de l'élément E_i est supérieur à d_i^{min} et inférieur à d_i^{Max} sans que sa valeur précise ne soit connue. Cette approche est caractérisée par sa simplicité et la facilité à appliquer les opérations arithmétiques. Cependant, elle reste trop limitée pour représenter des aspects psychologiques ou psychosociaux avec réalisme. Ce type de représentation ne différencie pas les valeurs du même intervalle qui sont toutes considérées comme équivalentes sans qu'une préférence ne puisse être marquée, par exemple pour des valeurs centrales (Buisson, 2004).

La deuxième approche de raisonnement est basée sur la théorie des sous-ensembles flous proposant un cadre formel qui permet de modéliser l'imprécis et l'incertain des aspects liés au langage naturel. Selon Zadeh (Zadeh, 1965; Zadeh, 1975), la théorie des sous-ensembles flous est le formalisme le plus adapté pour décrire de manière qualitative les variables linguistiques. Ainsi, dans plusieurs travaux (Martínez-Miranda *et al.*, 2002; Martinez-Miranda *et al.*, 2003), ces variables linguistiques sont traduites en nombres flous de formes régulières (trapézoïdale, triangulaire, etc.) ou irrégulière.

Nous avons adopté la théorie des sous-ensembles flous pour intégrer l'incertitude dans l'approche proposée. En conséquence, les variables réelles du modèle mathématique seront considérées, maintenant, comme des nombres flous.

4.2.2 Les sous-ensembles flous

Le concept de sous-ensemble flou permet des graduations dans l'appartenance d'un élément à une classe, ce qui permet d'autoriser un élément à appartenir plus ou moins fortement à cette classe. Un sous-ensemble flou A d'un référentiel X est caractérisé par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$ de X dans l'intervalle des nombres réels [0..1]. La fonction d'appartenance décrit le degré avec lequel un élément appartient à un ensemble :

$$A = \{(x, \mu_A(x))|x \in X\} \tag{4.1}$$

La fonction d'appartenance décrivant un sous-ensemble flou est caractérisée par quatre propriétés (figure 4.1) :

- Le type : la forme du nombre flou qui peut être triangulaire, trapézoïdale, gaussienne ou sigmoïdale.
- La hauteur : $H(A) = Sup_{x \in X}(\mu_A(x))$ de la fonction d'appartenance. Un sous-ensemble flou est dit normalisé s'il est d'hauteur 1.
- Le noyau : $N(A) = \{x/\mu_A(x) = 1\}$ est l'ensemble des éléments qui appartiennent totalement à A. Pour les fonctions de type triangulaire, le noyau est un singleton qui est appelé aussi valeur modale.
- Le support : $S(A) = \{x/\mu_A(x) \neq 0\}$; cet ensemble décrit l'ensemble des éléments qui sont partiellement dans A.

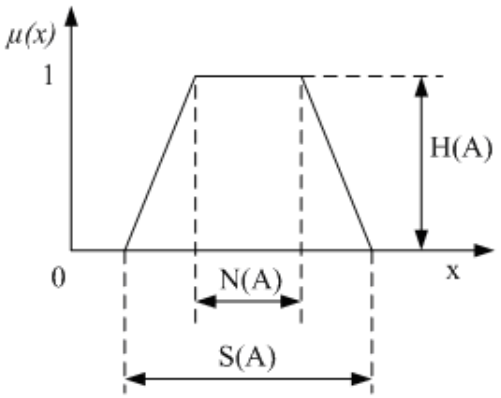


FIG. 4.1 – Le support, le noyau et la hauteur d'un nombre flou.

Il est important aussi d'introduire le concept d'α-coupe ou coupe de niveau α. Une α-coupe d'un sous-ensemble flou A pour une valeur $\alpha \in$ [0..1] est le sous-ensemble classique noté A_α et défini par :

$$A_\alpha = \{x; \mu_A(x)) \geq \alpha\} \tag{4.2}$$

Les α-coupes A_α d'un sous-ensemble A sont des intervalles non-floues emboités par rapport à la valeur de niveau α , si $\alpha' \geq \alpha$ alors $A_\alpha \supseteq A_{\alpha'}$ (figure 4.2). Les α-coupes des sous-ensembles A et B flous vérifient les propriétés suivantes :

- $(A \cup B)_\alpha = A_\alpha \cup B_\alpha$
- $(A \cap B)_\alpha = A_\alpha \cap B_\alpha$
- Si $(A \supseteq B)_\alpha$ alors $A_\alpha \supseteq B_\alpha$
- $(\neg A)_{1-\alpha} \neq \neg(A_\alpha)$, sauf pour $\alpha = 1/2$.

La méthode des α-coupes est souvent utilisée pour effectuer des opérations arithmétiques sur les nombres flous.

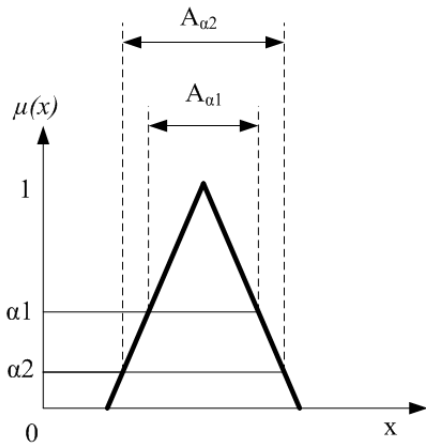


FIG. 4.2 – Les α-coupes d'un nombre flou.

4.2.3 Modèle flou

Dans le modèle(3.1)...(3.4) du chapitre précédent, les variables $\{d_{ij}, ..d_{nj}\}$, degrés des éléments comportementaux sont considérés maintenant comme des nombres flous de forme triangulaire symétrique. Un nombre flou triangulaire A (figure 4.4), noté généralement par $A = (a, b, c)$, est définit par :

$$A(x) = \begin{cases} 1 - \frac{a-x}{b} & if \quad a - b \leq x \leq a \\ 1 - \frac{x-a}{c} & if \quad a \leq x \leq a + c \\ 0 & sinon \end{cases} \tag{4.3}$$

Les nombres flous du modèle, de formes triangulaires symétriques ($b = c$), sont définis par $\mu(x) = 1$ pour $x = a$ (le noyau), par $\mu(x) = 0$ si $|x - a| > b$, et par la continuité de sa fonction d'appartenance μ. Le choix de nombres flous triangulaires symétriques est justifié par le fait qu'ils contiennent tous les intervalles de confiance des distributions de probabilité symétrique ayant même noyau et même support que les nombre flous (Dubois *et al.*, 2004). Les valeurs

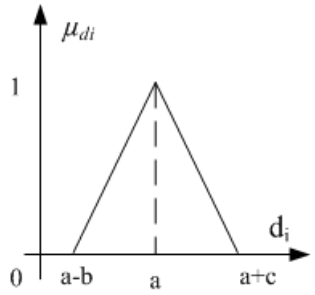


FIG. 4.3 – Nombre flou triangulaire.

linguistiques de $M = \{$Très faible, Faible, Moyen, Fort, Très fort$\}$, sont traduites par des nombres flous comme l'indique la figure suivante :

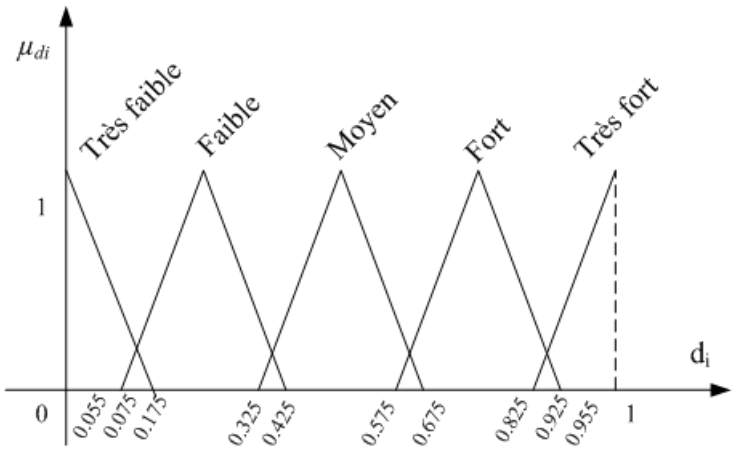


FIG. 4.4 – Les nombres flous utilisés dans le modèle.

L'état comportemental du j^{eme} opérateur, à un instant t donné, peut être représenté par le vecteur $d_j(t) = [d_{1j}(t), \ldots, d_{ij}(t), \ldots, d_{nj}(t)]$. Définissons aussi le vecteur $d_j(t+\tau) = [d_{1j}(t+\tau), \ldots, d_{ij}(t+\tau), \ldots, d_{nj}(t+\tau)]$ représentant l'état flou à l'instant $d_j(t+\tau)$ du j^{eme} opérateur. L'objectif est alors d'atteindre un état final $d_j(t+\tau)$ à partir de l'état initial $d_j(t)$ en mettant en place toutes les actions de correction ou de pilotage possibles. Nous définissons alors l'ensemble flou D des états objectifs (figure 4.5.a et 4.5.b).

Le degré d_i, ayant une valeur linguistique de la figure 4.4, est caractérisé par sa fonction d'appartenance $\mu_{d_i}(x)$ associant à chaque élément x une valeur dans l'intervalle [0..1]. Bien évidement, d'autres formes de nombres flous, trapézoïdale, gaussienne, etc., peuvent être choisies pour intégrer l'incertitude dans le modèle.

Nous avons modélisé le comportement de chaque opérateur par des équations différentielles ordinaires (chapitre 3). Cependant, comme les variables de l'équation sont maintenant considérées comme floues, le problème se ramène à la résolution d'équations différentielles à variables et/ou

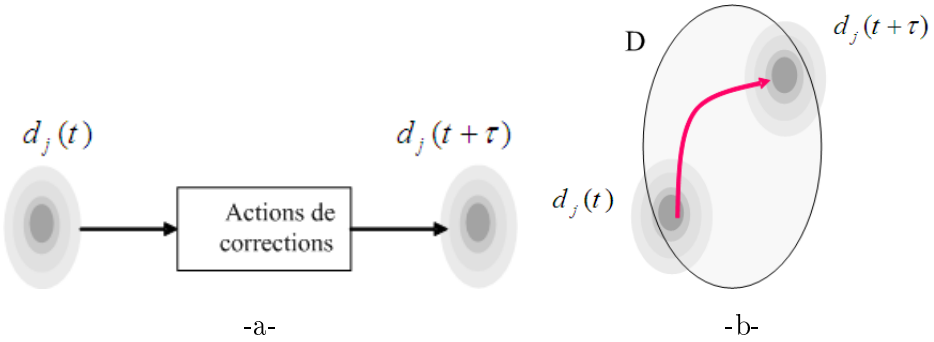


FIG. 4.5 – Les états initiaux et finals flous d'un comportement en fonction des actions de corrections.

à conditions initiales floues, appelée Equations Différentielles Floues (EDF) (ou en anglais *Fuzzy Differential Equations*). Dans ce cadre, plusieurs méthodes et approches ont été proposées afin de résoudre de telles équations. Dans le paragraphe suivant, les EDFs sont brièvement présentées ainsi que certaines méthodes de résolutions proposées dans la littérature.

4.2.4 Équation différentielle floue

Avant d'aborder les méthodes de résolutions proposées, définissons les Équations Différentielles Floues (EDF). Une EDF peut être vue comme une extension aux sous-ensembles flous des équations différentielles ordinaires (Gnana Bhaskar *et al.*, 2004; Kaleva, 2006). Il s'agit d'une équation différentielle à coefficients ou à conditions initiales floues (Bontempi, 1995). Sa solution est l'évolution, dans le temps, d'une région d'incertitude qui sera définie plus tard. Elle est définie aussi par Fishwick (Fishwick, 1990) comme étant la modélisation d'un système en considérant l'incertitude dans le modèle. Les EDFs sont utilisées comme des outils modélisant la dynamique de certains systèmes en tenant compte de l'incertitude et de l'imprécision. Considérant l'équation différentielle d'ordre 1 suivante :

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} & = f(t, x(t)) \\ x(t_0) & = x_0 \qquad\qquad x_0 \in \mathbb{R}^n \end{cases} \tag{4.4}$$

Si les conditions initiales sont incertaines et modélisées par des nombres flous, alors le problème (4.4) est remplacé par :

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{x}}{dt} & = f(t, \tilde{x}(t)) \\ \tilde{x}(t_0) & = \tilde{X}_0 \end{cases} \tag{4.5}$$

avec $\tilde{X}_0$ un sous-ensemble flou, f est une fonction qui dépend du temps et de la variable floue $\tilde{x}$.

Le concept de dérivation des variables floues a été introduit et présenté, pour la première fois, par Chang et Zadeh (Chang et Zadeh, 1972) puis par Dubois et Prade (Dubois et Prade, 1982)

en définissant et utilisant le principe d'extension de Zadeh. D'autres méthodes de résolution d'équations différentielles à conditions initiales floues sont proposées dans (Nieto et Rodríguez-López, 2006; Georgiou *et al.*, 2005; Goetschel et Voxman, 1986; Román-Flores et Rojas-Medar, 2002; Abbasbandy *et al.*, 2005; Song et Wu, 2000; Xiaoping et Yongqiang, 2006; Diamond, 2002; ORegan *et al.*, 2003).

Par exemple, Abbasbandy et Viranloo (Abbasbandy et Allahviranloo, 2002) proposent une solution basée sur la méthode de Taylor et prouvent son efficacité par rapport à une autre basée sur la méthode d'Euler (Ma *et al.*, 1999).

Nous ne détaillons pas ici les méthodes de résolution qui ont été exposés dans d'autres travaux se basant sur la dérivation floue ou la différentiabilité au sens de Hukuhara[9] (Vorobiev et Seikkala, 2002; Chalco-Cano et Roman-Flores, 2006). La méthode de résolution qui est détaillée ici, proposée par Bonarini et Bontempi, est considérée comme une méthode de "simulation qualitative floue" et ramène le problème à la résolution d'équations différentielles sur les α-coupes des nombres flous. Nous avons choisi de la présenter puisque nous proposons deux méthodes qui s'inspirent de ces travaux.

Ainsi, Bonarini et Bontempi ont proposé des simulateurs qualitatifs nommés Qua.Si.I, Qua.Si.II (Bonarini et Bontempi, 1994) et Qua.Si.III (Bontempi, 1996) qui se basent sur les deux approches : "non-interacting" et "interacting". Selon eux, ces approches essayent d'éviter les erreurs qui sont généralement introduites par les manipulations mathématiques des intervalles pour la résolution des EDFs. En effet, l'utilisation des intervalles ne permet pas la prise en compte des interactions qui peuvent exister entre les variables d'une équation différentielle.

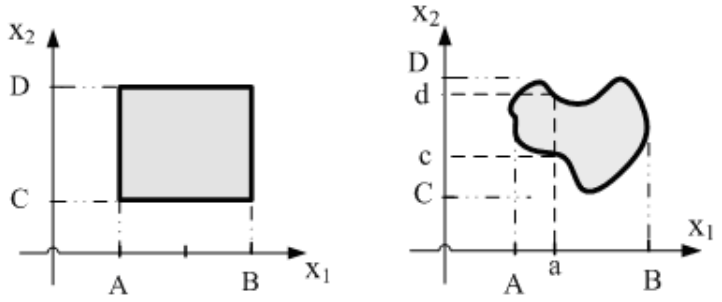
L'idée principale de ces deux approches repose sur la décomposition des conditions initiales d'un problème à n variables, représentés par des nombres flous, en plusieurs α-coupes formant ainsi la *région d'incertitude*[10]. Dans le cas de non-interaction entre les intervalles (*non-interacting approach*), la région d'incertitude est un hyper-cube (ou n-cube) exprimant l'absence de relation entre les intervalles. En d'autre termes (figure 4.6.a), si $x_1 = a \in [A, B]$, cela implique aucune contrainte sur $x_2 \in [C, D]$. Cependant, dans le cas de relations entre les intervalles (*interacting approach*), la région d'incertitude peut avoir des formes irrégulières (Figure 4.6.b) et si $x_1 = a \in [A, B]$, alors la valeur de x_2 ne peut être que dans l'intervalle spécifique $[c, d] \subset [C, D]$.

La solution d'un problème de la même forme que (4.5) est l'évolution dans le temps de la région d'incertitude. La figure 4.7 représente l'évolution de l'hyper-cube formé des α-coupes de la condition initiale (représenté par le rectangle ABCD) dans le temps.

L'approche *non-interacting* commence d'abord par échantillonner la région (ou le n-cube) à chaque Δt. Bonarini et Bontempi démontrent que, sous certaines conditions de différentiabilité, il est suffisant de considérer seulement la surface externe (théorème 4 de (Bontempi, 1995)). Après un simple calcul différentiel effectué pour chaque point de la surface entre t et $t + \Delta t$,

[9] Appelé aussi en anglais *H-derivative*

[10] Fuzzy region of uncertainty



-a- -b-

FIG. 4.6 – Relations entre les intervalles d'un modèle (adapté de (Bonarini et Bontempi, 1994)).

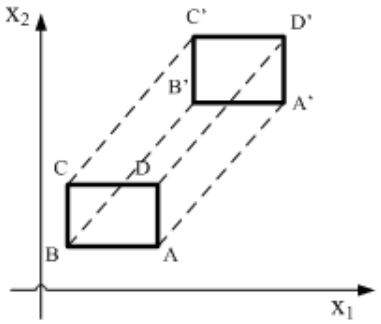


FIG. 4.7 – L'évolution dans le temps de la région d'incertitude.

l'hyper-cube est reconstruit et forme la condition initiale pour l'étape suivante. Cette procédure est effectuée pour chaque α-coupe. L'inconvénient majeur de cette approche est l'introduction de trajectoires erronées dans la solution.

Pour l'approche *interacting*, Bonarini et Bontempi ont défini la matrice de connexion[11] $C(t, x_0)$ associée à la solution $x(t, x_0)$ du modèle (4.5) :

$$c_{ij}(t, x_0) = \left.\frac{\partial x_i}{\partial \bar{x}_j}\right|_{\bar{x}=x_0} \tag{4.6}$$

Les éléments c_{ij} permettent de calculer, pour chaque pas Δt, la direction des tangentes des différents points de la surface externe de la région d'incertitude. Dans cette approche, la région d'incertitude ne conserve pas la même forme à chaque pas Δt à cause de la dépendance qui peut exister entre les intervalles. Le problème revient alors à chercher comment échantillonner la surface externe de la région d'incertitude à chaque pas Δt. Ainsi, déterminer la solution du modèle (4.5) revient à calculer à chaque instant $t^\star$ le minima et le maxima de chaque x_i, autrement dit, trouver les extrema de la fonction $x_i(t^\star, x_0), i = 1..n$ avec $t^\star$ fixé et x_0 un point de la surface

[11] Terme en anglais : Connection matrix

externe.

Dans le paragraphe suivant, nous décrivons deux méthodes de résolution que nous utilisons dans la simulation. Les avantages et inconvénients de chacune ainsi que la différence des résultats qu'elles fournissent sont détaillés et commentés.

4.2.5 Méthode de simulation et résultats

4.2.5.1 Méthode de simulation

La première méthode de simulation floue présentée dans ce paragraphe permet d'avoir des résultats assez proche de l'optimum. Elle se base sur la notion de région d'incertitude, définie par Bonarini et Bontempi, considérée comme un hyper-cube évoluant dans le temps. Partons de l'exemple de graphe de comportement de la figure 4.8 pour montrer l'applicabilité de cette méthode. Ce graphe, représentant le comportement d'un opérateur, est composé de trois éléments psychologique E_1, E_2 et E_3 qui sont connectés par des relations linéaires.

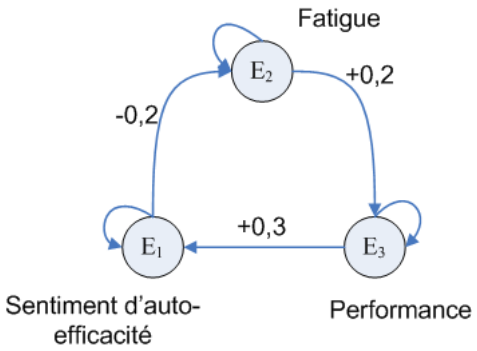


FIG. 4.8 – Exemple de graphe de comportement.

Considérons le degré de l'élément E_2 qui varie dans le temps selon l'équation (4.7).

$$\frac{d}{dt}d_2(t) = r_{12} \times d_1(t) + r_{22} \times d_2(t) \tag{4.7}$$

Dans ce cas, le problème consiste à résoudre l'équation différentielle avec des conditions initiales qui sont des variables linguistiques représentées par des nombres flous. À $t = 0$, nous avons les conditions suivantes :

- d_1 (degré de l'élément E_1) est "Moyen" ;
- d_2 (degré de l'élément E_2) est "Fort" ;
- d_3 (degré de l'élément E_3) est "Moyen" ;

La procédure de simulation proposée se base sur le calcul par intervalle et la décomposition des variables floues en plusieurs α-coupes. À chaque niveau, les intervalles formant la région d'incertitude forment un hyper-cube (Cf. figure 4.9).

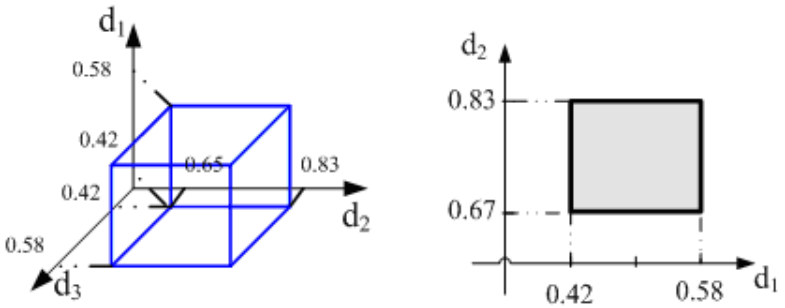


FIG. 4.9 – La région d'incertitude à $t = 0$ formée par les 0.5-coupes.

Les variables du modèle, à savoir $d_1(t)$, $d_2(t)$ et $d_3(t)$ sont supposées différentiables. Par conséquent, selon le théorème 4 de (Bontempi, 1995), il est suffisant de considérer la surface externe et non la totalité de la région d'incertitude. La procédure commence alors par échantillonner cette surface. Ensuite, une simple simulation numérique sera effectuée pour les $4 * n_p$ points avec n_p le nombre de point par α-coupe (4 correspond aux 4 cotés de la région d'incertitude). Le résultat de la simulation est l'évolution dans le temps de la région d'incertitude à chaque niveau. Le problème peut être vu alors comme étant un ensemble de sous-problèmes de résolution d'équations différentielles ordinaires.

Algorithm 1 Première proposition

Soit $T = [t_0..t_1]$ l'intervalle de temps de la simulation totale ;

Pour toutes les α-coupes des nombres flous :α : de 1 à 0 par pas de -0.01 **faire**

Échantillonner la surface de la région d'incertitude formée par les α-coupe des valeurs initiales des variables du modèle ;

Lancer la simulation pour chaque point dans l'intervalle T ;

Enregistrer les points formant la nouvelle région d'incertitude associée au niveau α ;

Fin Pour

Construire les nombres flous en regroupant les résultats de différents niveau α ;

La procédure décrite ci-dessus (algorithme 1) a été implémentée sous Matlab et a été appliquée sur l'exemple du graphe de la figure 4.8 et avec les conditions initiales citées. Les résultats de la simulation sont présentés et commentés ci-après. Les figure 4.10.a et figure 4.10.b illustrent les différentes trajectoires des $4 \times n_p$ (dans cet exemple, $n_p = 4$) points de la surface du rectangle (région d'incertitude). Les 4 trajectoires en lignes continues correspondent aux 4 sommets alors que celles en pointillés représentent les trajectoires des autres $4 \times n_p(n_p - 1)$ points de la surface.

Les deux figures 4.11.a et 4.11.b illustrent l'évolution, au cours du temps, de la région d'incertitude formée par les degrés d_1, d_2 et d_3. Par effet de saturation, la surface de cette région

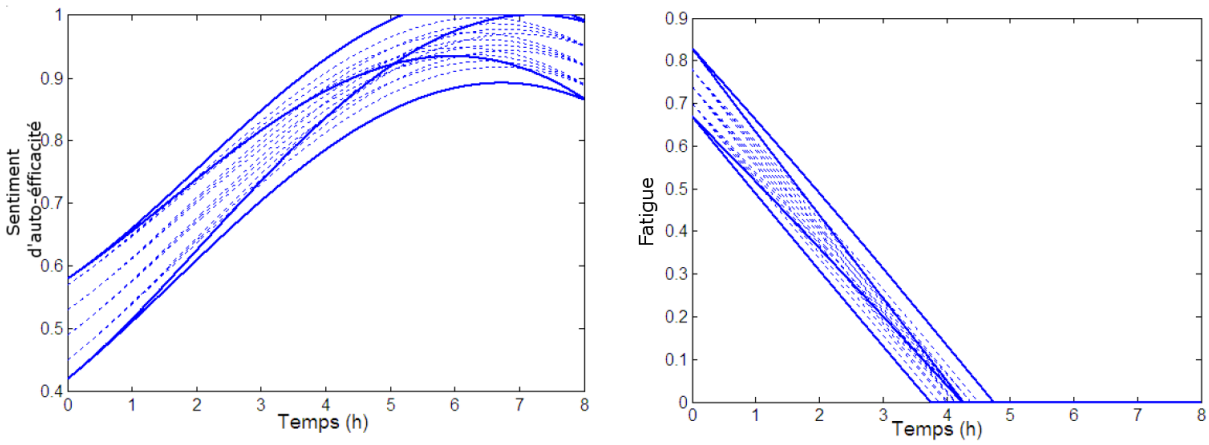


FIG. 4.10 – Les trajectoires des différents points de la surface (pour 0.5-coupe).

diminue et tend vers 0. L'évolution des hypercubes flous au cours du temps, obtenue à partir des α-coupe, est donnée la figure 4.12.

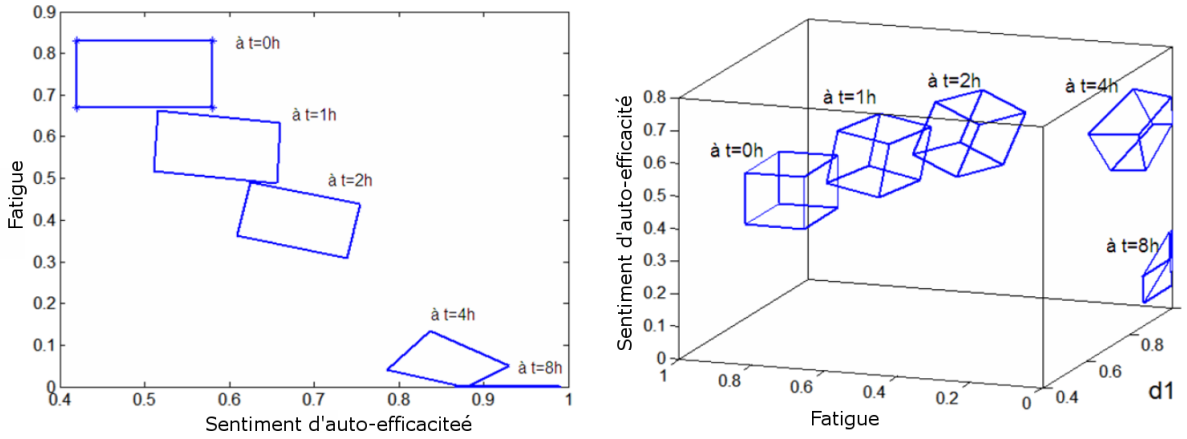


FIG. 4.11 – L'évolution de la région d'incertitude pour la coupe de niveau 0.5

L'avantage majeur de cette méthode est sa souplesse et sa facilité d'implémentation. Cependant, elle n'assure pas la convexité de la fonction d'apprentissage. C'est le cas de la valeur de d_2 à l'instant $t = 4h$ de l'exemple précédent (figure 4.12). Afin de résoudre ce problème, une deuxième méthode de simulation est proposée, dans le paragraphe suivant,afin d'assurer la convexité des nombres.

4.2.5.2 Amélioration de la méthode

Cette deuxième méthode repose également sur la décomposition des nombres flous en plusieurs α-coupes en se basant sur le même principe de simulation en gardant l'hypothèse de la différentiabilité. Pour assurer la convexité des nombres flous et donc le recouvrement des régions

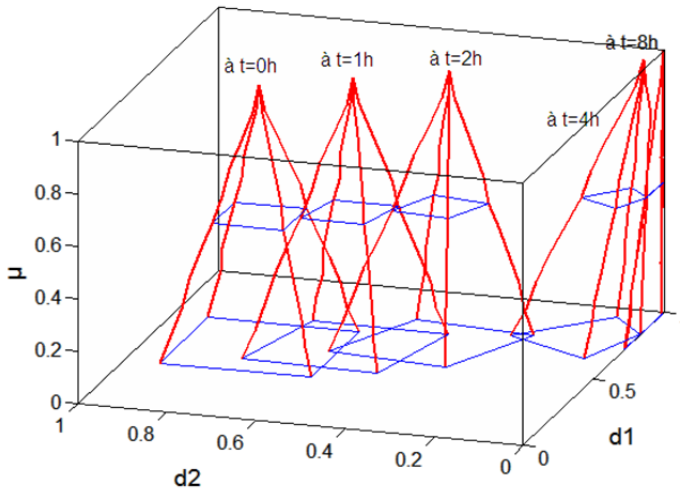


FIG. 4.12 – L'évolution de d_1 (degré de sentiment d'auto-efficacité) et d_2 (degré de fatigue).

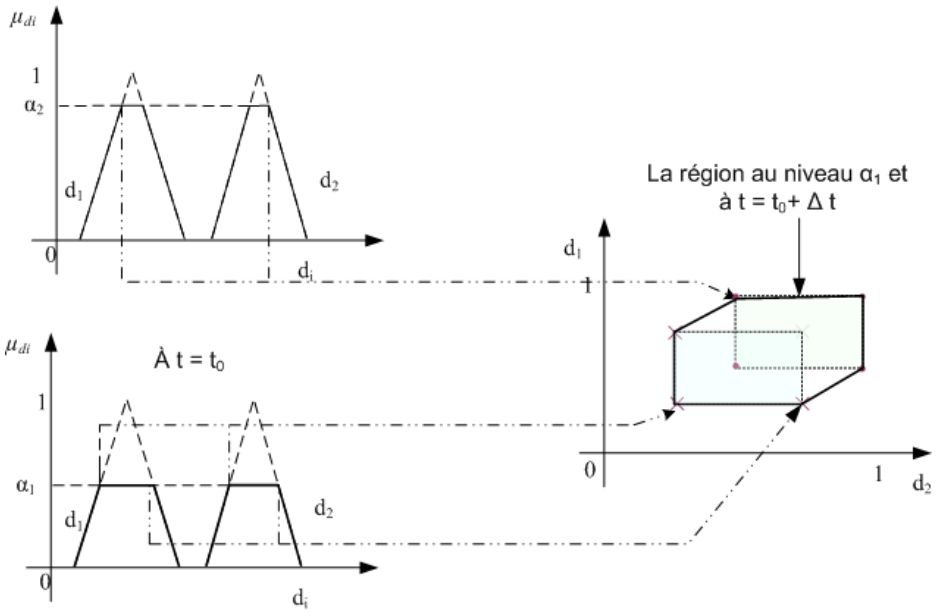


FIG. 4.13 – Calcul de la région d'incertitude pour deux niveaux successifs avec la deuxième méthode.

d'incertitude, cette méthode considère à chaque niveau α_2 les résultats ou les points calculés au niveau supérieur α_1 (figure 4.13). Selon cette méthode, la région d'incertitude à chaque niveau α_2 est déterminée comme l'union de la région obtenue au niveau supérieur α_1 et de la région calculée pour le niveau α_2. Le contour des régions d'incertitude, à chaque niveau, ne conserve pas un nombre de sommets constant mais peut avoir toute forme irrégulière (voir l'algorithme 2).

Algorithm 2 Deuxième proposition

Soit $T = [t_0..t_1]$ *l'intervalle de temps de la simulation totale* ;
$t_i = t_0$;
Tant que $t_i + \Delta t < t_1$ **faire**
  Pour les α-coupes : α de 1 à 0 par pas de -0.01 **faire**
    Lancer la simulation dans l'intervalle $T_i = [t_i..t_i + \Delta t]$ *pour chaque extrémité des* α*-coupes des variables du modèle* ;
    Enregistrer les points formant la nouvelle région d'incertitude associée au niveau α ;
    Si $\alpha < 1$ **alors**
      Récupérer les points résultant de la simulation associée au niveau α *précédent* ;
    Fin Si ;
    Détecter le contour de la surface d'incertitude formée par tous ces points ;
  Fin Pour
  Construire les nombres flous, résultats de la simulation entre en t_i *et* $t_i + \Delta t$*, en regroupant les résultats des différents niveau* α ;
  Ces résultats formeront les conditions initiales de la prochaine simulation ;
  $t_i = t_i + \Delta t$;
Fin Tant que

Le calcul se base sur la procédure de simulation décrite dans la première méthode, c'est-à-dire, sur la décomposition des variables α-coupes et la construction des régions d'incertitude. Elle commence par la simulation du noyau des variables du modèle, c'est-à-dire le sommet des nombres flous ($\alpha = 1$) et puis passe au niveau suivant. Pour éviter de faire le calcul de tous les points des intervalles à un niveau α_2 donné, il suffit de prendre les points formant le contour de la région d'incertitude associée au niveau précédant $\alpha_2 < \alpha_1$ (figure 4.13) et de les intégrer directement parmi les résultats. De cette manière, la méthode garantit une simulation plus rapide, en effectuant le calcul à chaque niveau α pour 2 (les sommets de chaque α-coupe) $\times n$ points (n est le nombre de variables), tout en préservant la cohérence des nombres flous ($A_{\alpha 1} \subset A_{\alpha 2}$ avec $\alpha 1 > \alpha 2$).

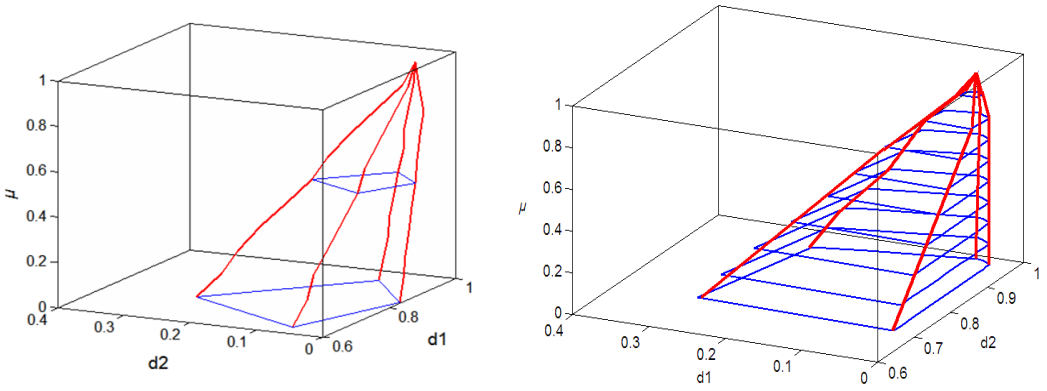
En plus, l'intervalle de temps $T = [t_0..t_1]$ de la simulation totale est découpé en plusieurs sous-intervalle $T_i = [t_i..t_i + \Delta t]$ avec un pas Δt fixe ou variable. Ainsi, la procédure décrite ci-dessous est appliquée pour chaque sous-intervalle T_i. Les résultats de la simulation d'une étape i (appliqué pour l'intervalle T_i) seront les conditions initiales de l'étape suivante $i + 1$ (appliqué pour l'intervalle T_{i+1}). Ce découpage garantit la convexité des nombres flous du modèle tout au long de l'intervalle de temps de la simulation.

Concernant la détection du contour, une première proposition est de chercher, à partir d'un point donné, celui qui fait avec l'axe des abscisses la pente Θ la plus faible. Le point trouvé est ajouté à la liste des points formant le contour et sera l'origine du prochain repère faisant un

angle Θ avec l'ancien. Pour chaque étape, les coordonnées des points restant sont recalculées en utilisant la matrice de rotation suivante :

$$\begin{pmatrix} \cos(\Theta) & \sin(\Theta) \\ -\sin(\Theta) & \cos(\Theta) \end{pmatrix} \tag{4.8}$$

En appliquant cette méthode à l'exemple du graphe de la figure 4.8, nous obtenons les résultats ci-après. La figure suivante illustre les degrés des éléments E_1 et E_2 formant ainsi une "*pyramide irrégulière*" à l'instant $t = 4h$. Les nombres flous sont construits en regroupant les régions d'incertitudes calculées pour chaque niveau (figure 4.14.b).



-a- -b-

FIG. 4.14 – d_1 (degré de sentiment d'auto-efficacité) et d_2 (degré de fatigue) à $t = 4h$ avec les deux méthodes : a- *Première méthode*, b- *deuxième méthode*.

La figure 4.14 illustre bien les relations qui peuvent exister entre les variables du modèle. En effet, les α-coupes et les régions d'incertitudes ne sont pas de forme régulière et donc la détermination de la valeur d'un nombre flous à un instant donné n'est pas évidente. Une deuxième proposition de détection de contour peut être utilisée pour garantir des formes plus régulières. Elle consiste à prendre à chaque niveau les bornes inférieurs et supérieurs de chacune des variables (figure 4.15).

L'utilisation de cette proposition permet, certes, la construction de formes régulière assurant la détermination rapide et plus facile des valeurs des degrés des différents variables du modèle, mais augmente l'incertitude (le flou). Les résultats obtenus par cette méthode nous ont encouragé à l'adopter comme procédure de simulation.

4.2.6 Exemple illustratif

Prenons l'exemple de graphe de comportement de la figure (figure 4.17) qui est obtenu après une première série d'expériences (Elkosantini et Gien, 2007d) menées avec des étudiants jouant le rôle d'opérateurs effectuant une tâche. Le modèle est constitué par 3 facteurs psychologiques et

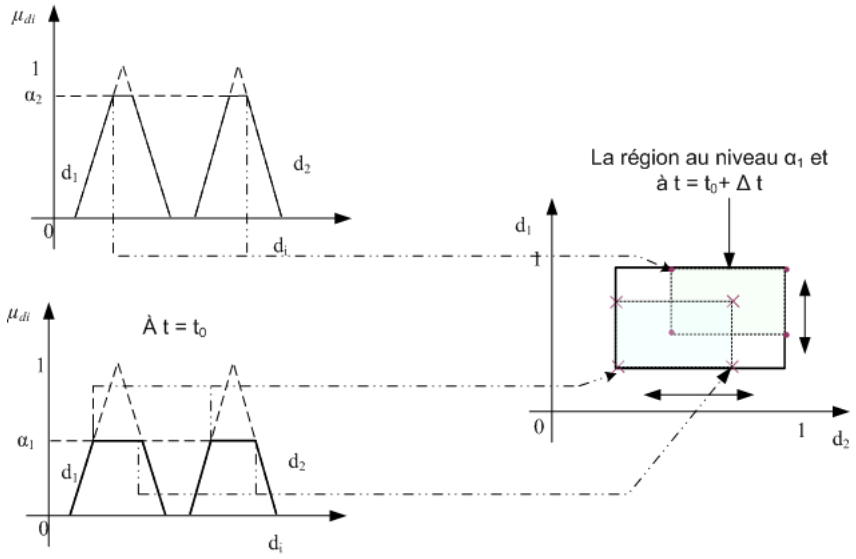


FIG. 4.15 – Deuxième proposition de détection de contour de la région d'incertitude.

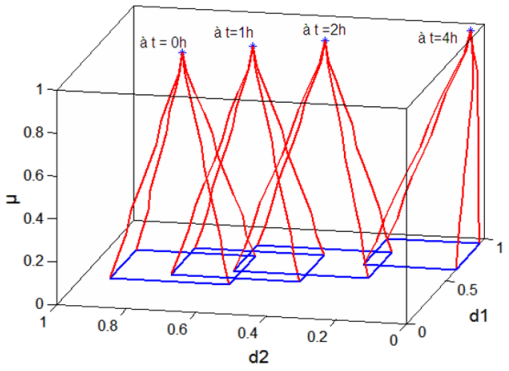


FIG. 4.16 – L'évolution de d_1 (degré de sentiment d'auto-efficacité) et d_2 (degré de fatigue) selon la deuxième méthode.

un critère de performance. Dans le chapitre suivant, la procédure d'identification des paramètres du modèle, à savoir les degrés des relations d'influence, est présentée.

Selon les données expérimentales recueillies à la suite de cette première série d'expérience, les valeurs initiales des différents facteurs psychologiques sont les suivants : degré de stress (d_2) est "Faible" ; degré de la motivation (d_1) est "Fort" et le degré de la fatigue (d_3) est "Faible". Dans cet exemple, aucune perturbation n'est simulée, en supposant qu'aucun événement perturbateur ne surgisse tout au long de la simulation. Le modèle numérique considéré est alors le suivant :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}d_2(t) &= -0.15 \times d_1(t) - 0.1 \times d_2(t) \\ \frac{d}{dt}d_3(t) &= 0.16 \times d_2(t) - 0.41 \times d_3(t) \end{aligned} \tag{4.9}$$

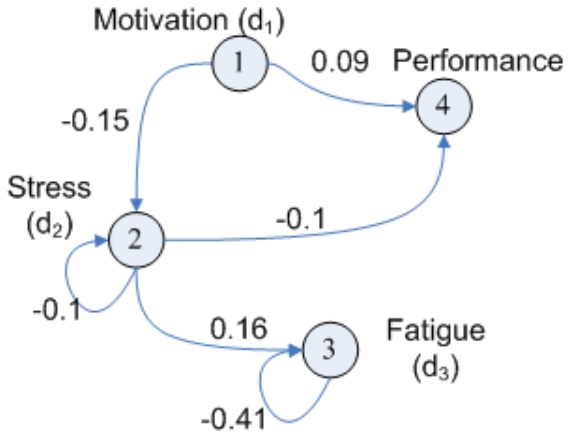
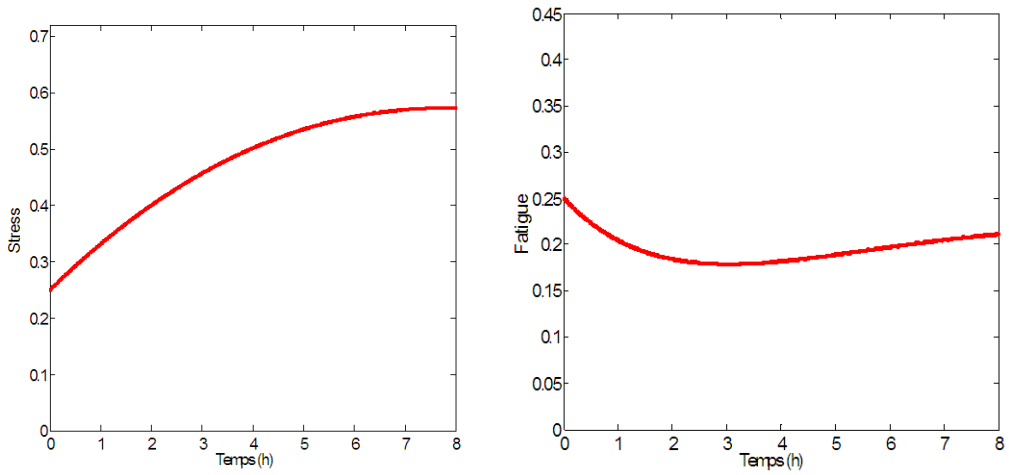


FIG. 4.17 – Exemple de graphe.

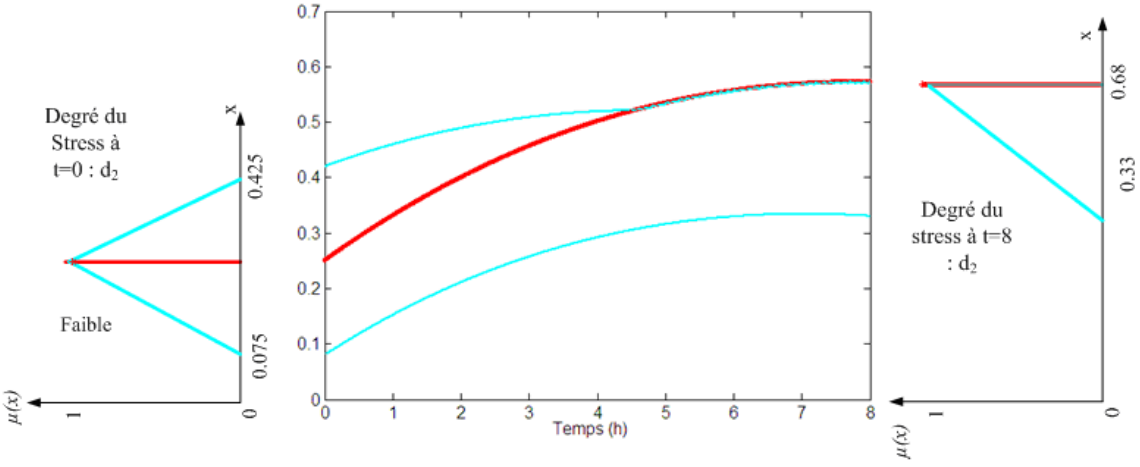
Dans le cas de modélisation non floue, les valeurs linguistiques (très faible, faible, moyen, fort et très fort) sont traduites en valeurs numériques et les courbes d'évolution du stress et de la fatigue sont données dans la figure 4.18.



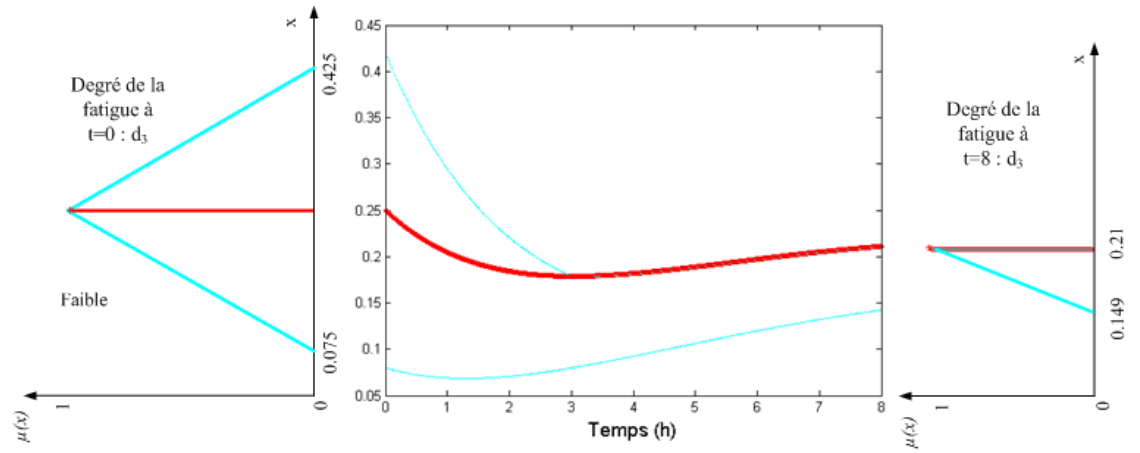
-a- -b-

FIG. 4.18 – Évolution des degrés du stress et de la fatigue selon le modèle numérique.

Traduisons maintenant ces mêmes valeurs linguistiques en nombres flous comme définis précédemment. Le but est alors de déterminer l'évolution des niveaux du stress et de la fatigue. Dans cet exemple, nous utilisons la deuxième méthode de résolution présentée ci-dessous pour le modèle (4.9) avec une durée T=8 (l'unité de temps est l'heure). La figure 4.19.a présente l'évolution du degré de stress qui, rappelons-le, est représenté par un nombre flou de forme triangulaire. Chaque nombre flou du modèle (les degrés du stress, de la fatigue et de la motivation) est décomposés en 100 α-coupes et l'intervalle T est découpé en plusieurs sous-intervalles avec



-a-



-b-

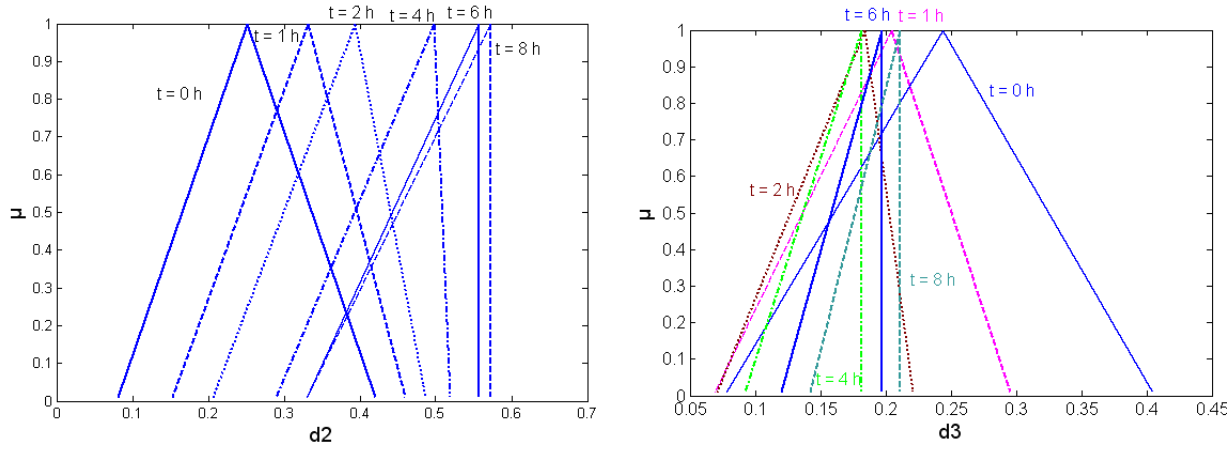
FIG. 4.19 – Évolution des degrés du stress et de la fatigue.

un pas régulier $\Delta t = 0.1h$. Les deux courbes en clair de la figure 4.19.a représentent l'évolution des bornes du support du nombre flou représentant le degré du stress et celle du milieu (en noir foncé) représente l'évolution du noyau.

Notons que dans la figure 4.19.a, la courbe de l'une des deux extrémités du support du nombre flou représentant le degré du stress change de direction à $t = 4.5h$ et suit, à partir de cet instant, celle associé au noyau afin d'assurer la convexité du nombre flou. Ceci peut être mieux constaté dans la figure 4.20.a dans laquelle le noyau du nombre flou associé au degré du stress est confondu avec la borne supérieure du support de $t = 6h$ à $t = 8h$. La forme du nombre devient alors un triangle rectangle. Il en est de même pour le noyau du nombre flou associé au degré de la fatigue, confondu avec la borne supérieure du support à partir de t=3h pour former aussi un triangle rectangle. Soulignons aussi que la taille du support de ces deux nombres diminue avec

le temps ce qui exprime la diminution de l'erreur absolue, intégrée par la considération du flou, lors de la quantification de ces deux facteurs.

Avec la première méthode de résolution (Cf. paragraphe 4.2.5.1), le nombre flou ne serait pas convexe à ces instants d'où l'intérêt d'utiliser la deuxième proposition. La figure 4.20.a montre que le degré du stress augmente légèrement tandis que la fatigue (figure 4.20.b) ne change pratiquement pas, seule la dimension du support du nombre flou diminue.



-a- -b-

FIG. 4.20 – Les degrés du stress (d_2) et de la fatigue (d_3) à plusieurs instants.

Constatons que l'évolution du noyau obtenu par la résolution de l'équation différentielle floue est identique au résultat obtenu dans la figure 4.18 puisque la méthode d'intégration 2 est d'abord appliquée à la coupe de niveau 1 avant de descendre progressivement.

Pour déterminer le niveau des facteurs comportementaux à chaque instant, nous allons les comparer aux valeurs linguistiques {Très faible, Faible, Moyen, Fort, Très fort} traduites par des nombres flous. Cette comparaison de nombres flous peut être réalisée à l'aide d'une mesure de possibilité. Elle qualifie le degré maximal avec lequel un élément x de X peut appartenir à la fois à A et à B. Le degré de possibilité, noté par $\Pi(A, B)$, est calculé selon la formule suivante :

$$\Pi(A, B) = sup_x min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \tag{4.10}$$

Selon cette formule, la possibilité du degré du stress à l'instant $t = 2h$ d'être "faible" est égale à 0.58 et la possibilité qu'il soit "moyen" est égale à 0.52 (figure 4.21).

$$\begin{gathered}\Pi(d_2(2), Faible) = 0.58; \Pi(d_2(2), Moyen) = 0.58 \\ \Pi(d_2(2), \text{Très faible}) = \Pi(d_2(2), Fort) = \Pi(d_2(2), \text{Très fort}) = 0\end{gathered} \tag{4.11}$$

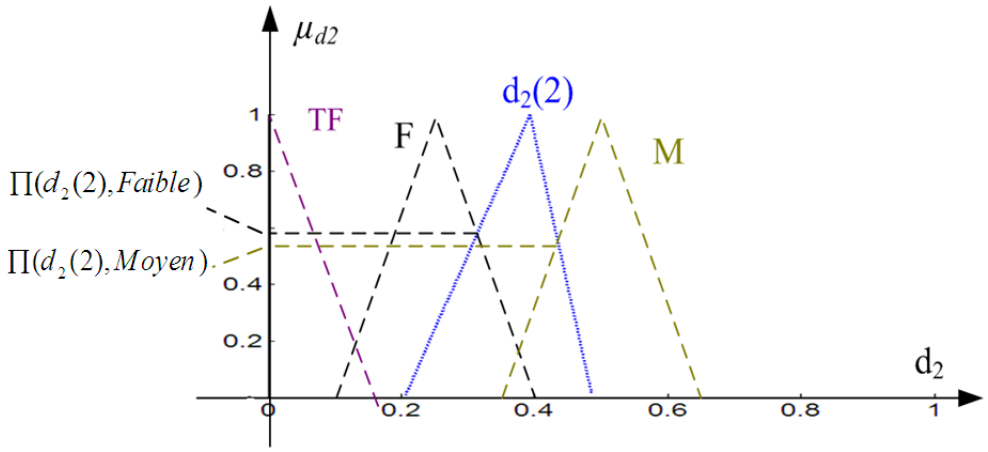


FIG. 4.21 – La mesure de possibilité pour le degré du stress à $t = 2h$.

4.3 Description floue du comportement d'un groupe

Le modèle mathématique initialement proposé, décrivant les relations inter-individus (voir paragraphe 3.3 du chapitre 3), se base sur des variables numériques en négligeant les aspects d'inexactitude et d'incertitude que les facteurs psychosociaux peuvent exprimer. Par conséquent, nous proposons d'utiliser la logique floue et les ensembles flous puisqu'ils facilitent le traitement des données imprécises et imparfaites. L'évaluation des facteurs sociaux est désormais assurée par des nombres flous. En d'autres termes, les valeurs linguistiques des variables $g_k(t)$ du modèle proposé sont traduites en nombres flous comme indiqué dans la figure 4.4.

Nous verrons dans le chapitre suivant qu'il est possible d'identifier, dans certains cas, les équations différentielles pour quelques facteurs psychologiques. Dans le cas des facteurs psychosociaux, nous atteignons un autre niveau de complexité. Nous utilisons donc à ce niveau des principes énumérés par des experts et codés sous forme de règles floues.

La détermination de la variation des différents facteurs est assurée par un système d'inférence flou. L'ensemble des règles est transformé en une fonction mathématique (voir exemple du paragraphe 4.4) pour les intégrer dans le modèle global.

La logique floue assure la construction d'une logique plus flexible que les règles logiques traditionnelles et permet de produire des inférences à partir de relations imprécises. En outre, elle adopte un mécanisme de déduction plus proche du raisonnement humain que la logique classique (Niskanen, 2002; Akhter *et al.*, 2005).

4.3.1 Les règles floues

Les systèmes d'inférences flous permettent de déduire les valeurs des variables de sortie de celles des variables d'entrée. Ce mécanisme est basé sur un ensemble de règles de la forme "*SI*

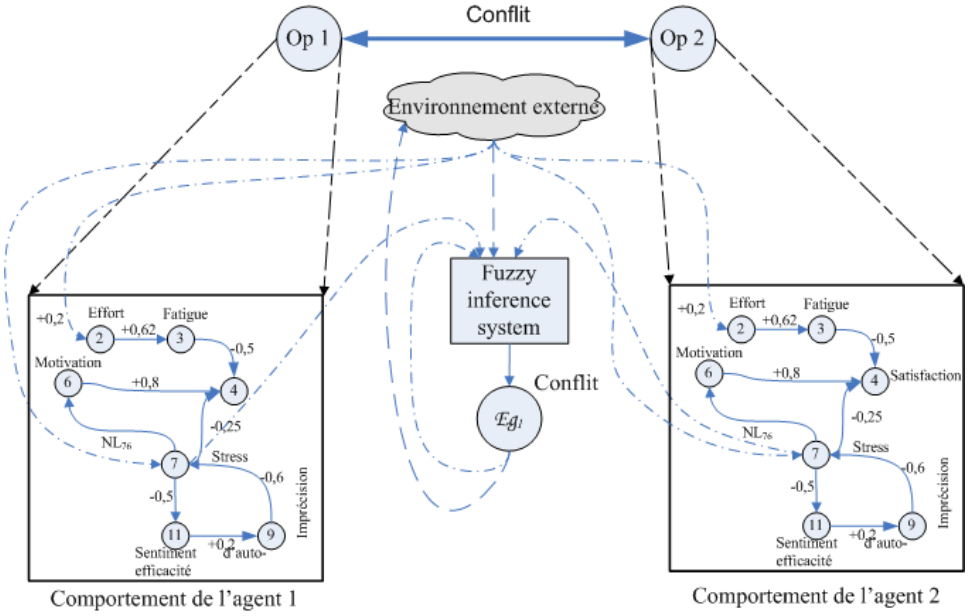


FIG. 4.22 – Simulation des relations inter-individus.

X est A ALORS Y est B" où A et B représentent des termes linguistiques quantifiant les liens qui peuvent exister entre les variables d'entrée X et de sortie Y. Une règle floue est constituée d'une ou plusieurs prémisses, liées par des conjonctions de type *ET* ou *OU*, une implication et une conclusion :

	Prémisse 1	Conjonction	Prémisse 2	Implication	Conclusion
SI	X est A	ET	Y est B	**ALORS**	Z est C

Le tableau suivant, résume quelques opérateurs logiques définis dans la littérature, à savoir "ET" (intersection), "OU" (union) et "NON" (négation). La définition de ces opérateurs logiques est assurée selon le type de la fonction d'appartenance utilisée. Quelques uns sont résumés dans le tableau 4.1.

Nom	**Intersection "ET"**	**Union "OU"**	**"NON"**
Zadeh	$\mu_{AETB} = min(\mu_A, \mu_B)$	$\mu_{AOUB} = Max(\mu_A, \mu_B)$	$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A$
Probabiliste	$\mu_{AETB} = \mu_A \cdot \mu_B)$	$\mu_{AOUB} = \mu_A + \mu_B - \mu_A \cdot \mu_B$	$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A$
Lukasiewicz	$\mu_{AETB} = Max(\mu_A + \mu_B - 1, 0)$	$\mu_{AETB} = min(\mu_A + \mu_B, 1)$	$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A$
Weber	$\mu_{AETB} = \begin{cases} \mu_A & si \ \ \mu_B = 1 \\ \mu_B & si \ \ \mu_A = 1 \\ 0 & sinon \end{cases}$	$\mu_{AOUB} = \begin{cases} \mu_A & si \ \mu_B = 0 \\ \mu_B & si \ \mu_A = 0 \\ 1 & sinon \end{cases}$	$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A$

TAB. 4.1 – Quelques opérateurs logiques.

L'implication floue est une relation qui associe à toute règle floue R une fonction d'appartenance qui peut être définie de différentes manières. Les opérateurs d'implication floue les plus utilisés sont précisés dans le tableau 4.2 et parmi eux, celui de Mamdani est le plus connus pour ses applications dans la commande floue.

	Nom	**Fonction d'appartenance**
R_m	Mamdani	$min(\mu_A, \mu_B)$
R_l	Larsen	$\mu_A \times \mu_B$
R_r	Reichenbach	$1 - \mu_A + \mu_A \times \mu_B$
R_w	Willmott	$Max(1 - \mu_A, min(\mu_A, \mu_B))$
R_{rg}	Rescher-Gaines	$\begin{cases} 1 & si\ \mu_A \leq \mu_B \\ 0 & sinon \end{cases}$
R_{kd}	Kleene-Dienes	$Max(1 - \mu_A, \mu_B)$
R_{bg}	Brouwer-Gödel	$\begin{cases} 1 & si\ \mu_A \leq \mu_B \\ \mu_B & sinon \end{cases}$
R_g	Goguen	$\begin{cases} min(\frac{\mu_B}{\mu_A}, 1) & si\ \mu_A \neq 0 \\ 1 & sinon \end{cases}$
R_l	Lukasiewicz	$min(1 - \mu_A + \mu_B, 1))$

TAB. 4.2 – Quelques opérateurs d'implications floues (A est la prémisse et B est la conclusion de la règle).

Le système d'inférence que nous proposons est de type MISO (Multi-Input, Single-Output) : multi-entrée - une seule-sortie, c'est-à-dire des règles à plusieurs prémisses et une seule conclusion. Les entrées de ce système sont les degrés des facteurs ayant une influence sur la variation des relations sociales comme les facteurs psychologiques, ceux liés à l'environnement de travail ou à la tâche, certains facteurs sociologiques, etc. La sortie du système est la variation des facteurs sociologiques, représentée par la dérivée dans le modèle mathématique.

Dans l'exemple de la figure 4.22, le conflit entre deux opérateurs dépend de son état précédent et du niveau des événements externes liés à l'environnement de travail, d'une part, et de leur stress, d'autre part. Les règles utilisées dans le système d'inférence ont, alors, la forme suivante :

R_1 : **SI** d_{51} est A_1 **ET** d_{52} est B_1 **ET** e_1 est C_1 **ET** g_1 est D_1 **THEN** $Variation_g1$ est L_1
R_2 : **SI** d_{51} est A_2 **ET** d_{52} est B_2 **ET** e_1 est C_2 **ET** g_1 est D_2 **THEN** $Variation_g1$ est L_2
... ...
R_n : **SI** d_{51} est A_n **ET** d_{52} est B_n **ET** e_1 est C_n **ET** g_1 est D_n **THEN** $Variation_g1$ est L_n

Avec :
- d_{51}, d_{52} les degrés du stress des deux agents,
- g_1 l'état du conflit avant ou après la perturbation,

– e1 le niveau de l'événement externe (événement de perturbation ou action de pilotage),
– A_i, B_i, C_i, et D_i les valeurs linguistiques de d_{51}, d_{52}, e_1 et g_1.

Rappelons que 5 valeurs linguistiques sont définies (Très faible, Faible, Moyen, Fort et Très fort) (figure 4.4). La variable $Variation_g1$ représente le niveau de variation de l'élément psycho-sociologique E_1 et correspond à la dérivation $\frac{d}{dt}g_1(t)$ de l'équation différentielle (3.8) du chapitre précédent. $Variation_g1$ est considéré comme un nombre flou, de forme triangulaire également, qui prend l'une des valeurs linguistiques NB (grand-négatif), NS (petit-négatif), ZE (zéro), PS (petit-positif) et PB (grand-positif). Ces valeurs sont illustrées dans la figure 4.23.

La règle R_1 précédente se lit de la manière suivante : Si le degré du stress d_{51} du premier opérateur est A_1 et le degré du stress d_{52} du deuxième opérateur est B_1 et si le niveau des conditions de travail (incluant les événements de perturbation et les décisions prises par les manageurs) est C_1 alors la variation du conflit $Variation_g1$ est L_1.

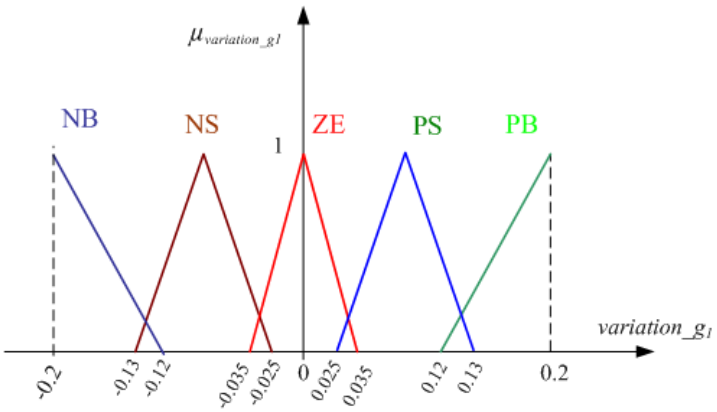


FIG. 4.23 – Les valeurs linguistiques de $Variation_g1$.

4.3.2 Méthodes d'inférence et de raisonnement

Les méthodes d'inférence utilisées dans la logique classique, *modus tollens* et *modus ponens* ne permettent pas de raisonner lorsque les règles ou les faits sont définis de façon imparfaite. Cette forme de raisonnement a été adaptée à la logique floue pour prendre en compte les informations et les règles vagues que les systèmes d'inférence peuvent contenir. Il convient alors d'utiliser le *modus ponens généralisé* ayant la forme suivante et permettant de déduire une nouvelle connaissance en se basant sur la connaissance d'un seul fait et d'une ou plusieurs règles :

Fait observé :	X est A'	
Règle floue :	**SI** X est A **ALORS**	Y est B
Conclusion déduite :		Y est B'

Le sous-ensemble flou B' décrivant Y est déduit à partir de la règle et d'une observation est défini par sa fonction d'appartenance de la façon suivante :

$$\forall y, \mu_{B'}(y) = Max_x \top(\mu_{A'}(x), \mu_{A \Rightarrow B}(x, y)) \tag{4.12}$$

Avec $\top$ une t-norme appelé l'opérateur Modus Ponens Généralisé. Pour conserver les propriétés d'un Modus Ponens, le choix de $\top$ dépend de l'implication floue utilisée.

	Opérateur de MGP	**Implication floue**
Lukasiewicz	$\top_L(u, v) = max(u + v - 1, 0)$	R_k, R_l, R_m,R_p
Probabiliste	$\top_P(u, v) = u \cdot v$	R_{bg}, R_m, R_p
Zadeh	$\top_Z(u, v) = min(u, v)$	R_{bg}, R_m, R_p

TAB. 4.3 – Quelques exemples de t-normes.

Pour l'implémentation des systèmes d'inférence flous, plusieurs méthodes de raisonnement sont proposées et se basent, généralement, sur le même processus : Fuzzification - Calcul des relations entre les prémisses - Inférence floue -Agrégation des conclusions - Défuzzification.

- *Fuzzification* : processus qui consiste à transformer une grandeur numérique en un sous-ensemble flou. En d'autres termes, qualifier une valeur numérique avec un terme linguistique.
- Inférence floue : relation floue définie entre deux sous-ensembles flous (la prémisse et la conclusion). Ce processus permet de combiner les connaissances fournies par l'ensemble des règles du système et avec les faits observés. Il s'agit du *modus penens généralisé* défini ci-dessus et qui permet de déterminer l'ensemble des règles activées. L'activation des règles consiste à appliquer une norme triangulaire - appelée aussi T-norme (voir annexe B) - pour obtenir le degré d'activation de chacune et qui est une valeur comprise entre 0 et 1. Après la déduction des conclusions des règles activées, l'étape suivante consiste à les agréger pour déterminer la fonction d'appartenance globale.
- Agrégation : la conclusion finale d'un système d'inférence est le résultat de la combinaison des résultats de différentes règles activées en utilisant les normes triangulaires (T-norme) ou T-conorme :

  1. Par T-norme : la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou Y', qui est le résultat de l'agrégation, est définie de la manière suivante :

  $$\forall y, \mu_{Y'}(y) = \top(\mu_{A'^1}(y), \ldots, \mu_{A'^N}(y)) \tag{4.13}$$

  avec $\top$ la T-norme Min et N est le nombre de règles activé.

  2. Par T-conorme : la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou Y', qui est le résultat de l'agrégation, est définie de la manière suivante :

  $$\forall y, \mu_{Y'}(y) = \bot(\mu_{A'^1}(y), \ldots, \mu_{A'^N}(y)) \tag{4.14}$$

avec $\perp$ la T-conorme Max et N est le nombre de règles activées.

- *Défuzzification* : c'est l'opération qui, inversement à la fuzzification, consiste à transformer un nombre flou B' en une grandeur numérique y_0. Parmi les méthodes de défuzzification les plus répandues, nous pouvons citer :

  1. Centre de gravité (CG) : la défuzzification par centre de gravité consiste à calculer l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance selon la formule suivante :

$$y_0 = \frac{\int_Y y \cdot \mu_{B'}(y) dy}{\int_Y \cdot \mu_{B'}(y) dy} \tag{4.15}$$

  2. Premier Maximum :

$$y_0 = min\{z / \mu_{B'}(z) = Max\mu_{B'}(y)\} \tag{4.16}$$

  3. Dernier Maximum :

$$y_0 = Max\{z / \mu_{B'}(z) = Max\mu_{B'}(y)\} \tag{4.17}$$

  4. Centre Maximum : y_0 est l'abscisse du point correspondant au centre de l'intervalle pour lequel la fonction d'appartenance est maximale :

$$\begin{aligned} y_1 &= min\{z / \mu_{B'}(z) = Max\mu_{B'}(y)\} \\ y_2 &= Max\{z / \mu_{B'}(z) = Max\mu_{B'}(y)\} \\ y_0 &= \tfrac{y1+y2}{2} \end{aligned} \tag{4.18}$$

Comme nous l'avons vu précédemment, les règles font intervenir plusieurs types d'opérateurs flous comme *min*, *max*, etc. (voir tableau 4.1). Plusieurs méthodes d'inférences sont proposées, se basant sur ces différents types. Dans le paragraphe suivant, nous ne présentons que les plus utilisées : Mamdani, Larsen et Takagi-Sugeno.

4.3.2.1 Méthode de Mamdani

La méthode développée par Mamdani (Mamdani, 1974), connue sous le nom Max-Min, déclenche les règles selon les degrés d'appartenance de leurs prémisses. Elle se caractérise par le choix de l'opérateur min pour l'implication et pour la conjonction "ET". Considérons les règles suivantes :

R_1 : **Si** d_{81} est Faible **ET** d_{82} est Faible **ET** g_1 est Moyen **ET** e_1 est Moyen **ALORS** $Variation_g_1$ = ZE

R_2 : **Si** d_{81} est Moyen **ET** d_{82} est Moyen **ET** g_1 est Fort **ET** e_1 est Faible **ALORS** $Variation_g_1$ = PS

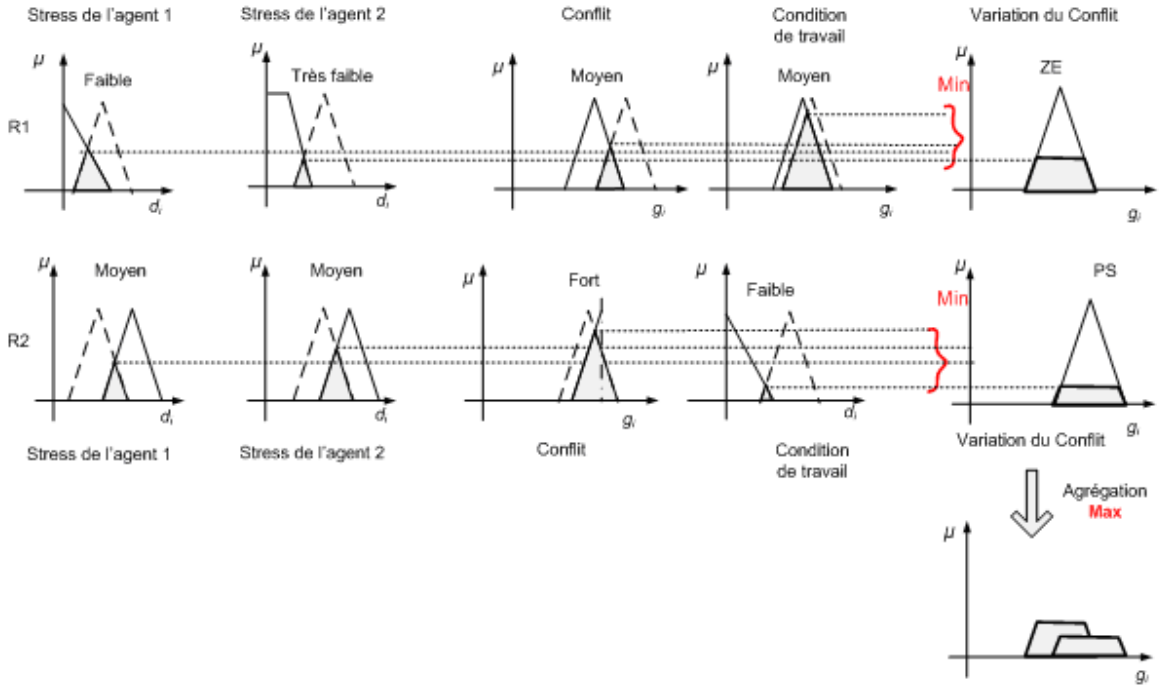


FIG. 4.24 – Méthode d'inférence de Mamdani.

Considérons les observations :$d_{81}^{obs}, d_{82}^{obs}, g_1^{obs}$ *et* e_1^{obs}. Le raisonnement flou se décompose comme suit :

1. Calcul du degré d'activation de chaque règle :

$$\alpha_{R_1} = min(\mu_{Faible}(d_{81}^{obs}), \mu_{Faible}(d_{82}^{obs}), \mu_{Moyen}(g_1^{obs}), \mu_{Moyen}(e_1^{obs})) \quad et$$

$$\alpha_{R_2} = min(\mu_{Moyen}(d_{81}^{obs}), \mu_{Moyen}(d_{82}^{obs}), \mu_{Fort}(g_1^{obs}), \mu_{Faible}(e_1^{obs}))$$

2. Calcul de l'implication :

$$\mu_{I_1} = min(\alpha_{R_1}, \mu_{ZE}(Variation_g_1))$$

$$\mu_{I_2} = min(\alpha_{R_2}, \mu_{PS}(Variation_g_1))$$

3. Calcul de l'agrégation pour former la conclusion finale floue C :

$$\mu_C = max(\mu_{I_1}, \mu_{I_2})$$

Le processus d'inférence de Mamdani est illustré dans la figure 4.24.

4.3.2.2 Méthode de Larsen

De la même manière, cette méthode utilise l'opérateur "Min" pour définir la conjonction "ET" et "Max" pour l'opérateur "OU" et pour l'agrégation. Cette méthode utilise le produit pour

définir la conclusion plutôt que d'utiliser l'opérateur Min. Ainsi la fonction d'appartenance de l'implication est définie comme suit :

$$\mu_{R_1}(d_{81}^{obs}, d_{82}^{obs}, g_1^{obs}, e_1^{obs}, Variation_g_1) = \mu_{R_1}(d_{81}^{obs}, d_{82}^{obs}, g_1^{obs}, e_1^{obs}) \cdot \mu_{Moyen}(Variation_g_1) \tag{4.19}$$

avec $d_{81}^{obs}, d_{82}^{obs}, g_1^{obs}$ *et* e_1^{obs} les degrés observés (données expérimentales).

La représentation graphique de ce type d'inférence est donnée dans la figure 4.25.

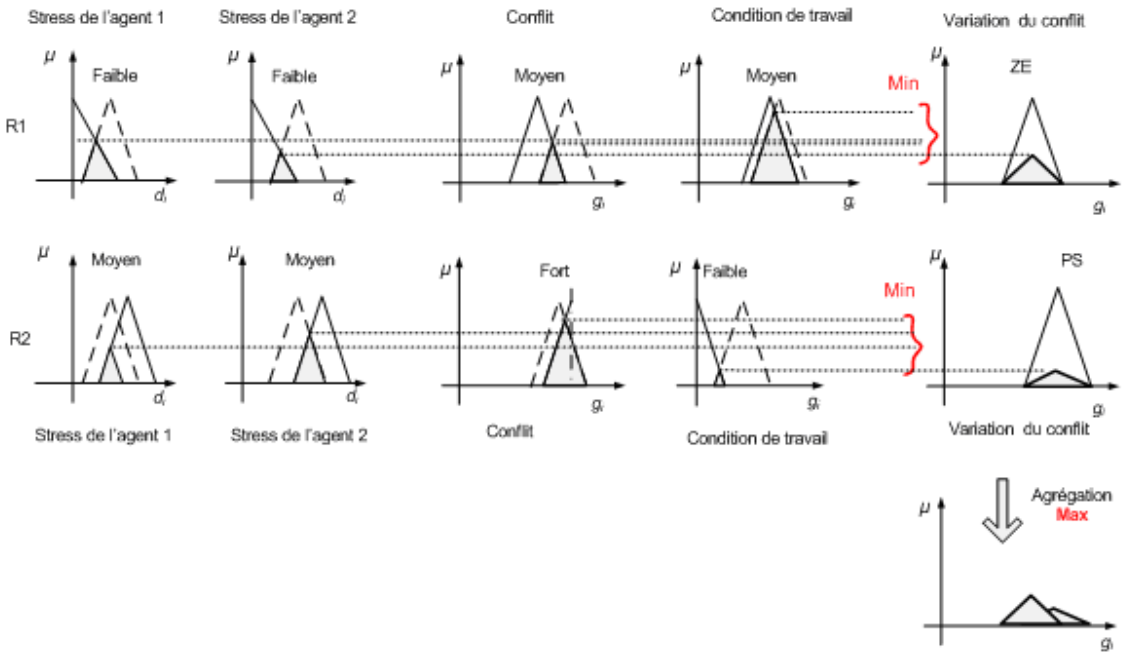


FIG. 4.25 – Méthode d'inférence de Larsen.

4.3.2.3 Méthode de Takagi-Sugeno

Contrairement au système d'inférence de type Mamdani, la conclusion d'un système Takagi-Sugeno est une fonction des entrées. Ainsi, les règles ont la forme suivante :

$$\text{R1} : \quad \textbf{SI } x_1 \text{ est } A_{11} \textbf{ ET } \ldots \textbf{ET } x_m \text{ est } A_{1m} \textbf{ ALORS } y_1 = f_1(x_1, \ldots, x_m)$$

La valeur réelle finale de la sortie est déduite à partir des n règles du système de la manière suivante :

1. Calcul du degré d'activation de chaque règle qui correspond tout simplement à la fonction d'appartenance de la règle. En utilisant l'opérateur de Larsen (produit), le degré est donné par :

$$\alpha_{R_i}(x) = \mu_{R_i}(x) = \prod_{j=1}^{m} \mu_{A_{ij}}(x); \quad i = 1..n$$

2. Calcul de l'implication :

$$y^i = \alpha_{R_i}(x) \times f_i(x_1, \ldots xm)$$

3. La sortie finale est calculée comme la moyenne des sorties des règles, pondérées par le poids α_{R_i} selon la formule suivante :

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{n} y^i}{\sum_{i=1}^{n} \omega_{R_i}(x)} \tag{4.20}$$

4.3.2.4 Implémentation du système proposé

Étudions l'exemple du graphe de la figure 4.22 qui représente la relation de conflit entre deux agents. La description floue de la partie psychologique, abordée dans la première partie de ce chapitre, est implémentée sous Matlab. De la même manière, le système d'inférence flou est implémenté en utilisant l'éditeur FIS (Fuzzy Inference System) du même outil Matlab (figure 4.26).

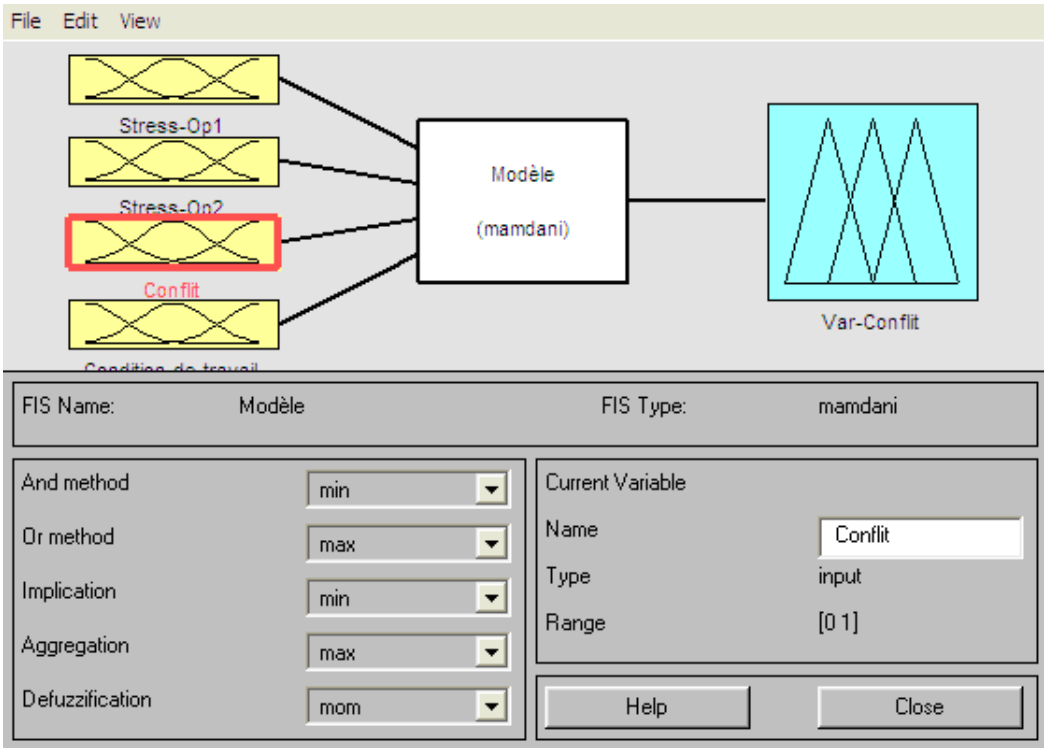


FIG. 4.26 – Editeur FIS.

Nous avons choisi la méthode Mamdani (ou Max-Min) pour implémenter le système d'inférence proposé pour sa simplicité de mise en oeuvre et pour la méthode de défuzzification utilisée, basée sur le Centre Maximum.

Le système d'inférence utilisé est composé de 29 règles ayant la forme (4.21). Elles décrivent la variation du degré du conflit qui dépend, d'abord de son niveau actuel et ensuite du stress des deux agents et des conditions de travail, c'est-à-dire, les événements perturbateurs ou les décisions des managers.

Le conflit peut avoir des impacts sur certains facteurs psychologiques (par exemple sur le stress) ou sur d'autres facteurs psychosociaux (par exemple sur la communication). Par conséquent, la sortie du système d'inférence est directement liée aux d'autres facteurs du modèle. Dans cet exemple, le système d'inférence, déterminant la variation du conflit, est connecté à l'environnement de travail. La sortie du système est injectée à l'entrée pour simuler la boucle d'auto-régulation de conflit. Notons aussi que la sortie du système d'inférence correspond aux matrices T et Tp qui modélisent, respectivement, l'influence du conflit sur les facteurs psychologiques et sur les autres facteurs psychosociaux étudiés dans le modèle numérique (paragraphe 3.3.1.1) du chapitre 3.

$$R1 : \textbf{SI } d_{51} \textit{ est Moyen } \textbf{ET } d_{52} \textit{ est Moyen } \textbf{ET } e_1 \textit{ est Fort } \textbf{ET } g_1 \textit{ est Moyen } \textbf{ALORS } \textit{variation_}g_1 \textit{ est PB} \tag{4.21}$$

La construction de tels systèmes d'inférence passe toujours par la transcription d'une expertise humaine sous la forme de règles floues. Comme ces dernières sont exprimées dans un langage naturel en utilisant des termes linguistiques, elles sont facilement formulables (dans certains domaines) par les experts en utilisant des termes qualitatifs flous. Cependant, l'une des difficultés rencontrées dans cette partie réside dans la construction des règles du système. Les psychosociologues sont parfois incapables de décrire d'une manière explicite, avec des règles floues, l'évolution de certaines relations psychosociales et leur dépendance avec d'autres facteurs comportementaux.

Une deuxième méthode consiste à générer les règles à partir des résultats des expériences menées dans des environnements réels, c'est l'apprentissage de systèmes d'inférences floues. Cette étape est l'une des étapes critique de toute la procédure de simulation des relations sociales. Les règles floues générées selon des environnements spécifiques doivent être généralisées afin de décrire d'autres conditions plus complexes représentant le comportement réel des opérateurs. En outre, la définition des supports des prémisses et de la conclusion des règles est une étape décisive dans la construction du système. Des nombres flous ayant des supports de petite dimension impliquent un nombre élevé de règles ce qui peut diminuer la pertinence de la sortie du système d'inférence. Le système de règles peut être validé en comparant les résultats obtenus avec ceux de séries d'expériences effectuées avec les opérateurs.

Dans cet exemple, les règles floues qui constituent le système d'inférence (figure 4.27) sont générées à partir d'une partie des résultats des expériences menées. La deuxième moitié des

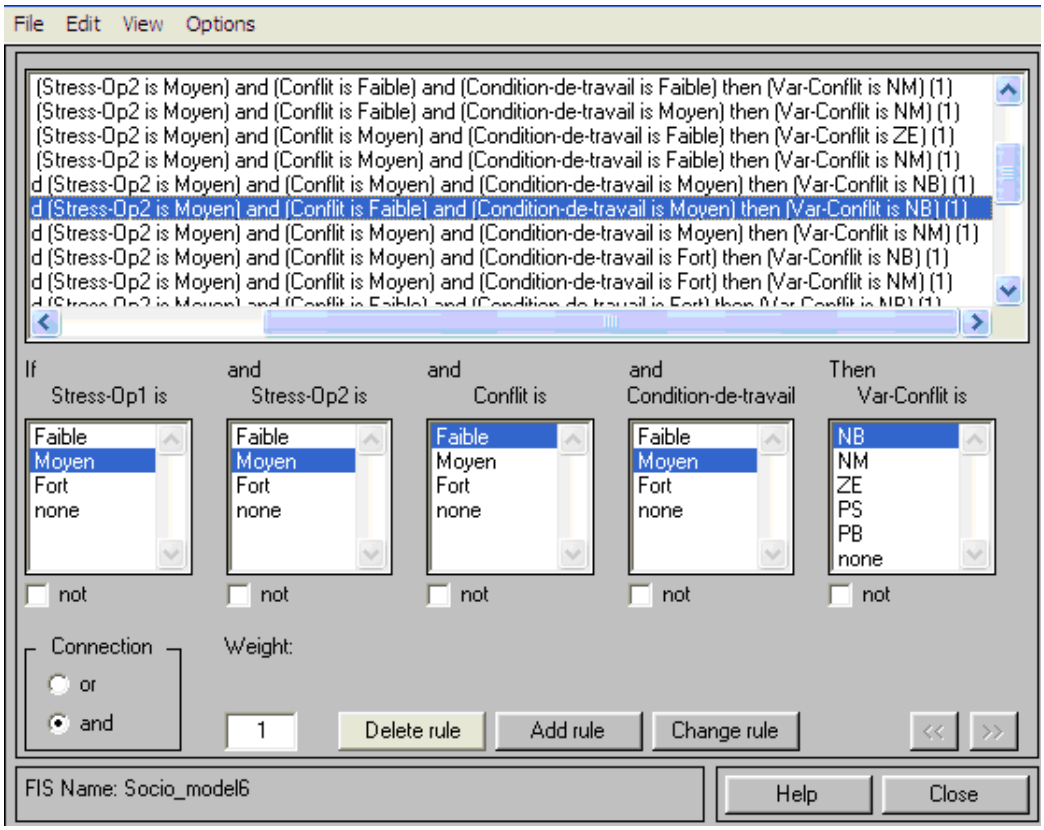


FIG. 4.27 – Ensemble de règles utilisées.

résultats a servi pour valider les règles construites en les confrontant aux résultats du système d'inférence.

Finalement, rappelons que les variables du modèle, qu'elles soient entrées ou sorties du système, ont une forme triangulaire. D'autres formes peuvent être utilisées puisque la précision des systèmes d'inférence flous est moins sensible à la nature de la fonction d'appartenance (Sugeno et Yasukawa, 1993). Les différentes valeurs linguistiques de la variation du conflit sont illustrées dans la figure ci-dessous. Dans cet exemple, seulement trois valeurs linguistiques sont proposées afin d'éviter un nombre trop élevé de règles floues (figure 4.28).

4.4 Exemple et résultats

Les surfaces de réponses, en n-dimensions, caractéristiques de ce système sont projetées sur deux axes (figure 4.29). Elles expriment les variations de la valeur réelle de la sortie du système, après défuzzification, en fonction des entrées quand ces dernières parcourent l'univers de discours. Rappelons que ces surfaces de réponses deviennent dans le modèle numérique (paragraphe 3.3.1.1) du chapitre 3 les fonctions $T()$ et $Tp()$.

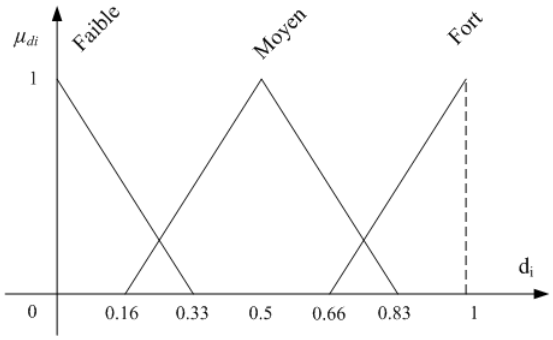


FIG. 4.28 – Valeurs linguistiques utilisées.

Les surfaces de la figure 4.29 illustrent les dépendances qui peuvent exister entre les entrées du système d'inférence (le niveau de stress des deux opérateurs, les conditions de travail et l'état précédent du conflit) et la variable de sortie qui est la variation du conflit. Par exemple, la figure 4.29.a illustre la variation du conflit entre les deux opérateurs Op1 et Op2 en fonction de leur niveau de stress. Constatons que la variation du conflit est étroitement liée au stress puisque pour de faibles degrés de stress (ou respectivement pour des degrés élevé), la variation du conflit est négative (respectivement positive). La figure 4.29.b représente l'effet du stress de l'opérateur Op1 et des conditions de travail sur la variation du conflit. La variation du conflit est fortement négative pour des niveaux de stress moyen et des conditions de travail assez bonnes.

Selon la figure 4.29.c les règles floues expriment l'étroite dépendance de la variation du conflit par rapport à son état précédent et aux conditions de travail. En effet, le conflit a toujours tendance à augmenter pour des mauvaises conditions de travail et il diminue (variation négative) lorsque le niveau de conflit est faible malgré les bonnes conditions de travail.

Considérons l'exemple illustratif de la figure 4.22, représentant le conflit entre deux opérateurs, avec le scénario suivant :

- À $t = 0$: condition initiale : Fatigue = 0.3 ; Effort = 0.2 ; Condition de travail = 0.3 ; Motivation = 0.2 ; Sentiment d'auto-efficacité= 0.5 ; imprécision= 0.2 ; Stress = 0.4 et conflit = 0.4.
- À $t = 3h$: Suite à un changement de série, la nouvelle tâche demande plus de capacité physique et le niveau de la difficulté de la tâche augmente de 20%. En parallèle, la qualité des conditions de travail chute de 30%. L'opérateur ne se sent pas en sécurité avec le nouvel environnement (machine moins sécurisée et donc risque de blessure).
- À $t = 4.5h$: Suite à ces problèmes, l'opérateur ne se sent plus à l'aise avec sa nouvelle tâche ce qui augmente l'imprécision d'une manière conséquente (augmentation de 40%).
- À $t = 5h$: Après l'intervention du service de maintenance pour sécuriser les machines, l'opérateur se sent plus en sécurité se qui améliore son sentiment d'auto-efficacité de 30%.

A ce scénario, nous ajoutons un événement à $t = 7h$ représentant l'amélioration des conditions

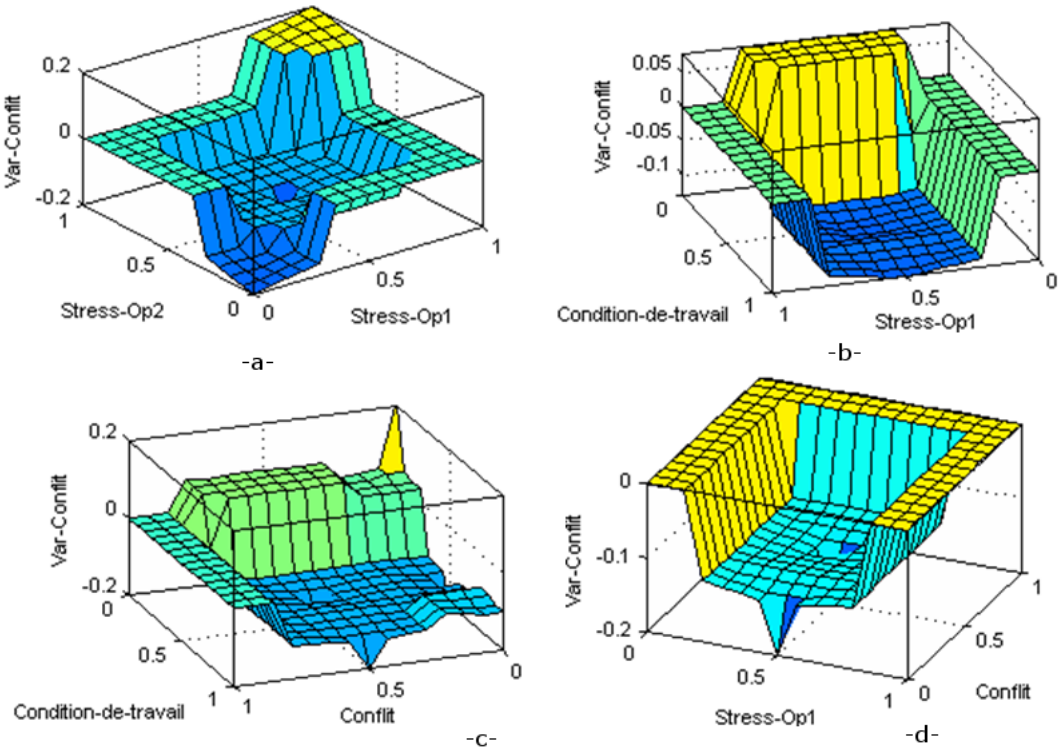


FIG. 4.29 – Surfaces de réponses.

de travail de 40% en améliorant, par exemple, le niveau d'hygiène de l'environnement de travail.

Le modèle Simulink associé à cet exemple avec le scénario considéré est représenté dans la figure 4.31. Après défuzzification de la sortie du système d'inférence, l'évolution du conflit entre les deux opérateurs est présentée dans la figure 4.30. En effet, le niveau du conflit, initialement moyen, diminue légèrement et à t= $3h$ le conflit augmente à cause de la chute de la qualité des conditions de travail. Le conflit continue à augmenter malgré l'intervention du service maintenance pour sécuriser les machines. Cependant, la décision prise par les responsables à t= $7h$ a permis à rétablir la relation entre les opérateurs exprimé par la diminution du conflit suite à l'amélioration des conditions de travail.

Dans cet exemple, nous avons considéré le modèle numérique pour décrire le comportement individuel de chaque opérateur et le modèle flou pour les relations sociales.

Finalement, il est important de souligner qu'il n'y pas de différence "théorique" entre le modèle numérique construit à partir de fonctions (R, T, Ts, Tp, S) choisies a priori ou construites à partir de règles floues (surfaces de réponses). En effet, les couplages entre les différents facteurs existent et seule la méthode de construction est totalement différente. Comme nous l'avons souligné au début de ce chapitre, les non-linéarités des relations de causalité sont plus simples à formuler avec un modèle numérique dans le cas de facteurs psychologiques que dans le cas de facteurs psychosociaux.

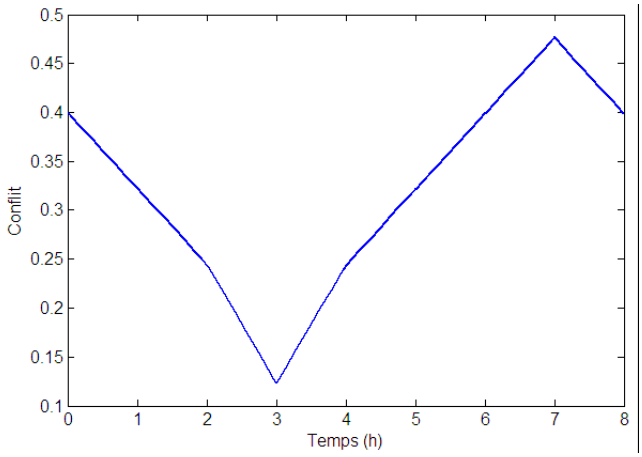


FIG. 4.30 – Évolution du conflit.

4.5 Conclusion

L'intégration de l'imprécision dans le modèle comportemental est assurée en utilisant la théorie des sous-ensembles flous et la logique floue. Deux méthodes de simulation floue ont été présentées dans ce chapitre : la première consiste à utiliser les équations différentielles floues et la deuxième remplace les équations différentielles par un système d'inférence floue. Dans ce chapitre, les équations différentielles floues sont utilisées dans la partie psychologique alors que les règles floues sont utilisées pour décrire les relations sociales. Ce choix peut être justifié par la complexité de la quantification des facteurs sociaux par rapport aux facteurs psychologiques. Cependant, il est évident que les règles floues peuvent être utilisé aussi pour décrire l'évolution des facteurs psychologiques puisque la traduction de l'expertise humaine en règles est plus "facile" à réaliser.

L'étape suivante consiste à valider le modèle proposé par une série d'expériences réalisées avec les opérateurs ou les individus concernés. Le chapitre suivant décrit un cadre expérimental aboutissant à la vérification de l'applicabilité de l'approche.

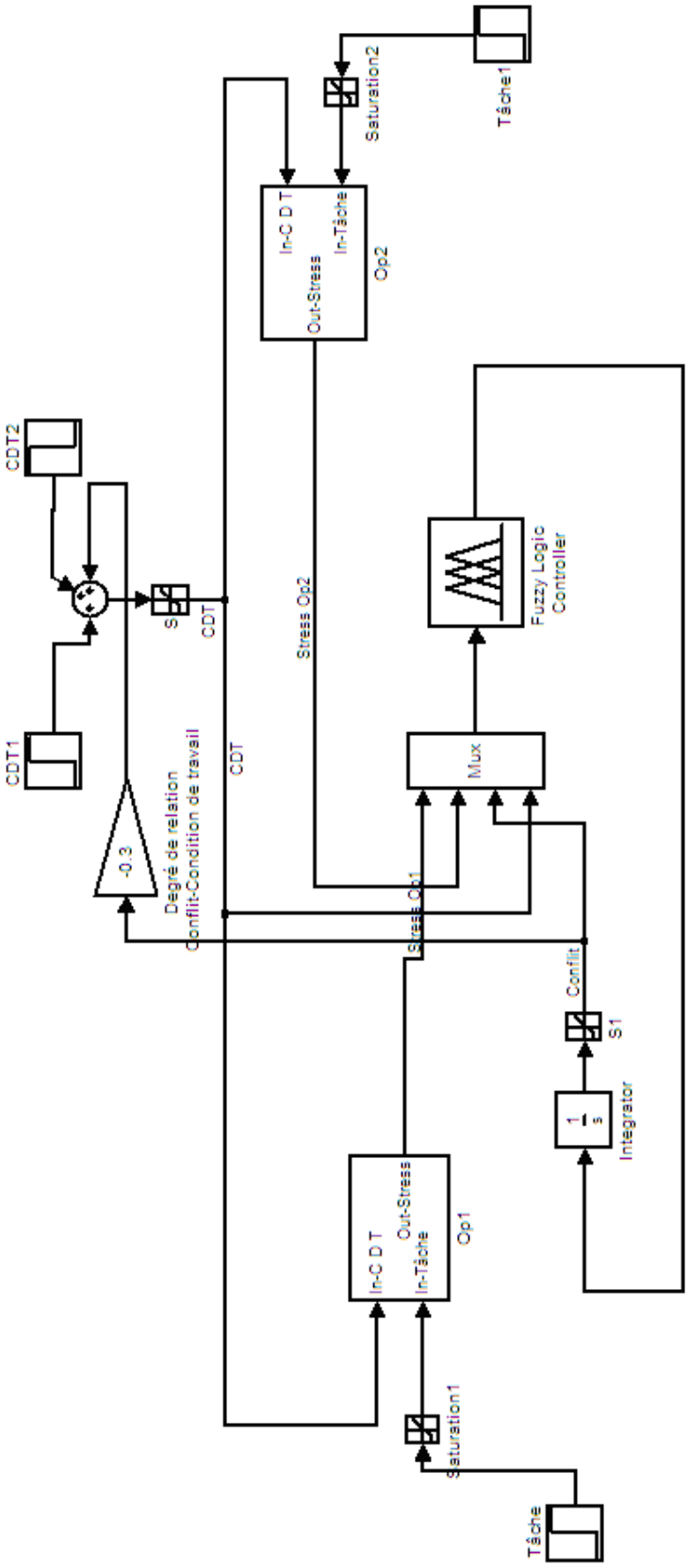


FIG. 4.31 – Modèle Simulink correspondant à l'exemple de la figure 4.22.

Chapitre 5

Expérimentation et validation

Sommaire

5.1 Introduction 108
5.2 Processus de validation 108
5.3 Procédure expérimentale 109
5.3.1 Maquette informatique: un environnement de travail virtuel 109
5.3.2 Déroulement de l'expérience 112
5.4 Évaluation des facteurs psychologiques 113
5.5 Recueil des données et résultats 114
5.5.1 Validation des questionnaires 115
5.5.1.1 Premier questionnaire 115
5.5.1.2 Deuxième questionnaire 117
5.5.1.3 Troisième questionnaire 119
5.5.2 Analyse des résultats 121
5.6 Construction du modèle 124
5.7 Conclusion 128

5.1 Introduction

La modélisation présentée dans les chapitres précédents (3 et 4) reste théorique et doit être confrontée aux données réelles pour la valider et l'améliorer. Pour cela, nous présentons dans ce chapitre la procédure expérimentale menée et la phase d'identification nécessaire à la construction du modèle à partir des résultats recueillis. Enfin, il est important de souligner que Pierre-Jean Marescaux, maître de conférences en psychologie au LAPSCO[12], nous a accompagné tout au long de la phase expérimentale et du traitement des données afin de les mener selon les règles de l'art.

5.2 Processus de validation

En se basant sur des données expérimentales issus d'un environnement industriel ou virtuel, la construction d'un modèle spécifique à partir du modèle générique passe par deux étapes. La première est l'*identification* des paramètres du modèle qui consiste d'abord a vérifier l'existence des arcs du graphe et ensuite déterminer leur valuation. La seconde est la *validation* du modèle pour en vérifier la robustesse. Dans ce travail, ces deux phases sont basées sur une séries d'expériences réalisées dans des conditions parfaitement maîtrisées. Cependant, d'autres expériences sont obligatoire pour avoir un modèle valide et fiable.

Le contexte choisi est celui du contrôle de la qualité de produits. L'objectif est alors d'étudier l'évolution de quelques facteurs comportementaux et leur relation avec des critères de performance.

La première étape dans la procédure de construction du modèle de comportement consiste à cibler et classifier tous les individus concernés par cette étude. Cette phase est indispensable puisque le comportement d'opérateurs effectuant une tâche manuelle, par exemple, diffère de celui des personnels administratifs. Ces derniers ne sont pas soumis au même environnement de travail. Le modèle de comportement change selon le type d'environnement et de tâche. Ensuite, le modélisateur doit établir une liste de facteurs psychologiques à étudier et à intégrer dans le modèle. En même temps, un cadre expérimental doit être défini afin de récupérer le plus de résultats facilitant l'élaboration du modèle.

En raison de la difficulté à maîtriser un cadre réel, c'est-à-dire un environnement de travail industriel, nous avons développé une maquette informatique simulant un environnement de travail avec quelques perturbations. L'avantage de l'utilisation d'un tel cadre de simulation est de maîtriser l'expérience et d'éliminer les facteurs non contrôlables.

Une fois le cadre expérimental bien défini, il doit être testé par des individus concernés (s'il s'agit d'un cadre réel) ou par des candidats volontaires (s'il s'agit d'un cadre artificiel). Durant l'expérimentation, un ensemble de mesures et de tests psychométriques (questionnaires)

[12]Laboratoire de Psychologie Sociale et Cognitive, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand

est effectué pour la quantification des éléments psychologiques. Ensuite, une analyse de cohérence doit être effectuée sur ces mesures pour rejeter les résultats non pertinents.

À la suite de cette étude statistique, les items présentant des corrélations faibles avec l'ensemble de l'échelle doivent être éliminés. Enfin, la dernière étape consiste à déterminer, à partir des résultats des expériences et des réponses aux questionnaires, les paramètres du modèle après un processus d'identification, détaillé dans le paragraphe 5.6.

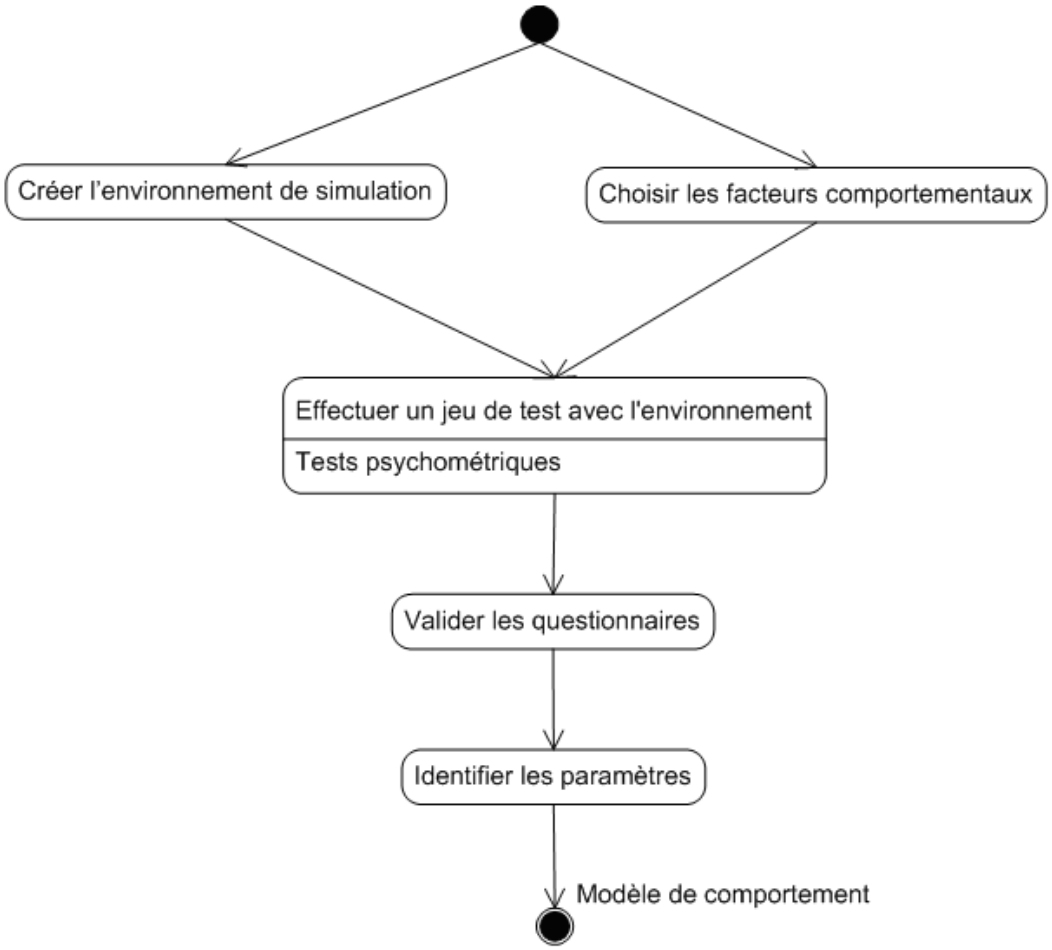


FIG. 5.1 – Les différentes étapes pour la construction du modèle.

5.3 Procédure expérimentale

5.3.1 Maquette informatique : un environnement de travail virtuel

Nous avons souligné dans le paragraphe précédent qu'un environnement de travail virtuel a été développé vu la difficulté à maîtriser un environnement industriel réel. Ainsi, une application informatique a été développée (figure 5.2), simulant un contexte de contrôle de la qualité

des produits, et permettant, d'une part, la représentation d'un environnement de travail avec certaines perturbations et, d'autre part, le test des hypothèses et du modèle comportemental proposé dans le chapitre 3. Soulignons que la définition du cahier de charge de cette maquette a été faite en coopération avec Mr. Pierre-Jean Marescaux qui a apporté des remarques et suggestions très pertinentes pour intégrer dans la maquette des éléments stimulant le comportement des utilisateurs.

Avec cette application, développée en Visual Basic et en communication avec un classeur Excel contenant les paramètres des scénarios à tester, nous simulons une tâche de contrôle de qualité dans une entreprise. Elle simule un flux continu de pièces avec un certain taux de défaut précisé à l'avance. Les utilisateurs doivent alors détecter les pièces défectueuses en appuyant sur des boutons du clavier. L'interface créée doit être suffisamment ergonomique pour ne pas biaiser les tests psychométriques qui sont effectués pour quantifier les facteurs psychologiques.

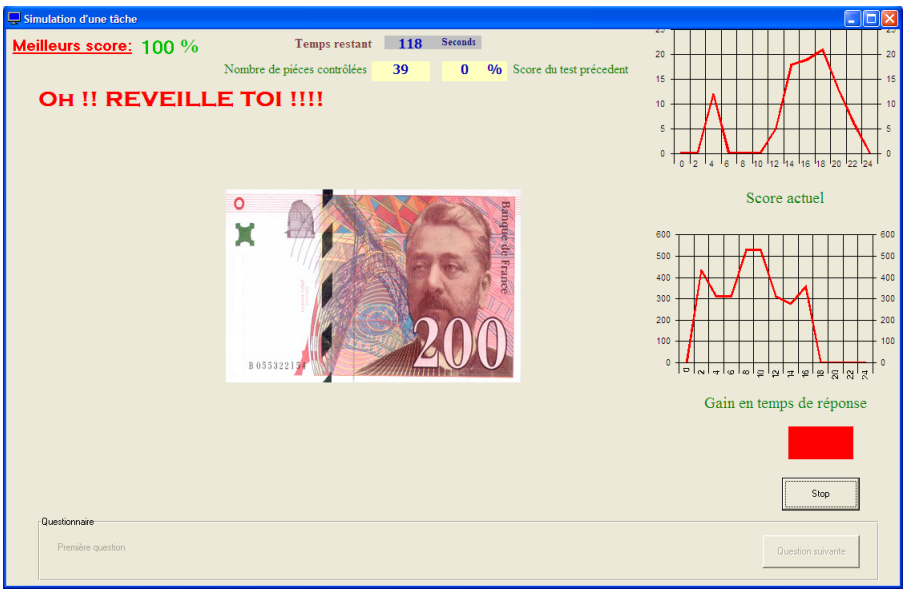


FIG. 5.2 – Maquette de simulation.

Dans une première série d'expériences, les produits à contrôler étaient des téléphones portables. Cependant, les résultats obtenus n'étaient pas assez pertinents pour permettre la construction et la validation du modèle de comportement des utilisateurs vu que les performances étaient assez élevées en raison de la simplicité du produit et des défauts. Dans la deuxième série d'expériences, le produit considéré est un billet de banque (figure 5.3) avec plusieurs types de défauts possibles. Le choix de ce produit s'explique par le fait que la tâche est rendue plus difficile, vu la complexité de la scène, permettant ainsi de stimuler le comportement des utilisateurs. La figure suivante présente les zones du billet où peuvent s'introduire des erreurs de fabrication. Elles varient durant la simulation afin que l'utilisateur ne se mette pas dans un certain état de monotonie. De cette manière, le candidat doit être vigilant et concentré tout au long de l'expérience.

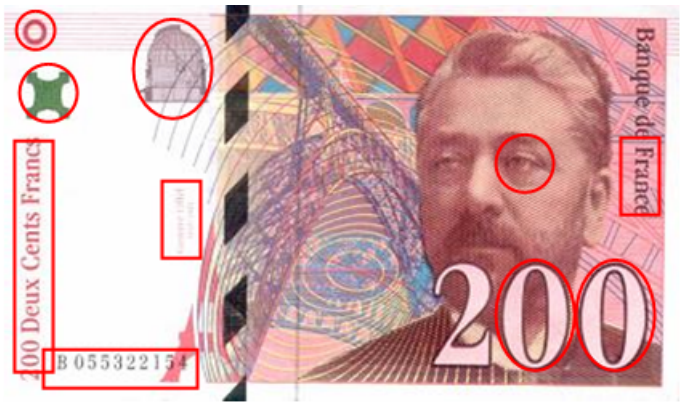


FIG. 5.3 – Billet de banque avec les types de défaut.

La procédure expérimentale consiste à afficher sur l'écran soit l'image d'un billet sans défaut, soit celui d'un billet présentant certaines anomalies de manière aléatoire tout en respectant des probabilités fixées dans le scénario. La position exacte de l'image sur l'écran est rendue également aléatoire, avec pour restriction un balayage horizontal dans la fenêtre simulant la prise de vue sur un convoyeur en défilement rapide. La tâche consiste alors à trier les billets en appuyant sur les touches "b" - pour *bon* - ou "m" - pour *mauvais* - durant la présentation "sans défaut" ou "avec défaut" respectivement. Il est important de noter que les défauts possibles doivent être montrés aux utilisateurs avant le début de l'expérience pour qu'ils se familiarisent avec l'environnement.

L'interface graphique de l'application informatique est conçue de manière à stimuler la motivation et le stress de l'utilisateur. Elle permet de visualiser les deux critères de performance de chacun qui sont le pourcentage de bonnes réponses et le gain en temps de réponse. Ces deux informations sont aussi illustrées dans l'interface sous forme de courbe pour mettre l'accent sur l'historique des résultats. Cet affichage joue un rôle très important sur la stimulation du comportement des utilisateurs puisqu'il constitue un élément de rétroaction qui peut être positif ou négatif. Le meilleur score est aussi représenté afin d'intégrer dans le jeu l'aspect de "*comparaison sociale*" qui peut influer les performances des utilisateurs tout en créant, dans certains cas, une ambiance tendue ou de compétitivité entre les utilisateurs.

Afin de motiver les utilisateurs pendant le jeu, des phrases d'encouragement apparaissent en fonction du score effectué comme "Allez, tu peux mieux faire ! !" pour des scores moyens et "C'est bien, continue !" pour les meilleurs. Dans le monde réel, les responsables d'entreprises sont toujours amenés à encourager et motiver les opérateurs ne serait-ce que par des phrases anodines.

Des événements perturbateurs sont aussi intégrés dans ce cadre expérimental sous la forme d'effets sonores qui sont activés dès que les performances diminuent pour créer un facteur de stress influant encore le comportement. Le stress est aussi stimulé par les niveaux de difficulté considérés dans les scénarios testés en augmentant la cadence d'apparition des pièces ainsi que le nombre de défauts.

Finalement, un indicateur lumineux a été ajouté à l'interface permettant à l'utilisateur de contrôler ses choix. Il est vert s'il a répondu correctement et devient rouge dans le cas contraire ou s'il ne répond pas. Malgré sa simplicité, cet indicateur est considéré comme un élément perturbateur parce qu'il déconcentre les utilisateurs en changeant de couleur.

5.3.2 Déroulement de l'expérience

Comme le montre le diagramme de la figure 5.4, chaque utilisateur testera plusieurs scénarios avant de passer la main à son collègue. Les scénarios sont programmés afin d'avoir des niveaux de difficulté variés. Après chaque scénario, l'utilisateur doit répondre à un ensemble de questions permettant de mesurer sa perception de certains facteurs psychologiques comme la motivation, le stress ou la fatigue.

Chaque scénario est défini par :

- La cadence d'apparition de chaque produit ;
- Les probabilités cumulées d'apparition de chaque défaut ;
- La durée de déroulement du scénario ;
- Le nombre de pièces défectueuses ;
- Les listes de questions ;

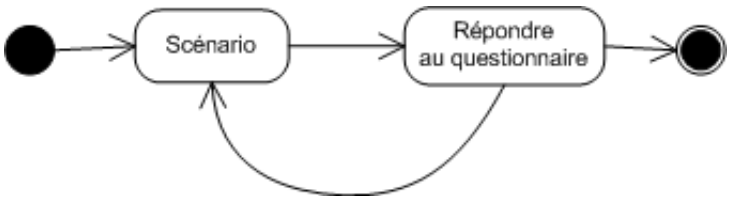


FIG. 5.4 – Déroulement de la simulation pour chaque utilisateur

Dans les expériences qui ont été menées, 6 scénarios ont été proposés avec des niveaux de difficulté différents, c'est à dire, des cadences d'apparition et des nombres de défauts plus ou moins élevés. Chaque scénario dure 2 minutes et est suivi par un questionnaire. Dans notre cas, deux critères de performance sont considérés : le pourcentage de bonnes réponses (ou de bonnes sélections) et le gain en temps de réponse. Toute erreur de classification est signalée par une alerte sonore émise par l'application. De plus, toute réponse donnée trop tardivement est considérée comme une erreur réduisant la performance et est accompagnée par un signal sonore. Les performances individuelles et la performance de l'équipe seront affichées sur l'écran en temps réel. Un utilisateur est alors considéré comme performant s'il classifie correctement les billets tout en restant rapide.

L'application est liée à un classeur Excel contenant les différents paramètres de chaque scénario de l'expérience et les questionnaires. Les performances individuelles et de l'équipe ainsi que les réponses aux questionnaires sont aussi enregistrées. Ces données sont traitées plus tard pour

étudier et analyser l'impact des aspects psychologiques et émotionnels sur le rendement.

5.4 Évaluation des facteurs psychologiques

Comme indiqué ci-dessus, des questionnaires sont utilisés dans cette expérimentation pour évaluer l'impact de l'évolution des éléments cognitifs et émotionnels sur la performance. Les données recueillies seront utilisées pour élaborer et valider un graphe de comportement dont les nœuds sont les facteurs humains étudiés. Une fois le modèle validé, il pourra être utilisé comme un outil pour l'étude de l'impact d'éventuelles perturbations externes sur la productivité. De même, il pourra aider les managers à choisir les actions utiles pour remédier à des éventuels problèmes. Les *actions de pilotage* seront intégrées dans le modèle de simulation afin de voir leurs impacts sur l'évolution du comportement des opérateurs.

Les facteurs psychologiques que nous avons considérés dans ce test sont : la motivation, le stress et la fatigue, souvent estimés comme les plus influents sur la performance. Dans l'évaluation de la motivation, du stress et de la fatigue par questionnaire, nous avons choisi de proposer trois versions différentes (tableau A.1-A.3) et non une seule pour tous les scénarios. Ainsi, nous pouvons éliminer, après le recueil des résultats des expériences, les items incohérents et ne présentant aucune corrélation avec le reste du questionnaire. Ainsi, nous diminuons le risque d'avoir des résultats biaisés. En plus, les questionnaires sont proposés aux étudiants comme suit :

- Questionnaire 1 : proposé à la suite du premier et du quatrième scénario ;
- Questionnaire 2 : proposé à la suite du deuxième et du cinquième scénario ;
- Questionnaire 3 : proposé à la suite du troisième et du sixième scénario ;

L'administration des questionnaires dans cet ordre est justifié par la volonté de diminuer le risque de réponse biaisées en évitant de présenter le même questionnaire à la suite de deux scénarii successifs. Ainsi, les étudiants risquent moins de s'habituer avec les items et, donc, les réponses ne seront pas biaisées.

Les utilisateurs doivent répondre par un nombre sur une échelle de 1 à 5 pour chaque item. Ce nombre indique à quel point un candidat est d'accord avec chacun des items. Ainsi, 0 signifie "*Non, pas du tout !*" alors que 5 veut dire "*Oui, tout à fait !*". Nous nous sommes limité à 5 pour que l'utilisateur n'hésite pas trop et n'aie pas une trop grande palette de réponse. Notons aussi que chaque questionnaire est utilisé dans deux scénarios puisque le nombre de scénarios proposé à chaque candidat est 6. Un superviseur doit accompagner les étudiants pour les aider d'abord à la prise en main de l'outil et ensuite pour noter toutes leurs remarques ainsi que leurs gestes qui peuvent être considérés lors de la quantification finale de chaque facteur comportemental.

Chaque questionnaire est décomposé en 3 parties différentes constituées chacune de 5 items correspondant à chaque facteur. Lorsque les utilisateurs doivent répondre au questionnaire, nous avons pris la précaution de mélanger les items pour ne pas biaiser les réponses.

Certains items de la partie associée à la motivation sont pris de l'échelle proposée par Guay

et al. (Guay *et al.*, 2003) et adaptée à notre contexte. Cette échelle mesure la motivation globale des gens pour mener des actions dans leur vie quotidienne. On y retrouve 7 composantes : la motivation intrinsèque à la connaissance, à l'accomplissement et à la stimulation, les régulations externes, introjectées et identifiées et finalement l'amotivation. On retrouve 28 énoncés, soit 4 énoncés pour chacune des 7 sous-échelles. Chaque énoncé est mesuré sur une échelle de 1 à 7 points.

De la même manière, on s'est inspiré de l'échelle proposée par Bailly et al. (Bailly *et al.*, 2004) pour proposer un questionnaire évaluant le niveau de stress. L'échelle proposée par Bailly a été élaborée pour évaluer l'intensité du stress ressenti par les patients adultes hospitalisés. Dans une version initiale, il comportait 49 items explorant des facteurs stressants spécifiquement rencontrés à l'hôpital.

Enfin, le niveau de chaque élément comportemental est déterminé par la moyenne des réponses des différents items associés et de la note que donnera le superviseur afin d'assurer une meilleure objectivité dans les évaluations.

Le deuxième type de mesure utilisé dans le cadre de cette expérience est l'enregistrement des facteur physiologiques. En effet, comme nous l'avons évoqué ci-dessous, la quantification de certains facteurs psychologique avec des questionnaires ne suffit pas. Pour cela, nous avons décidé d'intégrer la mesure du pouls et de la tension de quelques candidats au début et à la fin de la simulation. Ces sont des données correctives qui permettent d'avoir des résultats physiologiques pouvant être utilisés avec les réponses des questionnaires pour évaluer le stress. Une augmentation du stress entraîne une augmentation de la tension. Les mesures de tension et de pulsations effectuées en début et en fin de la simulation ont donc un réel intérêt pour porter un jugement sur la réalité de l'évaluation du paramètre "stress".

Le stress passe aussi par l'observation du sujet, un individu stressé ayant toujours tendance à externaliser son état inconsciemment. En effet, les gestes comme croiser les jambes, serrer les bras contre la poitrine, coincer une mèche de cheveux derrière l'oreille ou se gratter le menton traduisent les émotions les plus secrètes. Le tableau A.4 (annexe A) présente les différents gestes contrôlés qui vont être utilisés pour confirmer les réponses des candidats aux questionnaires.

5.5 Recueil des données et résultats

31 élèves-ingénieurs volontaires de l'Institut Français de Mécanique Avancée (IFMA), ayant un âge moyen 22 ans, ont été sollicités pour participer à l'expérience. De plus, 6 scénarios successifs ont été proposés pour chaque étudiant avec des niveaux de difficultés croissants se traduisant par une cadence d'affichage des images de billets de banque de plus en plus élevées et par une augmentation des nombres de défauts à détecter. Le but de ces expériences est d'étudier l'interaction entre les trois facteurs psychologiques, la motivation, le stress et la fatigue, ainsi que leur impact sur la performance. Pour ce dernier, la performance est définie par deux critères qui sont

le taux de bonne sélection et le gain en temps de réponse.

Bien que les items proposés soient pris d'échelles (questionnaires) validées, il est indispensable de vérifier la cohérence interne de chaque partie évaluant un aspect comportemental. Dans le paragraphe suivant, les données recueillies à l'aide des trois questionnaires seront traités afin de supprimer les items ne présentant pas de corrélations avec le reste. Ainsi, l'évaluation de chaque facteur sera basée uniquement sur les items retenus. Dans cette phase aussi, Mr. Pierre-Jean Marescaux nous a accompagné dans l'étude de la cohérence des questionnaires.

5.5.1 Validation des questionnaires

Parmi les réponses recueillies, celles de 5 candidats sont rejetées à cause du manque de réponses ou d'erreurs introduites. Il s'agit donc de $156 = 26 * 3$ (nombre de questionnaires) * 2 (chaque questionnaire est utilisé deux fois) questionnaires à traiter. Par conséquent, la suppression d'items incohérents et la validation des questionnaires sont basées sur les 156 réponses récupérées. Le chapitre 1 traite les principales méthodes utilisées pour la validation des questionnaires.

5.5.1.1 Premier questionnaire

Dans ce paragraphe, nous étudions le premier questionnaire (tableau A.1 de l'annexe A) qui a été proposé aux candidats au premier et au quatrième scénario. Le but est alors d'évaluer le niveau de chaque facteur psychologique en se basant des résultats recueillis et en supprimant les items incohérents.

Le tableau 5.1 présente quelques résultats de l'analyse qui a été faite sur ce questionnaire. Nous trouvons ainsi la corrélation de chaque item avec l'ensemble des items de la même partie (troisième colonne). Les deux dernières colonnes sont les plus importantes qui présentent l'alpha de Cronbach de chaque partie en supprimant chaque item (quatrième colonne) et en considérant tous les items (cinquième colonne).

Concernant l'échelle de la motivation, nous constatons qu'il n'y aucune corrélation entre les items puisque les valeurs du coefficient de la cinquième colonne sont négatives ou comprises entre 0 et 0,12. Cette incohérence est confirmée par la valeur de l'alpha de Cronbach qui est également négative (alpha= -0,23) et même avec la suppression des items Q1Mo1 ou Q1Mo2, l'indice de cohérence reste faible. Ceci peut être expliqué par le fait que les candidats ne sont pas encore habitués à l'environnement. Il a été vérifié que seul la suppression des items Q1Mo1, Q1Mo2 et Q1Mo3 peut légèrement augmenter la cohérence du questionnaire avec un alpha de Cronbach qui atteint 0.31 ce qui reste insatisfaisant.

Ce même questionnaire est proposé aux candidats au quatrième scénario et le tableau 5.2 donne de meilleurs résultats. L'alpha de Cronbach de la partie motivation dans ce dernier questionnaire est nettement meilleur. Dans le scénario 4, l'indice de cohérence (alpha= 0,60) est acceptable pour pouvoir déterminer la motivation.

	Questions	Corrélation avec l'ensemble des items	Alpha de chaque facteur si l'item est supprimé	Alpha de chaque partie
Motivation	Q1Mo1	-0,22	0,02	-0,23
	Q1Mo2	-0,35	0,07	
	Q1Mo3	0,13	-0,70	
	Q1Mo4	0,01	-0,36	
	Q1Mo5	-0,05	-0,25	
Stress	Q1Str1	0,17	0,43	0,43
	Q1Str2	0,43	0,21	
	Q1Str3	0,21	0,39	
	Q1Str4	-0,07	0,56	
	Q1Str5	0,50	0,22	
Fatigue	Q1Fa1	0,05	0,53	0,46
	Q1Fa2	0,22	0,43	
	Q1Fa3	0,53	0,17	
	Q1Fa4	0,53	0,22	
	Q1Fa5	-0,01	0,57	

TAB. 5.1: Analyse des résultats du premier questionnaire avec le scénario 1 (N=26).

Quant à la partie du stress du premier questionnaire utilisé dans le premier scénario (tableau 5.1), les items sont moyennement corrélés puisque les valeurs de corrélation sont comprises entre 0,17 et 0,50. Néanmoins, l'item 4 ne possède aucune corrélation avec le reste et sa suppression augmente l'alpha de Cronbach qui passe de 0,433 à 0,56. Cette constatation est confirmée par les résultats du quatrième scénario puisque la cohérence de l'échelle de stress devient beaucoup plus cohérente après la suppression de l'item 4. En effet, l'alpha de Cronbach passe de -0,04 à 0,56. Ainsi, l'évaluation du stress dans les scénarios 1 et 4 se base sur les items Q4Str1, Q4Str2, Q4Str3 et Q4Str5.

Enfin, la partie consacrée à l'évaluation de la fatigue du questionnaire présente une certaine homogénéité. Dans le premier scénario, les résultats montrent que la cohérence des items de la fatigue est à 0,46 mais elle augmente en supprimant l'item 5 et devient 0,5684. Quant au quatrième scénario, le niveau de la fatigue se détermine en supprimant l'item 1 qui ne présente pas de corrélation avec l'ensemble de l'échelle (la corrélation est de -0,27).

Nous constatons que les résultats de l'analyse de fiabilité appliquée au questionnaire 1 sont différents après les deux scénarii. Cette différence est due d'abord au fait que les étudiants ne

sont pas encore habitués par l'environnement dans le premier scénario. Ensuite, le manque de cohérence de certaines parties du questionnaire explique aussi cette différence puisque des items incohérents proposés aux étudiants faussent les résultats.

	Questions	Corrélation avec l'ensemble des items	Alpha de chaque facteur si l'item est supprimé	Alpha de chaque partie
Motivation	Q4Mo1	0,26	0,58	0,60
	Q4Mo2	0,29	0,57	
	Q4Mo3	0,44	0,48	
	Q4Mo4	0,36	0,53	
	Q4Mo5	0,39	0,51	
Stress	Q4Str1	0,22	0,39	-0,0446
	Q4Str2	0,17	0,31	
	Q4Str3	0,08	0,17	
	Q4Str4	-0,60	0,56	
	Q4Str5	0,32	0,67	
Fatigue	Q4Fa1	-0,27	0,46	0,14
	Q4Fa2	0,44	-0,45	
	Q4Fa3	0,24	-0,10	
	Q4Fa4	-0,01	0,21	
	Q4Fa5	0,06	0,12	

TAB. 5.2: Analyse des résultats du premier questionnaire avec le scénario 4 (N=26).

5.5.1.2 Deuxième questionnaire

Dans ce questionnaire (tableau A.2 de l'annexe A), l'échelle associée à la motivation n'est pas bien posée puisque les items Q2Mo1 et Q2Mo5 (tableau 5.3) n'ont aucune corrélation avec le reste de l'échelle (-0,16 et -0,06) et dans le tableau 5.4, Q5Mo1 a une corrélation négative. De plus, l'alpha de Cronbach dans ces scénarios est faible (0,17 et 0,23). Cette cohérence augmente et atteint 0,4021 (tout en restant insuffisante) avec la suppression de l'item Q2Mo1 dans le deuxième scénario et l'item Q5Mo1 dans le cinquième pour atteindre une cohérence satisfaisante avec une valeur de 0,60.

Quant à l'échelle du stress, le tableau 5.3 montre que l'évaluation de ce facteur dans le scénario 2 nécessite la suppression de l'item Q2Str2 qui n'est pas corrélé avec l'ensemble des items (avec une valeur de -0,01) et que sa suppression augmente la cohérence qui passe à 0,58. Cette même

échelle est largement suffisante dans le scénario 5 (5.4) puisque sa cohérence est assez élevée (0,74) et ne nécessite aucune suppression. D'ailleurs, les items sont bien corrélés avec l'ensemble de l'échelle comme Q5Str2 et Q5Str3. Ainsi, l'évaluation du stress se base sur les items Q2Str1, Q2Str3, Q2Str4 et Q2Str5 dans le deuxième scénario et sur les cinq items initialement proposés dans le cinquième.

	Questions	**Corrélation avec l'ensemble des items**	**Alpha de chaque facteur si l'item est supprimé**	**Alpha de chaque partie**
Motivation	Q2Mo1	-0,16	0,40	0,17
	Q2Mo2	0,15	0,06	
	Q2Mo3	0,27	-0,08	
	Q2Mo4	0,28	-0,09	
	Q2Mo5	-0,06	0,28	
Stress	Q2Str1	0,32	0,38	0,48
	Q2Str2	-0,01	0,58	
	Q2Str3	0,21	0,47	
	Q2Str4	0,43	0,33	
	Q2Str5	0,41	0,32	
Fatigue	Q2Fa1	0,71	0,62	0,74
	Q2Fa2	0,48	0,71	
	Q2Fa3	0,57	0,67	
	Q2Fa4	0,37	0,7412	
	Q2Fa5	0,43	0,73	

TAB. 5.3: Analyse des résultats du deuxième questionnaire avec le scénario 2 (N=26).

La troisième partie de ce questionnaire, associée à la fatigue, est bien définie puisque les résultats des deux scénarios montrent une grande corrélation des items qui atteint 0,71 pour l'item Q2Fa1 et 0,70 pour l'item Q5Fa4. L'alpha de Cronbach confirme cette constatation puisqu'il est égal à 0,74 dans le tableau 5.3 et à 0,77 dans le tableau 5.4 et ainsi aucune suppression n'est nécessaire.

	Questions	Corrélation avec l'ensemble des items	Alpha de chaque facteur si l'item est supprimé	Alpha de chaque partie
Motivation	Q5Mo1	-0,38	0,60	0,23
	Q5Mo2	0,47	-0,22	
	Q5Mo3	0,01	0,30	
	Q5Mo4	0,59	-0,30	
	Q5Mo5	0,18	0,12	
Stress	Q5Str1	0,54	0,69	0,74
	Q5Str2	0,68	0,63	
	Q5Str3	0,61	0,66	
	Q5Str4	0,42	0,73	
	Q5Str5	0,3139	0,7615	
Fatigue	Q5Fa1	0,67	0,68	0,7717
	Q5Fa2	0,53	0,73	
	Q5Fa3	0,45	0,76	
	Q5Fa4	0,70	0,71	
	Q5Fa5	0,47	0,76	

TAB. 5.4: Analyse des résultats du deuxième questionnaire avec le scénario 5 (N=26).

5.5.1.3 Troisième questionnaire

Le troisième questionnaire (tableau A.3 de l'annexe A)que nous étudions dans ce paragraphe est utilisé dans le troisième et le sixième scénario. D'après les tableaux 5.5 et 5.6, les items de la motivation sont mal posés puisqu'il y a une grande incohérence de cette échelle qui se traduit par les deux valeurs d'alpha de Cronbach -0,12 (troisième scénario) et -0,24 (sixième scénario). La suppression d'un item n'améliore pas la qualité de la mesure puisque la cohérence atteint que 0,19 avec la suppression de Q3Mo4 (tableau 5.5) et 0,27 avec la suppression de Q6Mo3 (tableau 5.6). Cependant, il a été vérifié que l'indice de cohérence devient nettement supérieur après la suppression des items Q3Mo1, Q3Mo3 et Q3Mo4 dans le troisième scénario (alpha = 0,63) et des items Q6Mo3 et Q6Mo4 dans le sixième scénario (alpha de Cronbach = 0,58).

Contrairement à la motivation, la mesure du stress est nettement meilleure puisqu'elle présente une meilleure cohérence surtout après la suppression de l'item Q3Str1 (alpha de Cronbach=0,66) dans le scénario 3 et de l'item Q6Str3 (alpha de Cronbach=0,52) dans le scénario 6. L'évaluation du stress dans le premier cas se base sur les items Q3Str2, Q3Str3, Q3Str4 et Q3Str5 et sur Q6Str1, Q6Str2, Q6Str4 et Q6Str5 dans le deuxième.

	Questions	Corrélation avec l'ensemble des items	Alpha de chaque facteur si l'item est supprimé	Alpha de chaque partie
Motivation	Q3Mo1	0,10	-0,37	-0,12
	Q3Mo2	0,20	-0,50	
	Q3Mo3	-0,12	-0,01	
	Q3Mo4	-0,26	0,19	
	Q3Mo5	-0,09	-0,01	
Stress	Q3Str1	-0,34	0,66	0,34
	Q3Str2	0,49	-0,02	
	Q3Str3	0,20	0,25	
	Q3Str4	0,37	0,11	
	Q3Str5	0,39	0,14	
Fatigue	Q3Fa1	0,38	0,35	0,49
	Q3Fa2	0,41	0,36	
	Q3Fa3	0,30	0,4240	
	Q3Fa4	0,22	0,47	
	Q3Fa5	0,10	0,55	

TAB. 5.5: Analyse des résultats du troisième questionnaire avec le scénario 3 (N=26).

	Questions	Corrélation avec l'ensemble des items	Alpha de chaque facteur si l'item est supprimé	Alpha de chaque partie
Motivation	Q6Mo1	0,16	-0,70	-0,24
	Q6Mo2	-0,10	-0,17	
	Q6Mo3	-0,41	0,27	
	Q6Mo4	-0,12	-0,13	
	Q6Mo5	0,15	-0,63	
Stress	Q6Str1	0,01	0,48	0,39
	Q6Str2	0,32	0,22	
	Q6Str3	-0,02	0,52	
	Q6Str4	0,42	0,16	

Suite page suivante

	Questions	Corrélation avec l'ensemble des items	Alpha de chaque facteur si l'item est supprimé	Alpha de chaque partie
Suite ...				
	Q6Str5	0,39	0,19	
Fatigue	Q6Fa1	0,57	0,44	0,62
	Q6Fa2	0,311	0,60	
	Q6Fa3	0,71	0,35	
	Q6Fa4	0,30	0,60	
	Q6Fa5	0,04	0,71	

TAB. 5.6: Analyse des résultats du troisième questionnaire avec le scénario 6 (N=26).

Finalement, l'échelle associée à la fatigue du troisième questionnaire présente une cohérence moyenne selon les résultats du troisième scénario (avec un alpha de Cronbach=0,49) et devient satisfaisante selon les résultats du sixième scénario (avec alpha de Cronbach=0,62). Pour l'améliorer, il faut supprimer le cinquième item (Q3Fa5 et Q6Fa5) pour atteindre une cohérence de 0,55 (selon le tableau 5.5) ou de 0,71 (selon le tableau 5.6). Ainsi, l'évaluation de la fatigue se base dans les deux scénarios sur les quatre premiers items Q3Fa1, Q3Fa2, Q3Fa3 et Q3Fa4 (respectivement Q6Fa1, Q6Fa2, Q6Fa3 et Q6Fa4).

5.5.2 Analyse des résultats

Pour conclure cette analyse, le tableau 5.7 présente les items de chaque échelle qui sont utilisés dans la phase suivante, c'est à dire, la construction du modèle de comportement. Nous constatons que le deuxième questionnaire est le mieux construit dans sa globalité et montre une cohérence acceptable des trois parties (motivation, stress et fatigue). Le questionnaire 1 est aussi bien défini si on ne considère pas les résultats du premier scénario qui ne sont pas réellement pertinents étant donné que les candidats ne sont pas encore habitués à l'environnement.

En outre, les trois échelles de la fatigue sont nettement mieux définies et cohérentes avec la valeur de l'alpha de Cronbach comprise entre 0,46 et 0,77. L'évaluation du stress est aussi pertinente selon l'indice de cohérence (comprise entre 0,52 et 0,74). Les mesures du pouls et de la tension sont utilisées à ce niveau pour confirmer le niveau déterminé par ces questionnaires. Enfin, les trois mesures proposées de motivation doivent être améliorées afin d'assurer une quantification plus réaliste puisque l'indice de cohérence calculé de cette partie est soit faible (0,31 pour le scénario 1 et 0,40 pour le scénario 2) soit légèrement supérieur en ne gardant que deux ou trois items comme le montre les scénarios 1, 3 et 6.

Facteur		**Scénario 1**	**Scénario 2**	**Scénario 3**	**Scénario 4**	**Scénario 5**	**Scénario 6**
Motivation	Items retenus	4,5	2-5	2,5	1-5	2-5	1,2,5
	alpha	0,31	0,40	0,63	0,59	0,61	0,58
Stress	Items retenus	1-3,5	1,3-5	2-5	1-4	1-5	1-2,4-5
	alpha	0,56	0,58	0,66	0,6737	0,7472	0,5190
Fatigue	Items retenus	1-4	1-5	1-4	2-5	1-5	1-4
	alpha	0,57	0,74	0,66	0,46	0,77	0,71

TAB. 5.7 – Tableau récapitulatif des items retenus.

Les courbes des figures 5.5, 5.6 et 5.7 illustrent l'évolution moyenne des trois facteurs étudiés et des deux critères de performance de tous les étudiants.

Ces résultats proviennent des résultats des expériences et l'évaluation de la motivation, du stress et de la fatigue est calculé par la moyenne des items retenus après l'étude statistique réalisée pour supprimer ceux qui sont incohérents avec l'ensemble d'un questionnaire. Nous avons pu obtenir 6 mesures successives de chaque facteurs puisque chaque étudiant doit tester 6 scénarios successifs et entre deux scénarios, il doit répondre à un questionnaire. En plus, comme la durée de chaque scénario est relativement courte (2 minutes par scénario), nous supposons qu'il n'aura pas une forte variation linéaire pendant la simulation, d'où le segment qui relie deux mesures successives.

Selon les courbes de la figure 5.5, le stress, initialement moyen, diminue légèrement et atteint le niveau 30%. Nous constatons que la variation de la motivation suit celle du stress.

Étudions maintenant les relations entre les facteurs de comportement et la performance pour un candidat. Selon les figures 5.6 et 5.7, une influence existe le stress et la fatigue et la performance. En effet, le stress atteint un niveau très élevé au deuxième scénario (90%) avec une diminution de la motivation (44%). Cet état comportemental a des répercussions directes sur le taux de bonne sélection (figure 5.7.a) et le temps de réaction (figure 5.7.b). Le premier critère chute et passe de 77.16% - pendant le scénario 1 - à 45.56%. L'identification de telles relations est décrite dans le paragraphe suivant.

Enfin, notons que l'évaluation de stress dans cette série d'expériences ne s'est basée ni sur les mesures de tension ni sur les mesures de pouls vu la qualité des mesures. Nous avons constaté que les mesures effectuées sur les quelques candidats ne présentent pas une variation significative puisque pour quelques uns la tension ne diminue que légèrement et passe par exemple de 14/9 au début de la simulation à 13/9 à la fin ou ne change pas pour d'autres candidats. Ces mesures

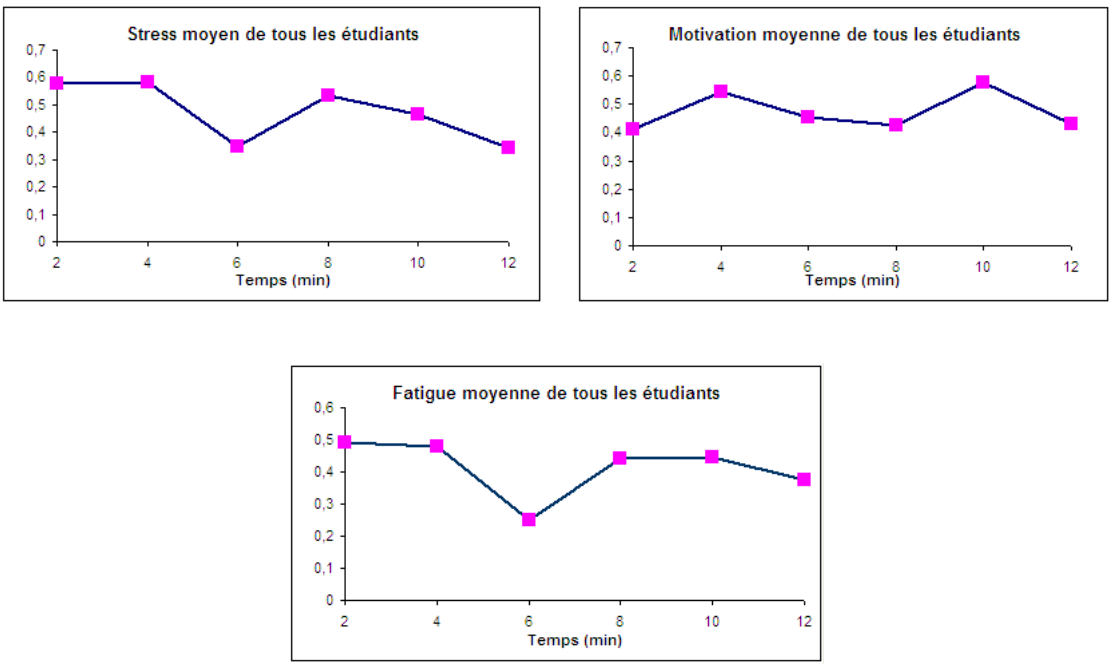


FIG. 5.5 – Évolution moyenne de tous les étudiants du stress, de la motivation et de la fatigue.

n'apportant pas d'informations pertinentes, n'ont pas été intégrées dans le processus d'évaluation.

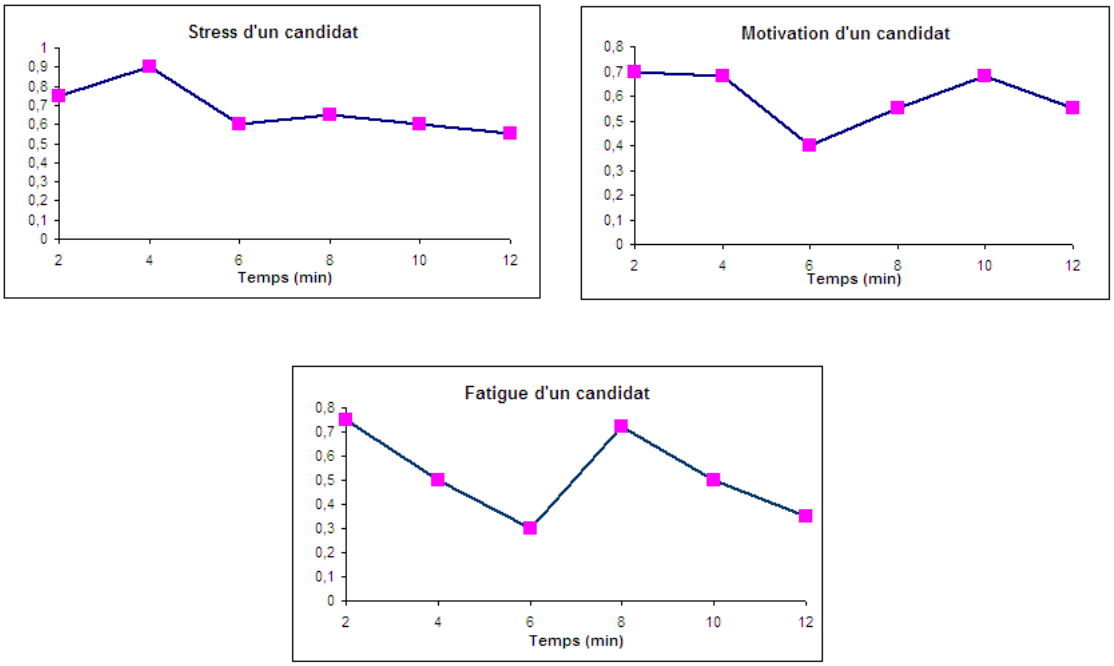


FIG. 5.6 – Évolution du stress, de la motivation et de la fatigue d'un candidat.

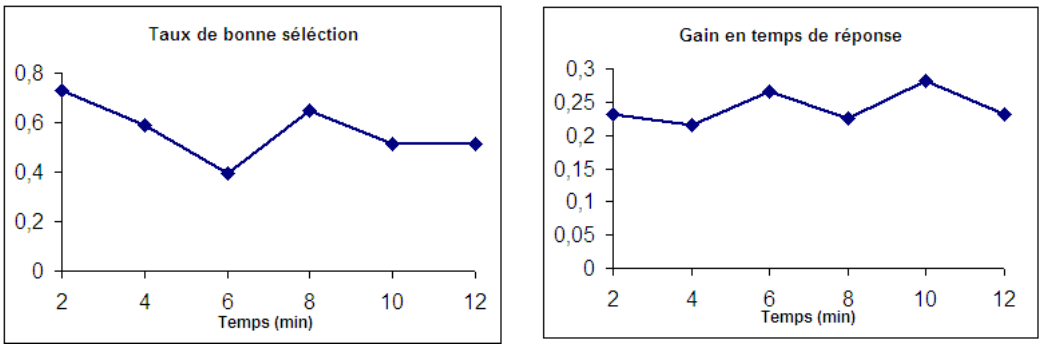


FIG. 5.7 – Évolution des deux critères de performance.

5.6 Construction du modèle

A la suite de ces expériences, des méthodes d'identification doivent être utilisées pour déterminer les paramètres du modèle représentant l'effet des facteurs psychologiques sur la performance correspondant aux éléments de la matrice R. Il s'agit de déduire, à partir des résultats des expériences menées, les degrés d'influences r_{il} en utilisant des approches mathématiques comme le simplex, des heuristiques ou une méthode de relaxation. Nous avons choisi la méthode de relaxation, qui est une méthode itérative déterministe, utilisée pour la résolution de problèmes de minimisation. La méthode de relaxation consiste, en partant d'une approximation initiale, à minimiser la fonction coût "composante par composante". Elle est une méthode de descente. Cela revient en d'autres termes à minimiser la fonction coût en faisant varier séquentiellement les composantes du modèle.

Dans notre cas, le problème consiste à minimiser la distance entre les résultats obtenus et les résultats du modèle après chaque itération. L'outil mathématique utilisé dans cette méthode pour le calcul de la distance est la norme L2 :

$$d_{L_2}(\mathbf{d}, \hat{\mathbf{d}}) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} (d_i - \hat{d}_i)^2} \tag{5.1}$$

Où $\mathbf{d}$ est le vecteur des degrés simulés et $\hat{\mathbf{d}}$ et le vecteur des degrés expérimentaux.

Pour montrer le bien fondé de cette procédure d'identification, nous allons l'appliquer sur la moyenne des résultats recueillis. Nous tentons ainsi d'établir un profil type en déterminant un modèle de comportement moyen. Les courbes de la figure 5.8 représentent l'évolution moyenne des trois facteurs psychologiques (stress, motivation et fatigue) selon les résultats recueillis et les résultats du modèle déterminé. Les courbes en lignes continues sont les mesures réelles alors que celle en lignes discontinues représentent le résultat du modèle après identification en utilisant la méthode de relaxation.

De même manière, les courbes de la figure 5.9 représentent l'évolution des deux critères de

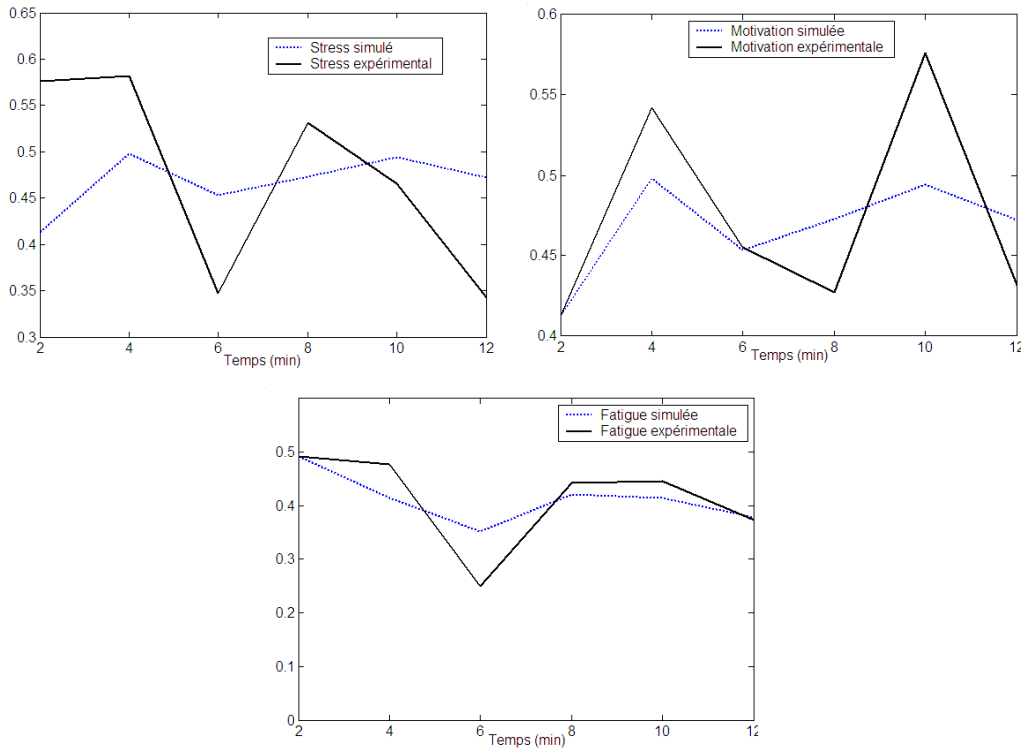


FIG. 5.8 – Stress, motivation et fatigue simulés et expérimentaux.

performance selon les données recueillies et selon le modèle trouvé.

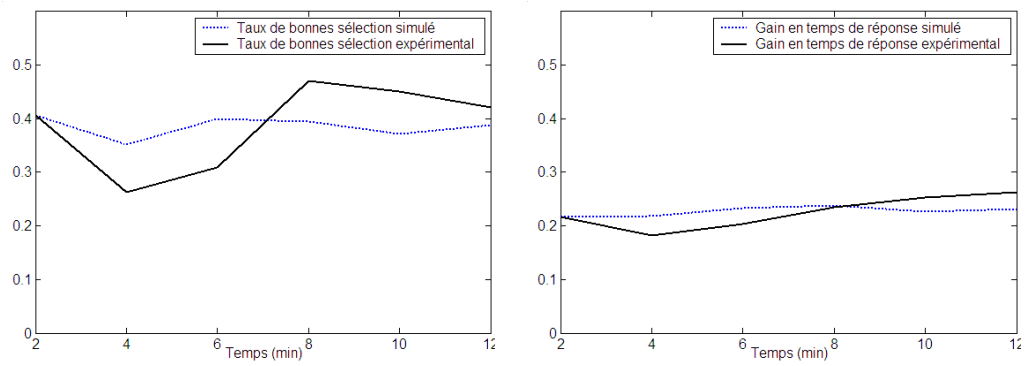


FIG. 5.9 – Le taux de bonnes sélection et le gain en temps de réponse simulés et expérimentaux.

Le résultat de l'algorithme d'identification est la matrice R (voir chapitre 3) des relations reliant les facteurs psychologiques et les deux critères de performance. La matrice R obtenue est donnée dans (5.2).

$$R = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} \textit{Taux de bonne sélection} & \textit{Gain de temps} & \textit{Mot.} & \textit{Fatigue} & \textit{Stress} \end{array} \\ \left[\begin{array}{ccccc} -0.5962 & -0.0013 & 0.0020 & -0.0015 & -0.5522 \\ 0.7977 & -1.8487 & 0.0016 & -0.0419 & 0.0016 \\ 0.1144 & 0.1033 & -0.7098 & 0.1335 & 0.5260 \\ 1.4596 & 2.2325 & 0.0019 & -0.4115 & 0.1912 \\ -0.0006 & -0.3971 & 0.0002 & 2.7181 & -2.9489 \end{array}\right] \end{array} \tag{5.2}$$

Le graphe de comportement construit à partir de la matrice obtenue dans (5.2) n'est pas facilement exploitable puisqu'il contient 25 relations. Pour faciliter l'interprétation des résultats, nous proposons d'annuler quelques éléments de la matrice pour obtenir une deuxième version du modèle analytiquement différent mais qualitativement identique. La procédure consiste à annuler élément par élément tout en ayant un système qui conserve, approximativement le même comportement. Nous obtenons une deuxième matrice R simplifiée :

$$R = \begin{array}{c} \begin{array}{ccccc} \textit{Taux de bonne sélection} & \textit{Gain de temps} & \textit{Mot.} & \textit{Fatigue} & \textit{Stress} \end{array} \\ \left[\begin{array}{ccccc} -0.5962 & 0 & 0 & 0 & -0.5522 \\ 0.7977 & -1.8487 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.7098 & 0 & 0.5260 \\ 1.4596 & 2.2325 & 0 & -0.4115 & 0.1912 \\ 0 & 0 & 0 & 2.7181 & -2.9489 \end{array}\right] \end{array} \tag{5.3}$$

Selon le modèle simplifié, l'évolution du stress, la motivation et la fatigue est donné dans la figure 5.10. Certes la simplification du modèle assure une meilleure compréhension, mais elle ajoute des erreurs à la solution comme le montre l'évolution de la motivation. Le graphe de comportement obtenu est alors donné dans la figure 5.11.

La première constatation que nous pouvons tirer de ce graphe est que la motivation ne joue pas un rôle déterminant durant la réalisation de la tâche. En effet, ce problème a été ressenti pendant les expériences puisque de nombreux étudiants n'ont même pas été assez motivés pour y participer. De plus, la motivation dans ce type de tâche, appelé en psychologie la détection du signal, n'est pas un facteur influant puisqu'elle mobilise plutôt de processus décisionnels relativement élémentaires mais exigeant en termes de ressources attentionnelles (Wickens, 1992).

Quant au deuxième critère de performance (le gain de temps de réponse), il influe positivement sur le stress. Autrement dit, l'affichage des deux courbes et du score et le signal sonore semblent bien avoir créé un effet de rétroaction sur le comportement des étudiants.

Remarquons aussi que dans ce graphe, il y a une boucle stabilisatrice (ou négative), formée par la fatigue, le stress et la performance, et une deuxième boucle explosive (ou positive) formée

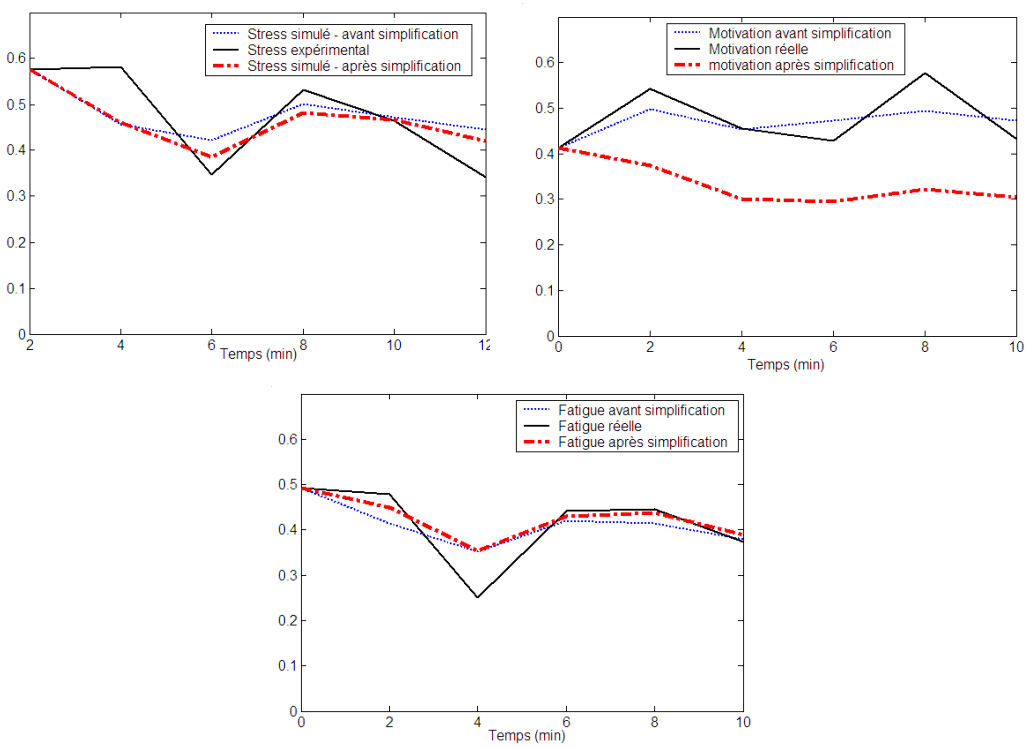


FIG. 5.10 – Stress, motivation et fatigue selon le modèle simplifié.

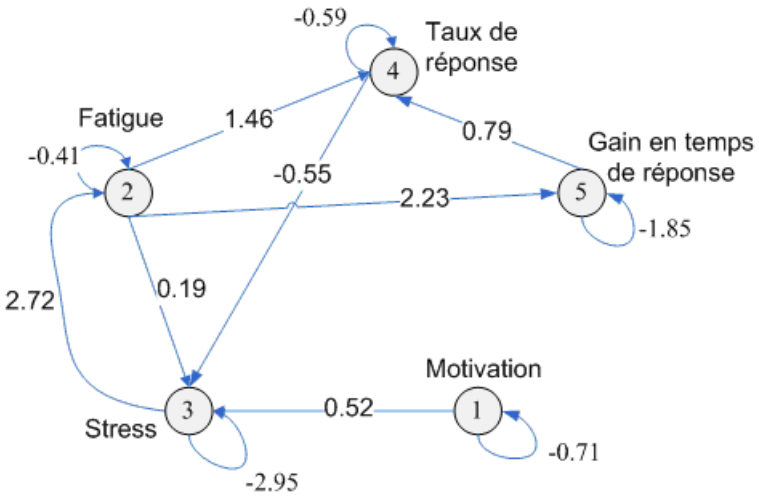


FIG. 5.11 – Graphe de comportement.

par la fatigue et le stress. Néanmoins, d'après le chapitre 3, une boucle explosive peut exprimer un comportement instable. Cependant, la boucle explosive du graphe obtenu n'est pas préoccupante puisqu'elle est compensée par la boucle stabilisatrice fatigue-stress-performance.

Pour améliorer la performance ainsi que la stabilité du comportement des étudiants, il est indispensable de mettre en place des actions de pilotage (appelé aussi action de correction) afin d'améliorer d'abord la motivation et aussi d'atténuer l'effet de la fatigue sur le stress. Nous pouvons proposer, par exemple, l'amélioration de l'environnement de la tâche en supprimant le signal sonore.

5.7 Conclusion

La procédure expérimentale décrite dans ce chapitre a permis d'établir un profil moyen des étudiants. Un modèle de comportement individuel, tenant compte uniquement des facteurs psychologiques, de tous les candidats a été déterminé à partir des résultats recueillis. D'autres séries d'expériences sont actuellement en train d'être menées permettant de valider les résultats trouvés. En effet, une analyse de variances des performances sera effectuée afin de vérifier la validité du modèle et confirmer que les résultats trouvés ne proviennent pas de phénomènes aléatoires, mais sont influés, directement ou indirectement, par les facteurs psychologiques. Les expériences, en train d'être menées en collaboration avec P.J. Marescaux, seront confrontées aux modèle psychosocial pour calibrer le modèle théorique.

Une meilleure exploitation de ce modèle consiste à l'implémenter dans un système mutli-agents pour décrire le comportement individuel de chaque agent. Une procédure expérimentale semblable peut être mise en place pour déterminer la deuxième partie du modèle, la partie psychosociologique, permettant de définir les relations sociales au sein du système multi-agent.

L'outil de simulation basé sur un tel système multi-agent servira à étudier, d'une part, le comportement des opérateurs et, d'autre part, tester de nouvelles méthodes de travail et leur impact sur la performance.

Conclusion générale

La réalisation d'une tâche, dans le contexte des systèmes de production, est souvent soumise à des contraintes de plus en plus nombreuses et complexes. La gestion des ressources humaines est un des facteurs qui doit être pris en compte pour mener à bien toute tâche collective et assurer une parfaite qualité du travail. Dans ce contexte, il est indispensable d'intégrer l'étude des aspects psychologiques et les relations sociales d'opérateurs dans une démarche qualité pour assurer un meilleur rendement.

Dans ce rapport, nous avons essayé de mettre en évidence la nécessité de prendre en compte le comportement et les exigences des opérateurs. Les travaux existants négligent souvent les aspects sociaux pour se focaliser sur les aspects techniques des systèmes de production. Il est donc indispensable de disposer d'une panoplie d'outils pour l'étude du comportement des opérateurs.

Dans ce cadre, nous avons exploré une nouvelle voie menant à l'étude du comportement des acteurs dans un système industriel en considérant certains facteurs psychologiques et psychosociaux. Ainsi, un premier modèle prenant en compte les aspects comportementaux individuels (psychologie)et collectifs (psychologie sociale) a été proposé. Il a pour objectif la description graphique et formelle des facteurs humains ainsi que les liens qui peuvent exister entre les éléments psychologiques, émotionnels, cognitifs et la performance. Le modèle est étendu pour considérer aussi les relations inter-opérateurs et les facteurs psychosociologiques comme le conflit, la communication ou la comparaison sociale qui peuvent exister dans un groupe d'opérateurs.

Ce modèle se base sur des notions issues de la dynamique des systèmes (comme les rétroactions) et sur un modèle mathématique permettant la simulation de certains éléments comportementaux. Le but de ce travail est d'obtenir, dans un premier temps, un modèle qualitatif et représentatif permettant d'approcher peu à peu la réalité.

Dans une première approche (chapitre 3), le modèle ne considère pas l'incertitude des variables qualitatives (variables linguistiques) et se base sur une approche numérique utilisant des équations différentielles ordinaires. Son amélioration a été présentée dans le chapitre 4, qui détaille la modélisation floue du comportement humain en ayant recourt à la théorie des sous-ensembles flous et aux règles floues. Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode de simulation basée sur les équations différentielles floues, d'une part, et sur les systèmes d'inférences flous d'autre part.

Comme tout modèle, celui proposé dans ce rapport doit être validé pour être utilisé par les res-

ponsables ou les gestionnaires des ressources humaines. Pour cela, des expériences ont été menées dans un environnement de production virtuel détaillé dans le chapitre 5. Les résultats recueillis ont permis la construction d'un modèle de comportement moyen des candidats participants aux expériences.

La démarche et les outils proposés dans ce rapport peuvent être utilisés par les responsables d'entreprises comme outils d'aide à la décision. Le modèle de comportement proposé permet d'avoir une vision globale et détaillé des comportements individuel et collecif des opérateurs. Il facilite ainsi l'étude de l'effet de certains facteurs comportementaux sur la qualité de vie des opérateurs et sur leur productivité. Il permet aussi d'aider les responsables opérationnels pour une meilleure stratégie de gestion du personnel.

Les éléments de comportement intégrés dans un modèle peuvent être considérés comme des indicateurs de performance qui doivent être suivis au fur et à mesure. Ainsi, les résultats et les courbes obtenus permettront aux responsables de suivre de prés l'évolution du comportement des opérateurs et ainsi de piloter les actions conduisant à l'amélioration de leur efficacité.

Le modèle proposé peut accompagner les responsables dans le processus de prise de décision. En cas de problèmes détectés, ils pourrons agir en prenant les bonnes initiatives, considérées dans le modèle comme des actions de correction (ou de pilotage). Ces actions sont susceptibles d'améliorer, d'une part, la stabilité des opérateurs et d'autre part leur productivité et leur rendement. Les décisions prises sont intégrées dans le modèle pour prévoir les réactions possibles et leurs effets sur le déroulement du travail avant leur mise en place réelle.

Il est indispensable de rappeler aussi que l'enjeux de ce travail est de proposer une démarche permettant de décrire et de comprendre les phénomènes liés au comportement humain. Le but est de proposer une modélisation exploitable tout en restant suffisamment réaliste. Pour cette raison, nous n'avons pas cherché à intégrer toute la complexité du comportement en imposant certaines hypothèses.

Plusieurs directions restent à explorer pour améliorer la démarche proposée. En effet, la généralisation d'un tel modèle à l'ensemble des aspects psychologiques et psychosociologiques des opérateurs rend son exploitation difficile vu la complexité de la quantification de certains aspects. Il est donc nécessaire d'établir la liste des facteurs essentiels à étudier et à intégrer dans les démarches de qualité ou dans les approches de modélisation des systèmes de production. Généralement, ces facteurs dépendent essentiellement du type de tâche à accomplir et de l'environnement de travail. De plus, les échelles d'évaluation vues dans le chapitre 5 doivent être retestées ou redéfinies pour une meilleure quantification.

Ce modèle peut être implémenté dans un système multi-agent(SMA) pour simuler le comportement d'opérateurs dans un contexte de réalisation d'une tâche collective. Le système d'inférence flou serait implémenté dans chaque agent pour décrire l'évolution des aspects psychologiques comme la motivation ou le stress. L'avantage d'un SMA basé sur ce modèle est la possibilité de décrire de manière dynamique et continue les aspects psychologiques ainsi que ceux liés à

l'environnement social.

Une autre perspective est l'amélioration de la méthode de simulation floue décrite dans le chapitre 4, c'est-à-dire la méthode de résolution d'équations différentielles floues. L'implémentation de la méthode proposée dans les agents est difficile en raison du temps de calcul conséquent. Ainsi, une autre méthode de résolution basée sur la dérivation floue ou la différentiabilité au sens de Hukuhara peut être développée et comparée à celle proposée dans ce rapport.

Finalement, il est important de rappeler que la modélisation du comportement humain et l'analyse des réseaux sociaux sont des tâches difficiles vu la complexité de la quantification de certains aspects humains. Ceci justifie le nombre "réduit" d'éléments comportementaux considérés dans les séries d'expériences menées. Dans ce contexte, d'autres expériences doivent être mises en place pour étudier les relations sociales, et non seulement les facteurs psychologiques. Les résultats recueillis pourront être utilisés pour valider la deuxième partie du modèle en utilisant la procédure d'identification décrite dans le chapitre 5.

Bibliographie

ABBASBANDY, S. et ALLAHVIRANLOO, T. (2002). Numerical solutions of fuzzy differential equations by taylor method. *Journal of Computational Methods in Applied Mathematics*, 2:113–124.

ABBASBANDY, S., NIETO, J. et ALAVI, M. (2005). Tuning of reachable set in one dimensional fuzzy differential equations. *Chaos, Solitons and Fractals*, 26:1337–1341.

ACTON, G. (2001). Five-factor model. Disponible dans : http ://www.personalityresearch.org/.

ACTON-GLOSSARY (2002). Glossary of personality psychology research. http ://www.personalityresearch.org/glossary.

ADAM, C. et EVRARD, F. (2005). Donner des émotions aux agents conversationnels. *In Workshop Francophone sur les Agents Conversationnels Animés*, page 13, Grenoble, France.

AHMED, E. et ELGAZZAR, A. (2001). On some applications of cellular automata. *Physica A*, 296(3):529–538(10).

AKHTER, F., HOBBS, D. J. et MAAMAR, Z. (2005). A fuzzy logic-based system for assessing the level of business-to-consumer (b2c) trust in electronic commerce. *Expert Systems with Applications*, 28(4):623–628.

ALLAIN, H. (1999). La fatigue : de la biologie à la pharmacologie. Rapport technique, Université de rennes 1.

AMATI, D. et SHALLICE, T. (2007). On the emergence of modern humans. *Cognition*, 103:358–385.

AMBLARD, F. (2003). *Comprendre le fonctionnement de simulations sociales individus-centrées : Application à des modèles de dynamiques d'opinions*. Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand II.

ANDERSON, C. J., WASSERMAN, S. et CROUCH, B. (1999). A p^* primer : Logit models for social networks. *Social Networks*, 21(1):37–66.

ANDERSON, J. R., BYRNE, M. D., DOUGLASS, S., LEBIERE, C. et QIN, Y. (2004). An integrated theory of the mind. *Psychological Review*, 111(4):1036–1050.

ANDERSON, J. R. et LEBIERE, C. (1998). *The atomic components of thought*. Erlbaum, Mahwah, NJ. John R. Anderson ; Christian Lebiere. graph. Darst. Literaturverz. S. 461 - 477.

ANDRÉ, E., KLESEN, M., GEBHARD, P., ALLEN, S. et RIST, T. (1999). Integrating models of personality and emotions into lifelike characters. *In IWAI*, pages 150–165.

ANDRIAMASINORO, F. et COURDIER, F. (2001). Un modèle dynamique de comportement agent à base de besoins. *In Actes des JFIADSMA 01*, pages 351–353, Montréal, Québec, Canada. Hermès.

Axelrod, R. (1997). Advancing the art of simulation in the social sciences. *In* Conte, R., Hegselmann, R. et Terna, P., éditeurs : *Proceedings de Simulating social phenomena*, pages 21– 40, Berlin. Springer.

Bailly, D., Wertz, E., Devos, P., Veignie, L. et Turck, D. (2004). Une mesure du stress des adolescents hospitalisés. *Archives de pédiatrie*, 11:1430–1437.

Ball, G. et Breese, J. (2000). *Embodied conversational agents*, chapitre Emotion and personality in a conversational agent, pages 189–219. MIT Press, Cambridge, MA, USA.

Bandura, A. (1985). *Social Foundations of Thought and Action : A Social Cognitive Theory*. Prentice Hall.

Bartneck, C. (2002). Integrating the occ model of emotions in embodied characters.

Belyavin, A. et Farmer, E. (2006). Modeling the workload and performance of psychomotor tasks. *In proceedings of the conference on Behavior Representation in Modeling and Simulation (BRIMS)*, Baltimore,USA.

Bertolini, M. (2007). Assessment of human reliability factors : A fuzzy cognitive maps approach. *International Journal of Industrial Ergonomics*.

Biegler, L. T., Grossmann, I. E. et Westerberg, A. W. (1997). *Systematic methods of chemical process design*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Bin, H. et Zhang, D. (2007). Cellular-automata based qualitative simulation for nonprofit group behavior. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 10(1).

Blais, M. R., Brière, N. M., Lachance, L., Riddle, A. et Vallerand, R. J. (1993). L'inventaire des motivations au travail de blais. *Revue québécoise de psychologie*, 14(3):185–215.

Boguñá, M., Pastor-Satorras, R., Diaz-Guilera, A. et Arenas, A. (2004). Models of social networks based on social distance attachment. *Physical review E*, 70.

Bonarini, A. et Bontempi, G. (1994). A qualitative simulation approach for fuzzy dynamical models. *ACM Trans. Model. Comput. Simul.*, 4(4):285–313.

Bontempi, G. (1995). Modeling with uncertainty in continuous dynamical systems : the probability and possibility approach. Rapport technique 95-16, IRIDIA - ULB.

Bontempi, G. (1996). Qua-si. iii : A software tool for the simulation of fuzzy dynamical systems. *In Proceedings European Simulation Multiconference*, pages 615–619, Belgium.

Brailsford, S., Sykes, J. et Harper, P. (2006). Incorporating human behavior in healthcare simulation models. *In proceedings of the 38th conference on Winter simulation*, pages 466–472. Winter Simulation Conference.

Bruzzone, A. G. et Figini, F. (2004). Modelling human behaviour in chemical facilities and oil platforms. *In Proceeding of the the summer computer simulation conference*, pages 538–544, USA.

BUISSON, J.-C. (2004). *Catégorisation flexible, recherche heuristique et apprentissage.* Habilitation à diriger des recherches, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.

CCHST (2000). Stress en milieu de travail - général. http ://www.cchst.ca/reponsessst/psychosocial/stress.html.

CERVONE, D. (1999). *Social-Cognitive Theories and the Coherence of Personality*, chapitre The coherence of personality : Social-cognitive bases of consistency, variability, and organization, pages 3–37.

CHALCO-CANO, Y. et ROMAN-FLORES, H. (2006). On new solutions of fuzzy differential equations. *Chaos, Solitons and Fractals.*

CHANG, S. S. L. et ZADEH, L. A. (1972). On fuzzy mapping and control. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, 2:180–184.

CONTE, R. et CASTELFRANCHI, C. (1992). Mind is not enough : Precognitive bases of social interaction. *In Dans Proceedings of 1992 Symposium on Simulating Societies*, pages 93–110.

COPIN, S. (2003). Vers une formation des managers à l'aide de simulateurs. Rapport technique, La formation au défi de la Complexité, Centre Université-Economie d'Education Permanente, Lille.

CORNET, A. (1995). Enquête de climat social et de satisfaction au travail : un outil de gestion des ressources humaines. Rapport technique, 13e Université d'été.

DAHN, D. et LAUGHERY, K. (1997). The integrated performancemodelling environment-simulating human-system performance. *In proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*, pages 1141–1145, Atlanta, Georgia.

DE ROSNAY, J. (1975). *Le Macroscope :Vers une Vision Globale.* Editions du Seuil, Paris, France,.

DECI, E. L. et RYAN, R. M. (1985). *Intrinsic motivation and self-regulation in human behavior.*

DEFFUANT, G., HUET, S., BOUSSET, J., HENRIOT, J., AMON, G. et WEISBUCH, G. (2002). Agent based simulation of organic farming conversion in allier departement. *In* M.A.JANSSEN, éditeur : *Complexity and Ecosystem Management*, pages 158–189. Edward Elgar Publishers.

DIAMOND, P. (2002). Brief note on the variation of constants formula for fuzzy differential equations. *Fuzzy Sets Systems*, 129(1):65–71.

DOUTHITT, E. et AIELLO, J. (2000). The impact of computer monitoring and negative affectivity on task performance and satisfaction. *In proceedings de for the 2000 Annual Meeting of the Academy of Management*, Canada.

DUBOIS, D., FOULLOY, L., MAURIS, G. et PRADE, H. (2004). Probability-possibility transformations, triangular fuzzy sets, and probabilistic inequalities. *Reliable Computing*, 10:273–297.

DUBOIS, D. et PRADE, H. (1982). Towards fuzzy differential calculus : Part 3, differentiation. *Fuzzy Sets and Systems*, 8(3):225–233.

EGGES, A., KSHIRSAGAR, S. et MAGNENAT-THALMANN, N. (2003). A model for personality and emotion simulation. *In KES*, pages 453–461.

EHRHARDT, L., HERPER, H. et GEBHARDT, H. (1994). Modelling strain of manual work in manufacturing systems ? *In proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference*, pages 1044–1049, Orlando, Florida.

EKMAN, P. (1982). *Emotion in the Human Face.* Cambridge University Press.

EL-JED, M. (2006). *Interactions sociales en univers virtuel Modèles pour une interaction située.* Thèse de doctorat, l'Universitè Toulouse III : Paul Sabatier.

EL JED, M., PALLAMIN, N., DUGDALE, J. et PAVARD, B. (2004). Modelling character emotion in an interactive virtual environment. *In proceedings of AISB 2004 Symposium : Motion, Emotion and Cognition.*

ELKOSANTINI, S. et GIEN, D. (2006). A dynamic model for the behaviour of an operator in a company. *In Proceedings of 12th IFAC/IFIP/IFORS/IEEE/IMS Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, volume 2, pages 187–192, Saint étienne.

ELKOSANTINI, S. et GIEN, D. (2007a). The fuzzy simulation of a human operator behavior. *In Proceedings of International Modeling and Simulation Multiconference 2007 (IMSM07)*, Argentine.

ELKOSANTINI, S. et GIEN, D. (2007b). Human behavior and social network simulation : Fuzzy sets/logic and agents-based approach. *In proceeding of Agent-Directed Simulation, part of the ACM/SCS Spring Simulation Multiconference (SpringSim'07)*, pages 102–109.

ELKOSANTINI, S. et GIEN, D. (2007c). Integration of human behavioral aspects in a dynamic model for a manufacturing system. *International Journal of Production Research*, page (à paraitre).

ELKOSANTINI, S. et GIEN, D. (2007d). Méthode de validation d'un modèle de comportement des acteurs dans la conduite d'une tâche. *In Actes du congrès international de génie industriel.*

ELLIOT, R. (1990). The challenge of managing change. *Personnel Journal*, 69:40–49.

EPSTEIN, J. M. et AXTELL, R. L. (1996). *Growing Artificial Societies : Social Science from the Bottom Up.* The MIT Press.

EYSENCK, H. J. et EYSENCK, M. W. (1985). *Personality and individual differences : A natural science approach.* New York : Plenum.

FERBER, J. (1995). *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective.* Informatique, Intelligence Artificielle. InterÉditions.

FERBER, J. (2006). *Modélisation et simulation multi-agents pour les Sciences de l'Homme et de la Société : une introduction*, chapitre Introduction aux concepts et méthodologies de conception multi-agents, pages 11–36. Hermes-Sciences, Londres.

FERRAND, D. J. et MARTEL, J.-M. (1985). Le choix multicritère des items d'une échelle de mesure. *Mathématiques et Sciences Humaines*, 89:35–59.

FISHWICK, P. (1990). Fuzzy simulation : Specifying and identifying qualitative models. *International Journal of General Systems*, 19:295–316.

FORRESTER, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. The M.I.T. Press - Massachusetts Institute of Technology - Cambridge (Massachusetts, USA).

FRANK, O. et STRAUSS, D. (1986). Markov graphs. *Journal of the American Statistical Association*, 81:832–842.

FRANÇOIS, C. (1998). La systèmique : Un méta-langage connectif. *Revue internationale de systèmique*, 12(4-5):405–418.

FRERE, R. (2000). *Contribution à l'intégration d'aspects humains dans la modélisation des systèmes de fabrication : vers une gestion conjointe des ressources humaines et de la production*. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, France.

FRIJDA, N. H. (1988). The laws of emotion. *American Psychologist*, 43(5):349–358.

FURELAUD, G. et CALVINO, B. (2007). Cybernétique et physiologie. `http ://www.snv.jussieu.fr/vie/dossiers/cybernetique/01intro.htm` (Visité le 08/03/07).

GEORGIOU, D., NIETO, J. et RODRIGUEZ-LOPEZ, R. (2005). Initial value problems for higher-order fuzzy differential equations. *Nonlinear Analysis*, 63(4):587–600.

GHASEM-AGHAEE, N. et ÖREN, T. I. (2003). Towards fuzzy agents with dynamic personality for human behavior simulation. *In proceedings of the 2003 Summer Simulation Conference*, pages 3–10, Montreal, PQ, Canada.

GIAMBIASI, N., FRYDMAN, C. et SECK, M. (2005). Modélisation et simulation du comportement humain avec le formalisme devs. *In Actes de 6ème Conférence Francophone de Modélisation et Simulation (MOSIM'06)*, Maroc.

GILBERT, N. (1993). Computer simulation of social processes. social research update, issue 6. Rapport technique, Department of Sociology, University of Surrey, England.

GILBERT, N. et TROITZSCH, K. (1999). *Simulation for the Social Scientist*. Buckingham : Open University Press.

GINETTE CLARKE, D. (2004). Incidence des conditions de travail sur les travailleurs sociaux et leur pratique. Rapport technique, Association canadienne des travailleuses et travailleurs sociaux.

GNANA BHASKAR, T., LAKSHMIKANTHAM, V. et DEVI, V. (2004). Revisiting fuzzy differential equations. *Nonlinear Analysis*, 58:351–358.

GOETSCHEL, R. et VOXMAN, W. (1986). Elementary fuzzy calculus. *Fuzzy Sets Syst.*, 18(1):31–43.

GONZALÉZ, M. C., HERRMANN, H. J., KERTÉSZ, J. et VICSEK, T. (2007). Community structure and ethnic preferences in school friendship networks. *Physica A*, 379(1):307–316. doi :10.1016/j.physa.2007.01.002 ; e-print : physics/0611268.

GOTTMAN, J. M., MURRAY, a. J. D., SWANSON, C. C., TYSON, R. et SWANSON, K. R. (2002). *The Mathematics of Marriage : Dynamic Nonlinear Models*. MIT Press, Cambridge, MA.

GOU, C. (2006). The simulation of financial markets by an agent-based mix-game model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(3).

GRATCH, J. (2000). Émile : Marshalling passions in training and education. *In proceedings of the fourth international conference on Autonomous agents*, pages 325–332, New York, NY, USA. ACM Press.

GRATCH, J. et MARSELLA, S. (2001). Tears and fears : modeling emotions and emotional behaviors in synthetic agents. *In Agents*, pages 278–285.

GUAY, F., MAGEAU, G. et VALLERAND, R. (2003). On the hierarchical structure of self-determined motivation : A test of top-down and bottom-up effects. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 29:992–1004.

GUYE-VUILLÈME, A. (2004). *Simulation of nonverbal social interaction and small groups dynamics in virtual environments*. Thèse de doctorat, Ecole Polyntéchnique Fédérale de Lausanne, Lausanne.

HALFORD, G., COWAN, N. et ANDREWS, G. (2007). Separating cognitive capacity from knowledge : a new hypothesis. *Trends in cognitive science*, 11(6):236–242.

HAMMOND, P. et SUN, Y. (2003). Monte carlo simulation of macroeconomic risk with a continuum of agents : the symmetric case. *Economic Theory*, 21:743–766.

HART, P. et COOPER, C. (2001). *Occupational stress : Toward a more integrated framework.*, volume 2, chapitre Handbook of Industrial Work and Organizational Psychology. Anderson, N. and Ones, D.S. and Sinagil, H.K. and Viswesvaran, C.

HARVEY, S., COURCY, F., PETIT, A., HUDON, J., TEED, M., LOISELLE, O. et MORIN, A. (2006). Interventions organisationnelles et santé psychologique au travail : une synthèse des approches au niveau international. Rapport, IRSST.

HARZALLAH, M. (2000). *Modélisation des aspects organisationnels et des compétences pour la réorganisation d'entreprises industrielles*. Thèse de doctorat, Thèse de l'université de Metz.

HARZALLAH, M. et VERNADAT, F. (2002). It-based competency modeling and management : from theory to practice in enterprise engineering and operations. *Comput. Ind.*, 48(2):157–179.

HEGSELMANN, R. et FLACHE, A. (1998). Understanding complex social dynamics : A plea for cellular automata based modelling. *J. Artificial Societies and Social Simulation*, 1(3).

HEGSEMMANN, R., FLACHE, A. et MÖLLER, V. (1998). *Social Science Microsimulation : Tools for Modeling, Parameter Optimization and Sensitivity Analysis*, chapitre Solidarity and Social Impact in Cellular Worlds - Results and Sensitivity Analyses. Springer, Springer.

HERMANN, M. G. (1999). *Assessing leadership style : A trait analysis.* Hilliard, OH : Social Science Automation, Inc.

HIRSCH, G., HOMER, J., MCDONNELL, G. et MILSTEIN, B. (2005). Achieving health care reform in the united states : Toward a whole-system understanding. *In proceedings of 2005 International Conference of the System Dynamics Society.*, Boston.

HJORTH, P. et BAGHERI, A. (2006). Navigating towards sustainable development : A system dynamics approach. *Futures*, 38(1):74–92.

HOLLAND, P. W. . et LEINHARDT, S. (1981). An exponential family of probability distributions for directed graphs. *Journal of the American Statistical Association*, 76(373):33–50.

HORENSTEIN, J. M. (2006). *Qualité de vie au travail des enseignants du premier et du second degré : état des lieux, analyse, propositions.* Paris : MGEN.

HOWARD, P. et HOWARD, J. (2001). *WorkPlace Big Five Profile Workbook : Applying Personality Results at Work.* Charlotte : Center for Applied Cognitive Studies.

HOWARD, P. J. (2000). *The Owner's Manual for the Brain.* Bard Press.

HUBER, M. J. (1999). Jam : a bdi-theoretic mobile agent architecture. *In proceedings of the third annual conference on Autonomous Agents*, pages 236–243, New York, NY, USA. ACM Press.

HURSH, S., REDMOND, D., JOHNSON, M., THORNE, D., BELENKY, G. et BALKIN, T. (2003). The dod sleep, activity, fatigue, and task effectiveness model. *In proceedings of The 12th conference on behavior representation in modeling and simulation.*

IAFFALDANO, M. et MUCHINSKY, P. (1985). Job satisfaction and job performance : A metaanalysis. *Psychological Bulletin*, 97(2):251–273.

IRIARTE, J., KATSAMAKIS, G. et DE CASTRO, P. (1999). The fatigue descriptive scale (fds) : a useful tool to evaluate fatigue in multiple sclerosis. *Multiple Sclerosis*, 5:10–16.

JACOBS, R. et SOLOMON, T. (1977). Strategies for enhancing the prediction of job performance from job satisfaction. *ournal of Applied Psychology*, 62:417–421.

JACOBSEN, C. et BRONSON, R. (1997). *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems : Simulating Social Phenomena*, chapitre Computer Simulated Empirical Tests of Social Theory : Lessons from 15 Years Experience. Springer-Verlag, Berlin.

JARDILLIER, P. (1973). *L'organisation humaine du travail.* Presses universitaires de France.

JONES, C. (2005). Behavioral theory in simulation : Ambiguous results from simple relationships. *In Proceedings The 23rd International Conference of the System Dynamics Society*, USA.

JONKER, C., TREUR, J. et WIJNGAARDS, W. (2003). A temporal modelling environment for internally grounded beliefs, desires and intentions. *Cognitive Systems Research Journal*, 4(3):191–210.

JUDGE, T. A. et BONO, J. E. (2001). Relationship of core self-evaluation traits - self-efficacy, locus of control, and emotional stability - with job satisfaction and job performance : A meta-analysis. *Journal of Applied Psychology*, 86(1):80–92.

KALEVA, O. (2006). A note on fuzzy differential equations. *Nonlinear Analysis*, 64(5):895–900.

KANFER, R. et HEGGESTAD, E. (1997). Motivational traits and skills : a person centred approach to work motivation. *Research in Organisational Behavior*, 19:1–56.

KARSKY, M. (1995). Dynamique des systèmes complexes : Concepts et méthodologie. *Techniques de l'Ingénieur*, (AG 1 565).

KARSKY, M., COPIN, S. et PITRACH, S. (1996). The implementation of a large system dynamics model of human behavior. *In International System Dynamics Conference*, pages 264–267, Massachusetts.

KITTS, J. A. (2006). Social influence and the emergence of norms amid ties of amity and enmity. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 14(4):407–422.

KLEIN, C., FISCHER, B., HARTNEGG, K., HEISS, W. et ROTH, M. (2000). Optomotor and neuropsychological performance in old age. *Experimental Brain Research*, 135:141– 154.

KLÜVER, J. (2002). The dynamics and evolution of social systems : New foundations of a mathematical sociology. *J. Artificial Societies and Social Simulation*, 5(4).

KLÜVER, J. et STOICA, C. (2003). Simulations of group dynamics with different models. *J. Artificial Societies and Social Simulation*, 6(4).

KOELLING, P. et SCHWANDT, M. J. (2005). Health systems : a dynamic system - benefits from system dynamics. *In Winter Simulation Conference*, pages 1321–1327.

KORNWACHS, K. (1987). A quantitative measure for the complexity of man-machine interaction process. *In* BULLINGER, H.-J. et SHAKEL, B., éditeurs : *Human-Computer Interaction : INTERACT'87*, pages 109–116. North-Holland, Amsterdam.

KSHIRSAGAR, S. et MAGNENAT-THALMANN, N. (2002). Virtual humans personified. *In proceedings of the first international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 356–357, New York, NY, USA. ACM Press.

KUMAR, S. et MITRA, S. (2006). Self-organizing traffic at a malfunctioning intersection. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(4).

LANG, P. (1994). The varieties of emotional experience : A meditation of james and lange theory. *Psychological Review*, 101:211–221.

Larsen, E. et Lomi, A. (2002). Representing change : A systems model of organizational inertia and capabilities as dynamic accumulation processes. *Simulation Modeling, Practice and Theory*, 10:271–296.

Lazarsfeld, P. (1966). *l'analyse empririque de la causalité*, chapitre l'interprétation des relations statistiques comme procédure de recherche, pages 15–27. Mouton, Paris.

Le Moigne, J.-L. (1977). *La Théorie du système général : Théorie de la modélisation.* Presses Universitaires de France, Paris.

Lee, S. M. et Remington, R.W.and Ravinder, U. a. M. M. (2004). Developing human performance models using apex/cpm-goms for agent-based modeling and simulation. *In Proceedings of the Military, Government, and Aerospace Simulation Symposium of the Advanced Simulation Technologies Conference*, pages 49–54, Arlington, VA.

Leplat, J. et Cuny, X. (1979). *Les accidents du travail.* PUF.

Levine, R. L. et Doyle, J. K. (2002). Modeling generic structures and patterns in social psychology. *In proceeding of the 20th System dynamics conference*, Italy.

Lewandowsky, S. (1993). The rewards and hazards of computer simulations. *Psychological Science*, 4:236–243.

Lhote, F., Chazelet, P. et Dulmet, M. (1999). The extension of principles of cybernetics towards engineering and manufacturing. *Annual Reviews in Control*, 23:139–148.

Lobry, J. R. (1991). *Ré-Evaluation du Modèle de croissance de Monod. Effet des Antibiotiques sur l'Energie de Maintenance.* Thèse de doctorat, l'Université Claude Bernard à Lyon.

Lowe, G. S. (2002). Les indicateurs de la qualité de vie au travail pour les infirmières du canada. Rapport technique, University of Alberta.

Lugan, J.-C. (1993). *La systémique sociale.* PUF.

Ma, M., Friedman, M. et Kandel, A. (1999). Numerical solutions of fuzzy differential equations. *Fuzzy Sets Systems*, 105(1):133–138.

Mamdani, E. (1974). Applications of fuzzy algorithms for simple dynamic plant. *Proc. IEEE*, 121(12):1585–1588.

Marsella, S. et Gratch, J. (2001). Modeling the interplay of emotions and plans in multi-agent simulations. *In proceedings of the 23rd Annual Conference of the Cognitive Science Society*, Edinburgh,Scotland.

Marsella, S. et Gratch, J. (2002). A step towards irrationality : using emotions to change belief. *In proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Bologna, Italy.

Martinez-Miranda, J. et Aldea, A. (2005). Emotions in human and artificial intelligence. *Computers in Human Behaviour Journal*, 21(2):323–341.

Martinez-Miranda, J., Aldea, A. et Bañares-Alcántara, R. (2003). Simulation of work teams using a multi-agent system. *In Proceedings of the second international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 1064–1065, New York, NY, USA. ACM Press.

Martinez-Miranda, J., Aldea, A., Banares-Alcantara, R. et M., A. (2006). Teaks : simulation of human performance at work to support team configuration. *In proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 114–116, New York, NY, USA. ACM Press.

Martinez-Miranda Juan, A. M., Arantza, A. et Rene, B. (2006). Modelling human behaviour at work using fuzzy logic : The challenge of work teams configuration. *Journal of Human-Computer Studies*.

Martínez-Miranda, J., Aldea, A. et Bañares-Alcántara, R. (2002). A social agent model to simulate human behaviour. *In Proceeding of the 3rd. Workshop on Agent-Based Simulation*, pages 18–23, Passau, Germany. Christop Urban.

Maruyama, M. (1963). The second cybernetics, deviation amplifying mutual causal processes. *American Scientist*, 51:164–179.

Maslow, A. (1970). *Motivation and Personality*. Harper, New York.

Maslow, A. H. (1943). A theory of human motivation. *Psychological Review*, 50:370–396.

McAlinden, R. et Clevenger, W. (2006). A culturally-enhanced environmental framework for virtual environments. *In proceedings of Behavior Representation in Modeling and Simulation*, Proceedings of Behavior Representation in Modeling and Simulation.

McCrae, R. et John, O. (1992). An introduction to the five-factor model and its applications. *Journal of Personality*, 60:175–215.

McDonald, D., Lazarus, R., Leung, A., Hussain, T., Bharathy, G., Eidelson, R., Pelechano, N., Sandhaus, E. et Silverman, B. (2006a). Interoperable human behavior models for simulations. *In Proceedings of the 2006 Behavior Representation in Modeling and Simulation (BRIMS) Conference*, USA.

McDonald, D., Leung, A., Ferguson, W. et Hussain, T. S. (2006b). An abstraction framework for cooperation among agents and people in a virtual world. *In* Laird, J. E. et Schaeffer, J., éditeurs : *AIIDE*, pages 54–59. The AAAI Press.

Meadows, D. et Randers, D., et Behrens, W. (1972). *Halte à la croissance*. Fayard, Paris.

Miller, D. et Swain, A. (1987). *Handbook of Human Factors*, chapitre Human Error and Human Reliability, pages 219–250. John Wiley&Sons.

Miodownik, D. (2006). Cultural differences and economic incentives : an agent-based study of their impact on the emergence of regional autonomy movements. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(4):2.

Moreno, J. (1933). Psychological organisation of groups in the community. *In proceeding of the 57th Annual session of the Amercian Association on mental deficiency*, pages 224–242, Boston.

Moreno, J. (1934). Who shall survive ? : Foundations of sociometry, group psychotherapy, and sociodrama. *Nervous and Mental Disease Monograph*, 58.

Mowrer, O. H. (1960). *Learning theory and behavior*. New York : Wiley.

Mulgund, S., Harper, K., Zacharias, G. et Menke, T. (2000). Sample : Situation awareness model for pilot-in-the-loop evaluation. *In proceedings de 9th Conference on Computer Generated Forces and Behavioral Representation*, Orlando, FL, USA.

Newell, A. (1994). *Unified theories of cognition*. Harvard University Press, Cambridge, MA, USA.

Nguyen-Duc, M. (2005). *Vers la conception participative de simulations sociales : Application à la gestion du trafic aérien*. Thèse de doctorat, University of Paris 6, Paris.

Nguyen-Duc, M., Boucher, A., Drogoul, A. et Duong, V. (2004). Towards participatory design of agent-based simulations : An application in air traffic management. *In proceedings de Agent-Based Simulation 5 (ABS 5)*, Lisbon.

Nguyen-Duc, M., Sempé, F., Boucher, A. et Drogoul, A. (2005). Simulation sociale : Modélisation de comportements par le dialogue agent/acteur. *In proceedings de Recherche Innovation et Vision du Futur*, Can Tho.

Nieto, J. et Rodríguez-López, R. (2006). Bounded solutions for fuzzy differential and integral equations. *Chaos Solitons Fractals*, 27(5):1376–1386.

Niskanen, V. A. (2002). A soft multi-criteria decision-making approach to assessing the goodness of typical reasoning systems based on empirical data. *Fuzzy Sets Systems*, 131(1):79–100.

Nowak, A. et Latané, B. (1994). *Simulating the emergence of social order from individual behavior*, chapitre simulating societies : The computer simulation of social phenomena, pages 63–84. London : University College London.

Nunez, E. (2003). Analogies structurelles et fonctionnelles du domaine bio-psycho-cognitif et d'un domaine social, l'entreprise. Document d'atelier, Réseau intelligence de la complexité.

Ochs, M., Niewiadomski, R. R., Pelachaud, C. et Sadek, D. (2006). Expressions intelligentes des emotions. *Revue en Intelligence Artificielle RIA*, 20(4-5).

ORegan, D., Lakshmikantham, V. et Nieto, J. (2003). Initial and boundary value problems for fuzzy differential equations. *Nonlinear Analysis*, 54(11):405–415.

Oren, T. et Ghasem-Aghaee, N. (2003). Personality representation processable in fuzzy logic for human behavior simulation. *In proceedings of the 2003 Summer Computer Simulation Conference*, pages 11–18.

ORTONY, A., CLORE, G. et COLLINS, A. (1988). *The Cognitive Structure of Emotions*. Cambridge University Press.

PARKER, J. et ASHER, S. (1993). Friendship and friendship quality in middle childhood : Links with peer group acceptance and feelings of loneliness and social dissatisfaction. *Developmental Psychology*, 29:611–621.

PARSONS, T. (1937). *The Structure of Social Action*. Free Press, New York.

PELLETIER, P. (1985). Une expérience de qualité de vie au travail. *Santé mentale au Québec*, X(2):160–165.

PRENDINGER, H., DESCAMPS, S. et ISHIZUKA, M. (2002). Scripting affective communication with life-like characters in web-based interaction systems. *Applied Artificial Intelligence Journal,*, 16(7-8):519–553.

RAO, A. S. et GEORGEFF, M. P. (1991). Modeling rational agents within a bdi-architecture. *In* ALLEN, J., FIKES, R. et SANDEWALL, E., éditeurs : *Proceedings of the 2nd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning*, pages 473–484. Morgan Kaufmann publishers Inc. : San Mateo, CA, USA.

RAUTERBERG, G. (1996). How to measure cognitive complexity in human-computer interaction. *Cybernetics and Systems*, 2:815–820.

READ, S., MILLER, L., ROSOFF, A., EILBERT, J., LORDANOV, V., MENTEC, J.-C. L. et ZACHARY, W. (2006). Integrating emotional dynamics into the pac cognitive architecture. *In proceedings of the Annual Conference on Behavioral Representation in Modeling and Simulation*.

REILLY, W. S. N. et BATES, J. (1992). Building emotional agents. Rapport technique cmu-cs-92-143, Carnegie Mellon University.

REMINGTON, R.W.and Lee, S. M., RAVINDER, U. et MATESSA, M. (2004). Observations on human performance in air traffic control operations : Preliminaries to a cognitive model. *In proceedings of Behavior Representation in Modeling and Simulation (BRIMS '04)*, Arlington, VA.

ÖREN, T. (1978). *Cybernetics and Modelling and Simulation Large Scale Systems*, chapitre Rationale for Large Scale Systems Simulation Software based on Cybernetics and General Systems Theories, pages 151–179. International Association for Cybernetics, Namur, Belgium.

ROBERT, A., PRÉVOSTO, B. et COQUILLARD, P. (2005). Modelling the colonization dynamics of scots pine in french areas. impact of possible atmospheric carbon changes. *In proceeding of the International Conference on Modeling et Simulation*, pages 231–239, Clermont-Ferrand.

ROBINS, G., PATTISON, P. et WASSERMAN, S. (1999). Logit models and logistic regressions for social networks : III. Valued relations. *Psychometrika*, 64:371–394.

Román-Flores, H. et Rojas-Medar, M. (2002). Embedding of level-continuous fuzzy sets on banach spaces. *Information Sciences*, 144(1-4):227–247.

Roseman, I., Jose, P. et Spindel, M. (1990). Appraisals of emotion-eliciting events : Testing a theory of discrete emotions. *Journal of Personality and Social Psychology*, 59(5):899–915.

Roussel, P. (2000). La motivation au travail : concept et theories. Papers 326, LIRHE - Universite des sciences sociales Toulouse.

Rousson, M. (1972). La psychologie du travail et la vie des organisations. *Revue de médecine préventive*, 17:227–235.

Russel, J. (1980). A circumplex model of affects. *Journal of Personality and Social Psychology*, 39:1161–1178.

Ryan, R. et Deci, E. (2000). Intrinsic and extrinsic motivations : Classic definitions and new directions. *Contemporary Educational Psychology*, 25:54–67.

Sawicka, A. (2007). Dynamics of cognitive load theory : A model-based approach. *Computers in Human Behavior*.

Schaubroeck, J. et Merritt, D. (1997). Divergent effects of job control on coping with work stressors : the key role of self-efficacy. *Academy of Management Journal*, 40(3):738–754.

Scherrer, S. (1967). *physiologie du travail*.

Schmidt, B. (2000). *The Modelling of Human Behaviour, SCS publications*. SCS publications, Ghent.

Schneider, D. K. (1996). *Modélisation de la démarche du décideur politique dans la perspective de l'intelligence artificielle*. Thèse de doctorat, Université de Genève.

Schunk, D. H. (1991). *Learning Theories : An Educational Perspective*. Prentice Hall.

Schwartz, J., Jandorf, L. et Krupp, L. (1993). The measurement of fatigue : a new scale. *Journal of Psychosomatic Research*, 37:753–762.

Schwid, S., Covington, M. Segal, B. et Goodman, A. (2002). Fatigue in multiple sclerosis : current understanding and future directions. *Journal of rehabilitation research and development*, 39:211–224.

Seck, M. D. (2007). Modelling of stress in gdevs. *In International Modeling and Simulation Multiconference 2007 (IMSM 07)*, pages 81–86, Buenos Aires, Argentine.

Seif El-Nasr, M., Ioerger, T. et Yen, J. (1999). Peteei : A pet with evolving emotional intelligence. *In proceedings of the Third International Conference on Autonomous Agents*, Seattle, Washington.

Seif El-Nasr, M., Yen, J. et Ioerger, T. (2000). Flame :fuzzy logic adaptive model of emotions. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 3(3):219–257.

Seo, M., Barrett, L. F. et Bartunek, J. M. (2004). The role of affective experience in work motivation. *Academy of Management*, 29:423–439.

Sibertin-Blanc, C., Amblard, F. et Mailliard, M. (2006). *A coordination framework based on the Sociology of Organized Action*, chapitre Coordination, Organizations, Institutions and Norms in Multi-Agent Systems, pages 3–17. Springer, Lecture Notes in Computer Sciences.

Siebers, P., Baines, T., Mason, S. et Ladbrook, J. (2004). Modelling human variation in assembly line models. *In proceedings of the 2004 Operational Research Society Simulation Workshop (SW04)*, UK.

Silverman, B. et Bharathy, G. (2005). Modeling the personality and cognition of leaders. *In Proceedind of the 14th Conference on Behavioral Representations In Modeling and Simulation, SISO*.

Silverman, B. G. (2001). More realistic human behavior models for agents in virtual worlds : Emotion, stress, and value ontologies. Draft technical report, Philadelphia : U of Penn/ACASA.

Simon, H. A. (1982). *Some strategic considerations in the construction of social science models*, volume 2, chapitre Models of bounded rationality, pages 209–238. Cambridge, MA : MIT Press.

Simoneau, H., Bergeron, J., Brochu, S. et Landry, M. (2004). validation d'un questionnaire de motivation au traitement des toxicomanies. *Drogues, santé et société*, 3:1–17.

Sloman, A. (2001). Beyond shallow models of emotion. *Cognitive Processing : International Quarterly of Cognitive Science*, 2(1):177–198.

Snijders, T. A. B., Pattison, Philippa, E., Robins, Garry, L., Handcock et Mark, S. (2006). New specifications for exponential random graph models. *Sociological Methodology*, 36(1):99–153.

Song, S. et Wu, C. (2000). Existence and uniqueness of solutions to cauchy problem of fuzzy differential equations. *Fuzzy Sets Systms*, 110(1):55–67.

Sonnemans, J., Dijk, F. et Winden, F. V. (2006). On the dynamics of social ties structures in groups. *Journal of Economic Psycholog*, 27(2):187–204.

Sterman, J. D. (2000). *Business Dynamics : Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Irwin/McGraw-Hill.

Stratulat, T. (2002). *Systèmes d'agents normatifs : concepts et outils logiques*. Thèse de doctorat, Université de Caen.

Streufert, S. et Swezey, R. (1986). *Complexity, managers, and organizations*. New York : Academic Press.

Strogatz, S. H. (1994). *Nonlinear dynamics and chaos : With applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. Perseus Books.

SUGENO, M. et YASUKAWA, T. (1993). A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1(1):7–31.

SWELLER, J. et CHANDLER, P. (1994). Why some material is difficult to learn. *Cognition and Instruction*, 12:185–233.

TAUHEED, L. F. et WRAY, L. R. (2006). *Money, Financial Instability and Stabilization Policy*, chapitre System Dynamics of Interest Rate Effects on Aggregate Demand, pages 37–57. Edward Elgar Publishing, Massachusetts.

TESFAMARIAM, D. et LINDBERG, B. (2005). Aggregate analysis of manufacturing systems using system dynamics and anp. *Computers and Industrial Engineering*, 49(1):98–117.

TISSEAU, J., PARENTHOËN, M., BUCHE, C. et REIGNIER, P. (2006). Comportements perceptifs d'acteurs virtuels autonomes. une application aux cartes cognitives floues. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information, série Techniques et Sciences Informatiques (RSTI–TSI)*, 24(10):1259–1293.

TORIIZUKA, T. (2001). Application of performance shaping factor (psf) for work improvement in industrial plant maintenance tasks. *tasks, Int. J. Ind. Ergon.*, 28:225–236.

TURNER, K., WEST, P., GORDON, J., YOUNG, R. et SWEETING, H. (2006). Could the peer group explain school differences in pupil smoking rates ? an exploratory study. *Social Science and Medicine*, 62(10):2513–2525.

VALLERAND, R. et THILL, E. (1993). *Introduction au concept de motivation*, chapitre Introduction à la psychologie de la motivation, pages 3–39. Vallerand, R.J. and Thill, E.E.

VAN DUIJN, M. et SNIJDERS, T. (1995). The p2 model. Internal publication, University of Groningen.

VAUTIER, J. F. (1999). Méthodes systémiques appliquées aux facteurs humains. *Techniques de l'ingénieur (Conception et Production)*, A5340.

VOGSTAD, K. O. (2004). *system dynamics analysis of the Nordic electricity market : The transition from fossil fuelled toward a renewable electricity supply within a liberalised electricity market.* Thèse de doctorat, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

VON BERTALANFFY, L. (1968). *General System Theory.* george braziller.

VON BERTALANFFY, L. (1973). *Théorie générale des systèmes (Traduction de : General System Theory : Foundations, Development, Applications).* Dunod, Paris.

VON NEUMANN, J. (1951). The general and logical theory of automata. *In* INC., J. W. . S., éditeur : *In Cerebral Mechanisms in Behavior. The Hixon Symposium*, pages 1–31, New York.

VON NEUMANN, J. (1966). *Theory of Self-Reproducing Automata.* University of Illinois Press, Urbana, Illinois.

VOROBIEV, D. et SEIKKALA, S. (2002). Towards the theory of fuzzy differential equations. *Fuzzy Sets Syst.*, 125(2):231–237.

VROOM, V. (1964). *Work and motivation.* Wiley, New York.

WASSERMAN, S. et FAUST, K. (1994). *Social Network Analysis : Methods and Applications.* Cambridge University Press.

WHICKER, M. L. et SIGELMAN, L. (1991). *Computer Simulation Applications : An Introduction.* Sage Publications, Newbury Park.

WICKENS, C. (1992). *Engineering psychology and human performance.* Harper Collins Publishers.

WIENER, N. (1948). *Cybernetics.* MIT Press, Cambridge.

WOLFRAM, S. (2002). *A New Kind of Science.* Wolfram Media Inc, Champaign, IL.

WONG, K. (2004). Personality model of a believable and socially intelligent character. M.sc thesis, University of Sheffield.

XIAOPING, X. et YONGQIANG, F. (2006). On the structure of solutions for fuzzy initial value problem. *Fuzzy Sets and Systems*, 157(2):212–229.

YANG, H.-L. et TANG, J.-H. (2004). Team structure and team performance in is development : a social network perspective. *Inf. Manage.*, 41(3):335–349.

ZACHARY, W., SANTARELLI, T., RYDER, J., STOKES, J. et SCOLARO, D. (2001). Developing a multi-tasking cognitive agent using the cognet/igen integrative architecture. *In proceeding of 10th Conference on Computer Generated Forces and Behavior representation.*

ZADEH, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:338–353.

ZADEH, L. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Sciences*, 1:119–249.

Annexe A

Les questionnaires

A.1 Premier questionnaire

	Questions	Réponse : 0 - 5
Motivation	1- Est ce que les strokes positifs vous ont aidé ?	
	2- Vous sentiez-vous capable de faire ce qui vous était demande en début de simulation ?	
	3- Avez-vous changé votre manière de procéder au cours de la simulation afin d'améliorer vos performances ?	
	4- Trouvez-vous suffisamment de satisfaction dans la variété des taches qui vous sont proposées dans cette simulation ?	
	5- Seriez-vous plus motivé pour ne pas faire d'erreurs sous la menace de contraintes physiques ?	
Stress	1- Est-ce que la vue du mauvais score vous a perturbé ?	
	2- D'après vous, les effets sonores sont-ils stressants pour l'utilisateur ?	
	3- Les strokes (positifs ou négatifs) ont-ils eu de l'effet sur vous ?	
	4- L'environnement reproduit dans la simulation n'est-il pas apaisant ?	
	5- Avez-vous éprouvé de l'agacement lorsque vous vous êtes trompé ?	
Fatigue	1- Votre attention est-elle toujours la même qu'en début de simulation ?	
	2- Selon vous, votre fréquence cardiaque est elle plus élevée qu'à la normale ?	
	3- Ressentiez vous de la pression sur vos épaules en début de simulation ?	
	4- Vous êtes-vous senti débordé durant l'expérience ?	
	5- Durant la simulation, vous êtes-vous préoccupé du temps ?	

Tab. A.1 – Premier questionnaire.

A.2 Deuxième questionnaire

	Questions	**Réponse : 0 - 5**
Motivation	1- Est-ce que les phrases d'encouragement vous ont motivés ?	
	2- Trouvez-vous la confrontation des scores des différents opérateurs motivante ?	
	3- Avez-vous changé votre façon de procéder pour que les objectifs restent stimulants à atteindre ?	
	4- Votre motivation principale est-elle de faire un score meilleur que les autres utilisateurs ?	
	5- Ressentiriez-vous une sensation de pouvoir si vous obteniez le meilleur score ?	
Stress	1- Le nombre grandissant de pièces défectueuses est-il à l'origine d'une chute notable de votre score ?	
	2- Avez-vous ressenti des manifestations physiques désagréables (sensation de gène respiratoire, maux de ventre, palpitations cardiaques) ?	
	3- Vous posiez vous la question de savoir si vous alliez réussir cette épreuve en début de simulation ?	
	4- Avez-vous trouvé qu'il vous été demandé une forte exigence qualitative (précision, vigilance, ...) ?	
	5- Avez-vous commencé à douter lorsque l'on a commencé à vous encourager de manière moins importante ?	
Fatigue	1- Avez-vous été irrité lorsque vous avez donné une mauvaise réponse ?	
	2- Sentez-vous que votre tension artérielle s'est élevée ?	
	3- Avez-vous des tensions dans la nuque ou dans le cou ?	
	4- Avez-vous ressenti des bouffées de chaleur ou des frissons ?	
	5- Avez-vous les mains moites ?	

TAB. A.2 – Deuxième questionnaire.

A.3 Troisième questionnaire

	Questions	**Réponse : 0 - 5**
Motivation	1- Est-ce que l'affichage du score vous a encouragé à l'améliorer ?	
	2- Le niveau de la simulation a-t-il influé sur votre degré de motivation ?	
	3- Avez-vous trouvé cette expérience amusante ?	
	4- La stimulation du début de la simulation n'était-elle pas nécessaire ?	
	5- En début de simulation, vous posiez-vous la question de savoir si vous alliez réussir cette épreuve ?	
Stress	1- Pensez-vous que vous n'étiez pas à la hauteur de votre travail lors de la simulation ?	
	2- Étiez vous anxieux face à l'expérience que vous alliez subir ?	
	3- Étés-vous frustré du votre score ?	
	4- Avez-vous tapé du pied, des doigts durant la simulation ?	
	5- Vous êtes-vous mordillé l'intérieur de la bouche durant la simulation ?	
Fatigue	1- Vous sentez-vous plus fatigué maintenant qu'avant la simulation ?	
	2- Ressentez-vous une douleur au niveau des mains, doigts, paumes ?	
	3- Votre vue est-elle troublée par les minutes de concentration sur l'écran de l'ordinateur ?	
	4- Ressentez vous des maux de tête ?	
	5- Avez-vous oublié les questions qui vous ont été posées durant la simulation ?	

Tab. A.3 – Troisième questionnaire.

A.4 Analyse des gestes

Gestes	Heure
Croiser ses chevilles l'une sur l'autre quelle que soit la position de ses jambes, en position assise	
Croiser les bras en serrant les poings contre ses flancs	
Appuyer régulièrement sa main droite dans le bas du dos	
Se gratter le genou droit	
Mordiller sa lèvre inférieure ou supérieure	
Conserver ses lunettes refermées dans sa main pendant toute la durée de l'entretien	
Serrer les mâchoires	
Dissimuler sa main gauche sous le bureau	
Fermer les poings en dissimulant ses pouces	
Se gratter continuellement la tête de la main droite ou gauche	
Se gratter : lobe de l'oreille, l'aile du nez, les cheveux	
Manipuler un objet (lunettes...), allumer une cigarette.	
Se frotter les cuisses, les jambes du plat de la paume des mains	
Frotter la table de la main.	
Se tenir le dessous du menton dans la paume de la main.	
Geste sur le côté.	
Geste devant soi.	
Geste derrière soi	
Geste sur soi	
Geste vers le bas Mains ouvertes.	
Croiser les bras.	
Croiser les mains.	
Lèvres ramenées sous nez.	
Poing fermé, agité.	
Mains en avant, bras repliés.	
Hochement de tête latérale.	
Hochement de tête vertical	
Refaire le nœud de cravate, remise en place de mèches de cheveux	
Lissage du tapis de table, de la table, frottement de table par l'auriculaire.	
Mains dans les poches.	

Suite page suivante

Gestes	**Heure**
Suite ...	
Tapotement des doigts.	
Autophagie (se ronger la peau, les ongles...)	
Frottement du visage avec la main	
Position de retrait sur la chaise (jambes allongées) avec balancement	

TAB. A.4: Analyse des gestes.

Annexe B

Normes et conormes triangulaires

La définition d'une opération entre ensembles flous est basée sur une combinaison des fonctions d'appartenance. Les définitions les plus simples utilisent les opérations de minimum, maximum et de complément à 1. Les normes et conormes triangulaires constituent une généralisation des opérations de combinaison de type minimum ou maximum.

Définition. Norme triangulaire ou T-norme :
Une norme triangulaire $\top$ est une fonction définie sur l'ensemble $[0,1] \times [0,1]$ et prenant ses valeurs dans l'intervalle $[0,1]$, qui satisfait les conditions suivantes :

- Commutativité : $\forall x, y \in [0,1] : \quad \top(x,y) = \top(y,x)$
- Associativité : $\forall x, y, z \in [0,1] : \quad \top(x, \top(y,z)) = \top(\top(x,y), z)$
- Monotonie : $\forall x, y, z, t \in [0,1] : \quad \top(x,y) \leq \top(z,t) six \leq z et y \leq t$
- Élément neutre 1 : $\forall x \in [0,1] : \quad \top(0,0) = 0, \top(x,1) = \top(1,x) = x$

Définition. Intersection définie par une T-norme :
On vérifie simplement que l'opérateur minimum est une T-norme. La définition d'une opération d'intersection entre deux sous-ensembles flous se réfère à une t-norme, qui remplace l'opérateur minimum :

$$\forall x \in X \quad \mu_{A \cap B}(x) = \top(\mu_A(x), \mu_B(x)) \tag{B.1}$$

Définition. Conorme triangulaire, T-conorme :
Une conorme triangulaire $\perp$ est une fonction définie sur l'ensemble $[0,1] \times [0,1]$ et prenant ses valeurs dans l'intervalle $[0,1]$, qui satisfait les conditions suivantes :

- Commutativité : $\forall x, y \in [0,1] : \quad \perp(x,y) = \top(y,x)$
- Associativité : $\forall x, y, z \in [0,1] : \quad \perp(x, \top(y,z)) = \perp(\perp(x,y), z)$
- Monotonie : $\forall x, y, z, t \in [0,1] : \quad \perp(x,y) \leq \perp(z,t) six \leq z et y \leq t$
- Élément neutre 0 : $\forall x \in [0,1] : \quad \perp(1,1) = 1, \perp(x,0) = \perp(0,x) = x$

Définition. Union définie par une T-conorme :
On vérifie simplement que l'opérateur maximum est une T-conorme. La définition d'une opération

d'union entre deux sous-ensembles flous se réfère à une T-conorme, qui remplace l'opérateur maximum :

$$\forall x \in X \quad \mu_{A \cup B}(x) = \perp(\mu_A(x), \mu_B(x)) \tag{B.2}$$

Résumé

L'enjeu de ce travail consiste à proposer un modèle dynamique multi-niveau permettant l'étude des systèmes et des structures à composantes humaines à deux niveaux. Le premier niveau s'intéresse à l'étude du comportement à une échelle individuelle (facteurs psychologiques). Le second niveau étend le modèle à l'étude du comportement des groupes de travailleurs (facteurs psychosociaux). Nous situons ce travail dans le cadre de l'amélioration de l'efficience des opérateurs avec pour domaine d'application l'optimisation du contrôle de la qualité des produits. Le modèle est basé sur une représentation graphique et mathématique inspirée de la dynamique des systèmes permettant d'intégrer l'évolution du comportement et de considérer les rétroactions positives et négatives. L'incertitude et l'imperfection que peuvent avoir certains aspects comportementaux sont intégrées dans l'approche en utilisant la théorie des sous-ensembles flous et les systèmes d'inférences flous.

Les hypothèses proposées dans le modèle sont par la suite testées dans un environnement de simulation permettant de reproduire une tâche de contrôle de la qualité de certains produits dans un atelier de production. Les résultats des expériences obtenus ont été utilisés pour la construction d'un modèle de comportement.

Mots-clés: Systèmes de production, facteurs humains, comportement des opérateurs, modélisation, simulation sociale, équation différentielle floue, logique floue.

Abstract

The aim of this work is to provide a dynamic and multi-layer model that enables the study of human-centred systems. The first layer of this model is focused on individual behaviour by modelling dynamic relations that may exist between some psychological factors. This part is extended, in the second layer, to consider inter-worker social relations that influence the individual performance. The proposed model is based on graphical and mathematical modelling that is inspired from system dynamics domain. This modelling integrates positive and negative feed-backs. The model is also improved by integrating the real inaccuracy and vagueness of some behavioural aspects using a fuzzy sets based approach, fuzzy differential equations and fuzzy inference rules.

The assumptions suggested in the model are tested thereafter in a simulation environment reproducing a task of quality control of some products. The obtained results are used to create a behavioural model that must be confronted with the reality in order to validate it.

Keywords: Manufacturing systems, human factors, worker's behaviour, modelling, social simulation, fuzzy differential equation, fuzzy logic.