



HAL
open science

Interaction intelligente par coordination sans communication préalable entre des agents logiciels et des êtres humains dans le cadre de tâches complexes impliquant une criticité des situations.

Martial Razakatiana

► **To cite this version:**

Martial Razakatiana. Interaction intelligente par coordination sans communication préalable entre des agents logiciels et des êtres humains dans le cadre de tâches complexes impliquant une criticité des situations.. Informatique [cs]. Université de Fianarantsoa (Madagascar), 2021. Français. NNT : . tel-04498116

HAL Id: tel-04498116

<https://hal.science/tel-04498116>

Submitted on 11 Mar 2024

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

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

Copyright



LIMAD



UNIVERSITE DE FIANARANTSOA
Ecole Doctorale Modélisation - Informatique

THÈSE PRÉSENTÉE
POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE
L'UNIVERSITÉ DE FIANARANTSOA

SPÉCIALITÉ : Informatique
Par RAZAKATIANA Martial

**Interaction intelligente par coordination sans communication
préalable entre des agents logiciels et des êtres humains dans le cadre
de tâches complexes impliquant une criticité des situations**

Soutenue le 09 Juillet 2021

Membres du jury :

M. RAZAFINDRAKOTO Nicolas Raft	Professeur	Univ. Antananarivo	Président
M. KOLSKI Christophe	Professeur	LAMIH-UPHF, Valenciennes	Directeur de thèse
M. MANDIAU René	Professeur	LAMIH-UPHF, Valenciennes	Directeur de thèse
M. MAHATODY Thomas	Docteur	Univ. Fianarantsoa	Co-encadrant
Mme DUPUY-CHESSA Sophie	Professeur	LIG Univ. Grenoble Alpes	Rapporteur externe
M. RAZAFINDRAKOTO Nicolas Raft	Professeur	Univ. Antananarivo	Rapporteur interne
Mme GUESSOUM Zahia	HDR	CReSTiC, Univ. Reims Champagne-A.	Examinatrice
M. RAKOTOMALALA Mamy Alain	Professeur	Univ. Antananarivo	Examinateur



Titre : Interaction intelligente par coordination sans communication préalable entre des agents logiciels et des êtres humains dans le cadre de tâches complexes impliquant une criticité des situations.

Résumé :

Cette thèse contribue à la modélisation de l'interaction humain-machine intelligente, en considérant un système multi-agent d'assistance dans le cadre de la réalisation coopérative d'une ou plusieurs tâches complexes. Nous abordons une problématique portant sur un mécanisme de coordination dans un système humain-machine en tant que modèle d'interaction entre un ou plusieurs opérateurs humains et un ou plusieurs agents logiciels d'assistance. En particulier, nous considérons un système interactif dans lequel une tâche complexe impliquant une criticité de la situation nécessite une coopération entre humain(s) et agent(s) logiciel(s). Le modèle d'interaction proposé est fondé sur la théorie des jeux. Ainsi, chacun des participants est modélisé comme un joueur qui joue à chaque itération d'une manière dynamique. Nous avons caractérisé les êtres humains par leur niveau d'expérience et leur niveau de charge de travail à chaque itération du jeu. Pour les agents logiciels, certaines règles d'expertise sont exploitées. Ils peuvent prendre des décisions en fonction de la situation et des valeurs des variables mises en jeu : coopérer ou non coopérer. Pour les êtres humains, ils peuvent prendre n'importe quelle décision à un moment donné en fonction de leur expérience et de leurs habiletés. Les agents logiciels doivent aider les êtres humains via la coopération ou bien laisser ces derniers à travailler d'une manière autonome, au profit d'une disponibilité pour une autre tâche. Grâce à la matrice de jeu et l'équilibre de Nash, chacun des agents logiciels peut intervenir ou bien s'occuper d'une autre tâche en optimisant ainsi ses interventions. Cette approche nous permet de considérer ainsi un système sensible au contexte, que ce soit au niveau de l'utilisateur ou des contextes de l'environnement d'interaction.

Pour l'étude de cas, nous avons développé un simulateur de trafic construit sur la base d'un modèle de trafic disponible dans Netlogo, un environnement de modélisation pour le développement de système multi-agents, utilisant le principe de la simulation participative. Le simulateur réalisé permet de faire interagir des êtres humains et des agents logiciels dans le cadre du contrôle de trafic à travers des feux de signalisations. Dans un premier temps, nous avons considéré un seul humain et un seul agent assistant. Ensuite, deux êtres humains et un agent assistant ont été considérés. Enfin, une étude a mis en jeu deux êtres humains et deux agents assistants. L'analyse des résultats à l'issue de l'exécution du simulateur pour les trois études des cas montre l'intérêt et la faisabilité

de notre modèle. Ces premiers résultats prometteurs permettent aussi d'étudier l'efficacité des agents et des êtres humains dans le cadre de la réalisation collaborative d'une tâche complexe. Plusieurs pistes pour des recherches futures sont maintenant envisagées.

Mots clés : Interaction humain-machine, interaction intelligente, sensibilité au contexte, interaction humain-agent, modèle de coordination, Système multi-agent, théorie des jeux, Equilibre de Nash, simulation de trafic routier.

Title : Intelligent interaction through coordination without prior communication between software agents and human beings in complex tasks involving criticality of situations.

Abstract

This thesis contributes to the modeling of intelligent human-computer interaction, by considering a multi-agent assistance system in the context of the cooperative realization of one or more complex tasks. We address a problem concerning a coordination mechanism in a human-machine system as an interaction model between one or more human operators and one or more assistive software agents. In particular, we consider an interactive system in which a complex task involving a criticality of the situation requires a cooperation between human(s) and software agent(s). The proposed interaction model is based on game theory. Thus, each participant is modeled as a player who plays at each iteration in a dynamic way. We have characterized the human beings by their experience level and their workload level at each iteration of the game. For software agents, some expertise rules are exploited. They can make decisions according to the situation and the values of the variables involved: to cooperate or not to cooperate. For human beings, they can make any decision at a given time according to their experience and skills. The software agents must help the humans through cooperation or let them work autonomously, in favor of availability for another task. Thanks to the game payoff matrix and Nash equilibrium, each of the software agents can intervene or take care of another task, thus optimizing their interventions. This approach allows us to consider a context-sensitive system, either at the level of the user or the contexts of the interaction environment.

For the case study, we developed a road traffic simulator based on a traffic model available in Netlogo, a modeling environment for multi-agent system development, using the principle of participatory simulation. The simulator allows the interaction between human beings and software agents in the context of traffic control through traffic lights. At first, we considered a single human and a single assistant agent. Then, two humans and one assistant agent were considered. Finally, a study involved two humans and two assistant agents. The analysis of the results after the execution of the simulator for the three case studies shows the interest and the feasibility of our model. These first promising results also allow us to study the efficiency of agents and humans in the collaborative realization of a complex task. Several avenues for future research are now considered.

Keywords: Human-computer interaction, intelligent interaction, context sensitivity, human-agent interaction, coordination model, multi-agent system, game theory, Nash equilibrium, traffic simulation.

**LIMAD EDMI, Université de Fianarantsoa, BP1264, Fianarantsoa 301
Madagascar**

**LAMIH-UMR CNRS 8201, Université Polytechnique Hauts-de-France,
59313 Valenciennes cedex 9, France**

Remerciements

Je tiens avant tout à remercier Monsieur Christophe Kolski, Monsieur René Mandiau, Professeurs d'informatique à l'Université Polytechnique Hauts-de-France, Valenciennes, et Monsieur Mahatody Thomas, Maître de Conférence à l'Université de Fianarantsoa, Madagascar de m'avoir accepté comme doctorant sous leur direction. Malgré leurs diverses occupations dans leurs travaux, ils n'ont pas ménagé leurs efforts en m'encadrant tout au long de cette thèse et en me faisant partager leurs brillantes intuitions. Je leur suis très reconnaissant pour leur gentillesse, leur disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'ils m'ont prodigués, même avec le travail à distance et surtout avec la difficulté de travailler vue la situation qui prévaut actuellement.

Ce travail n'aurait pas pu avoir lieu sans les personnes suivantes, à qui j'adresse également mes vifs remerciements :

Monsieur le Président de l'Université de Fianarantsoa, Professeur Rafamantanantsoa Fontaine, qui m'a accepté comme doctorant au sein de l'Université de Fianarantsoa. En particulier, ses soutiens administratifs, moraux et financiers m'ont aidé à mener à bien ce travail.

Monsieur Raniriharinosy Karyl Danielson, Directeur de l'École doctorale Modélisation-Informatique et Professeur titulaire à la Faculté des Sciences, qui nous a accueillis comme doctorant auprès de l'EDMI. C'est avec un plaisir qu'on a suivi la formation au sein de l'école doctorale grâce au bon sens de l'organisation qu'il a montré durant le cursus de la formation doctorale. J'ai beaucoup apprécié son inaltérable bonne humeur au contact des doctorants.

Monsieur le Directeur du LAMIH, qui était à l'époque le Professeur Thierry-Marie Guerra, qui a autorisé mes directeurs de thèse à s'engager dans les travaux d'encadrement de cette thèse.

Monsieur le Responsable de l'équipe d'accueil "Informatique, Technologie de l'Information et de la Communication et Applications" au sein du laboratoire LIMAD, feu le Professeur Josvah Paul Razafimandimby qui nous a réservé un accueil chaleureux auprès de son équipe d'accueil. Qu'il repose en paix.

Monsieur le Doyen de la Faculté des Sciences de l'Université de Fianarantsoa, Docteur Andriazafimahazo Lahinirina Fridolin, pour sa compréhension et ses apports vis-à-vis de la facilitation de mon travail de recherche parallèlement à l'administration au sein de son établissement.

J'adresse mes vifs remerciements à Madame Sophie Dupuy-Chessa, Professeur à l'Université de Grenoble Alpes, ainsi qu'à Monsieur Razafindrakoto Nicolas Raft, Professeur à

l'Université d'Antananarivo, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse.

Je remercie, encore une fois Monsieur Razafindrakoto Nicolas Raft, président du jury de thèse, qui a accepté de me consacrer son temps en examinant le manuscrit. J'en suis honoré et je lui exprime toute ma profonde reconnaissance.

Mes remerciements s'adressent également à Madame Zahia Guessoum, Maître de Conférences HDR à l'Université de Reims Champagne-Ardenne ainsi que Monsieur Rakotomalala Mamy Alain, Professeur à l'Université d'Antananarivo, qui ont bien voulu être examinateurs de cette thèse. Leurs remarques et commentaires m'ont permis d'améliorer la compréhension de ce mémoire.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Ratolojanahary Faniry Emilson, Responsable du Laboratoire de recherche LAPAUF, et Professeur titulaire à la Faculté des Sciences de l'Université de Fianarantsoa, qui n'a pas cessé de me donner des conseils tout au long de ce travail de recherche. C'est grâce à lui que j'ai pu rencontrer mes directeurs de thèse de l'Université Polytechnique Hauts-de-France.

Enfin, je tiens à remercier toute la famille, les camarades, et ceux, de près ou de loin, qui m'ont apporté leur aide, afin que ce travail puisse aboutir. Je leur adresse toute ma gratitude du fond du cœur.

Table des matières

Resumé	ii
Abstract	iv
Remerciements	ix
Table de matières	xi
Liste des Figures	xiv
Liste des tableaux	xv
Introduction générale	1
1 Interaction humain-machine intelligente	5
1.1 Introduction	5
1.2 Typologie des interfaces intelligentes	7
1.3 Interfaces tolérantes aux fautes ou erreurs humaines	12
1.4 Interfaces adaptatives	16
1.5 Du contexte aux systèmes interactifs sensibles au contexte	23
1.6 Tableau de synthèse sur des approches représentatives provenant de la littérature	31
1.7 Conclusion	35
2 Interaction humain-agent	36
2.1 Introduction	36
2.2 Définitions sur les agents et systèmes multi-agent	36
2.3 Modèles de coordination	43
2.4 Modèles d'interaction humain-agent	48
2.5 Conclusion	53
3 La théorie des jeux	55
3.1 Introduction	55
3.2 Définitions et concepts	55
3.3 Typologie d'un jeu	62

3.4	Équilibre de Nash	62
3.5	Optimum de Pareto	64
3.6	Domaines d'application	65
3.7	Conclusion	66
4	Modèle d'interaction humain-agent basé sur la théorie des jeux	67
4.1	Introduction	67
4.2	Modèle d'interaction impliquant un humain et un agent assistant	68
4.3	Modèle d'interaction impliquant un agent et plusieurs humains	77
4.4	Modèle d'interaction impliquant plusieurs agents et plusieurs humains	84
4.5	Conclusion	88
5	Environnement de simulation participative pour la mise en œuvre du cas d'étude	90
5.1	Introduction	90
5.2	Généralités sur la simulation	91
5.3	Travaux connexes sur la simulation de trafic	92
5.4	Contexte expérimental : Simulation de trafic	93
5.5	Conclusion	99
6	Analyse et discussion des données issues des trois études	101
6.1	Introduction	101
6.2	Cas impliquant un être humain assisté par un agent	101
6.3	Cas impliquant deux êtres humains assistés par un agent	107
6.4	Cas de deux êtres humains assistés par deux agents	115
6.5	Conclusion	130
7	Conclusions et Perspectives	132
7.1	Conclusion	132
7.2	Perspectives	135
	Bibliographie	137
	Annexes	162
A.1	Publications	162
A.2	Certification	163
A.3	Questionnaire utilisé pour l'évaluation après l'expérimentation	164
A.4	Captures d'écrans	165

A.5	Abréviations utilisées dans la thèse	168
A.6	Glossaire	169
A.7	Méthodes d'estimation subjective de la charge de travail	171
A.8	Échelle d'évaluation de Likert	173

Table des figures

1.1	IHM et sa multidisciplinarité.	5
1.2	Classification des fautes [Avizienis, 1967] provenant de [Arlat et al., 2006].	12
1.3	Catégorisation [Avizienis et al., 2004] provenant de [Arlat et al., 2006].	13
1.4	Signification des numérotations.	13
1.5	Technique de tolérance aux fautes (provenant de [Arlat et al., 2006]).	14
1.6	Architecture d'interface tolérante aux erreurs [Tendjaoui, 1992].	14
1.7	Exemple d'interface tolérante aux erreurs [Nguema et al., 2000].	16
1.8	Espace de conception.	17
1.9	Espace d'adaptation.	18
1.10	Différents types de processus d'adaptation selon Dieterich [Dieterich et al., 1993](traduction provenant de [Vacherand-Revel et al., 2005]).	19
1.11	Exemple d'interface adaptative [Hefley, 1990] provenant de [Tendjaoui, 1992].	20
1.12	Architecture basée sur des agents pour la modélisation des IHM Adaptatives [Vaudry & Crampes, 2001]	21
1.13	Les différentes approches de la modélisation du contexte [Riahi, 2016].	27
1.14	Structure en couche d'un système sensible au contexte [Riahi, 2016].	28
1.15	Système sensible au contexte selon [Schilit et al., 1994].	30
2.1	Architecture simplifiée d'un agent [Russell & Norvig, 2003].	37
2.2	Architecture d'un agent intelligent (BDI) [Wooldridge, 2009; Weiss, 1999].	39
2.3	Schéma d'un agent réactif [Weiss, 1999]	40
2.4	Un système multi-agent (provenant de [Hamila, 2012]).	41
3.1	Arbre du jeu à deux joueurs	58
4.1	Graphe montrant les issues du jeu (cas de deux humains et d'un agent assistant)	78
5.1	Étapes de la simulation selon [Fishwick et al., 1997]	91
5.2	Interface de Netlogo	94

5.3	Architecture du système proposé dans le cadre de l'étude de cas [Razakatia- tiana et al., 2020a]	96
5.4	Diagramme du système proposé [Razakatiana et al., 2020b]	96
5.5	Interface utilisateur du serveur hubnet	97
5.6	Interface utilisateur du client hubnet	98
5.7	Salle d'expérience	99
6.1	Interface client Hubnet [Razakatiana et al., 2020b]	102
6.2	Évolution des valeurs des descripteurs de contexte	103
6.3	Intervention de l'agent assistant	104
6.4	Vitesse moyenne des véhicules	104
6.5	Nombre de véhicules stoppés	105
6.6	Temps d'attente moyenne des véhicules	105
6.7	Protocole suivi par les participants	108
6.8	Diagramme	108
6.9	Interface Client du participant P2	109
6.10	Vitesse moyenne des véhicules	110
6.11	Nombre de véhicules stoppés	111
6.12	Temps d'attente moyenne des véhicules	111
6.13	Interventions des humains	112
6.14	Interventions de l'agent assistant	112
6.15	Protocole inspiré de [Razakatiana et al., 2020a]	117
6.16	Architecture de l'application	117
6.17	Le serveur Hubnet du simulateur, dans le cas de cette troisième étude	120
6.18	Client hubnet utilisé par le participant P1 (appartenant au groupe 1)	121
6.19	Client hubnet utilisé par le participant P2 (appartenant au groupe 1)	122
6.20	Intervention des assistants pour cinq groupes	123
6.21	Évolution de la vitesse moyenne des véhicules	124
6.22	Nombre des véhicules stoppés	124
6.23	Temps d'attente des véhicules	125
6.24	Intervention des deux opérateurs humains	125
A.3.1	Questionnaire à remplir par chaque participant après l'expérimentation	164
A.4.1	Capture d'interface client pour l'étude de cas impliquant deux humains et un agent logiciel.	165
A.4.2	Capture d'interface serveur pour l'étude de cas impliquant deux humains et un agent logiciel.	166

A.4.3	Fichier contenant les informations du trafic durant l'expérience	166
A.4.4	Fichiers excel générés lors d'une expérience	167

Liste des tableaux

1.1	Adaptation selon la réponse de l'opérateur : cas AMEBICA [Vaudry & Crampes, 2001]	22
1.2	Tableau récapitulatif de quelques approches sur l'interaction intelligente.	31
3.1	Matrice de jeu : Exemple	57
3.2	Matrice de jeu : bataille des sexes	61
3.3	Matrice de jeu : dilemme du prisonnier	61
3.4	Matrice de jeu : Exemple	64
4.1	Représentation de la matrice de jeu	68
6.1	Opinions des participants	113
6.2	Éléments caractéristiques des participants aux expérimentations	115
6.3	Exemple de matrice de jeu impliquant deux êtres humains et deux agents assistants	119
6.4	Résultats qualitatifs et opinion des participants	126
A.1.1	Publications et travaux de recherche	162

DÉDICACE

Je dédie ce travail à :

Mes grands parents

Mes parents

Mes frères et sœurs

.....A tous ceux qui me haïssent.....

.....A tous ceux que j'aime.....

“Le monde ne sera pas détruit par ceux qui font le mal, mais par ceux qui le regardent sans rien faire.”

Albert Einstein

Introduction générale

Contexte

L'évolution croissante en termes de proposition, production et utilisation personnelle ou professionnelle d'équipements utilisant les nouvelles technologies de l'information et de la communication fait désormais partie du « progrès » des êtres humains depuis ces dernières décennies. Si nous prenons pour exemple le cas des équipements informatiques et de l'utilisation des ordinateurs (au sens large du terme), nous pouvons constater une omniprésence dans tous les domaines d'activité. Cela se justifie par le fait que des millions d'ordinateurs et appareils dérivés (ordinateurs portables, tablettes, smartphones, etc.) sont vendus chaque année dans le monde entier. En plus, l'informatique pour tout, pour tous, en tout lieu, et l'apparition des technologies relatives aux objets connectés débouche sur une progressive dépendance de plus en plus d'activités humaines vis-à-vis des évolutions continues relatives aux nouvelles technologies de l'information et de la communication [Kranz et al., 2010].

Jadis, un être humain ne pouvait utiliser qu'un seul appareil ; dans certaines circonstances, plusieurs utilisateurs pouvaient exploiter un équipement informatique d'une manière successive. Mais aujourd'hui, l'utilisation massive des réseaux informatiques et la miniaturisation des composants entraînent l'augmentation des possibilités d'interaction : les utilisateurs peuvent utiliser simultanément un ou plusieurs dispositifs. Ceci entraîne des interactions plus ou moins complexes entre l'utilisateur et les machines. Dans certains cas, on utilise ces équipements comme des assistants par rapport à la réalisation d'une ou plusieurs tâches complexes d'une manière collaborative.

A ce sujet, l'Interaction humain-machine¹ est définie comme une discipline consacrée à la conception, la mise en œuvre et à l'évaluation des systèmes informatiques interactifs destinés à des utilisateurs, ainsi qu'à l'étude des principaux phénomènes qui les entourent [Hewett et al., 1992]. C'est une branche pluridisciplinaire de l'informatique qui étudie cet aspect s'intègre parfaitement à l'autre domaine tel que la psychologie cognitive, la science de l'éducation, la communication et l'ergonomie.

En plus des qualités matérielles des équipements, la capacité d'adaptation par rapport aux utilisateurs fait partie des priorités des concepteurs de ces outils. Ils ont de plus en plus pour objectif de produire des matériels et logiciels ayant un niveau élevé d'adaptation vis-à-vis de l'utilisation et de ses utilisateurs [Calvary et al., 2004; Edmonds, 1981; Hefley, 1990; Thevenin, 2001]. Par exemple, un utilisateur débutant pourra être assisté en permanence par un système d'assistance jusqu'à ce qu'il ait suffisamment d'expérience

1. Terme utilisé désormais pour l'interaction homme-machine, depuis la conférence IHM organisée par l'AFIHM du 13 au 16 avril 2021.

sur l'utilisation et l'exploitation des ressources pour travailler de manière autonome. On peut parler aussi, de manière plus générale, d'équipements possédant des fonctionnalités pouvant être qualifiées d'intelligentes (au sens de l'intelligence artificielle). C'est ainsi que la recherche portant sur des modèles d'interaction débouche progressivement sur des propositions visant à contribuer à ce que l'interaction devienne "**intelligente**".

L'interaction intelligente est rendue possible à travers une interface utilisateur dite *intelligente* (en anglais : IUI, pour *Intelligent User Interface*). En termes de conception, l'élaboration d'un modèle d'interaction approprié est une étape primordiale [Hefley & Murray, 1993]. C'est ainsi que l'interface intelligente ne doit pas se limiter à l'aspect visuel de l'interaction. En effet, dans le cas d'une interaction collaborative entre des êtres humains et une machine, ou plusieurs machines, pouvant aussi prendre la forme d'agents logiciels, on a besoin d'étudier et proposer des fonctionnalités permettant cette collaboration. Ce qui nous amène à l'étude d'un autre sous-domaine pluridisciplinaire de l'interaction humain-machine, et faisant le lien avec celui des systèmes multi-agents (SMA) [Ferber, 1999; Wooldridge, 2009; Weiss, 1999; Mandiau et al., 2002] : l'interaction humain-agent.

Problématique

Lorsqu'une ou plusieurs personnes (pouvant être qualifiées d'opérateurs humains) sont impliquées dans la réalisation de tâches complexes, on peut prévoir et mettre en place une assistance basée sur un ou plusieurs agents logiciels (pouvant être qualifiés d'intelligents) [Wooldridge & Jennings, 1995; Grislin et al., 2001; Kuligowska & Lasek, 2005]. L'intervention ou non de ces agents logiciels pourra faciliter l'apprentissage du ou des humains impliqués et améliorer ainsi la performance globale du système humain-machine. Ainsi, les agents logiciels doivent optimiser leurs interventions (ou non-interventions) car elles vont influencer sur le niveau des opérateurs humains dans le futur s'ils sont confrontés à la tâche en question dans des situations similaires.

Ensuite, il est possible de considérer seulement le bien-être des êtres humains sans se préoccuper davantage des ressources que peuvent constituer les agents assistants dans le cadre d'autres tâches (que les êtres humains concernés ne doivent pas traiter). Cependant, ceci peut entraîner une perte de temps et de ressources au niveau des agents assistants, ainsi qu'une dégradation de la performance des êtres humains dans la réalisation d'une tâche complexe (pour faire l'analogie avec un étudiant lors d'une séance de travaux pratiques, s'il est trop aidé par l'enseignant, il aura du mal à apprendre par lui-même, cf. principe du *Learning by doing* [DuFour & DuFour, 2013]). Dans le cadre d'une tâche complexe, la manque de coordination entre les êtres humains et les agents logiciels peut provoquer un dysfonctionnement voire une situation critique du système.

Afin d'éviter une perte de temps ou une incohérence au niveau de la prise de décision (en particulier, aider ou non l'opérateur humain selon la situation en cours), un modèle de coordination entre humains et agents logiciels est nécessaire. La théorie des jeux [Neumann & Morgenstern, 1944; Osborne, 2003] est la solution exploitée dans cette thèse pour construire ce modèle. En effet, elle peut considérer d'une manière simple la satisfaction de chacun des agents logiciels et des êtres humains, dans le cadre d'une tâche complexe, en jouant sur l'équilibre, pour obtenir une combinaison de prise de décision favorable à chacun des participants.

Contribution

Le travail de recherche présenté dans la thèse porte sur la proposition d'un modèle d'interaction dans un contexte impliquant d'abord un humain interagissant avec un agent assistant, puis, par généralisation, plusieurs êtres humains interagissant avec un système multi-agent (constitué d'agents assistants). Ce modèle est fondé sur la théorie des jeux avec la considération d'un système multi-agent d'assistance qui peut s'adapter à plusieurs caractéristiques du contexte du système mis en jeu. Les situations sont modélisées par (1) deux caractéristiques du contexte utilisateur, principalement le niveau d'expérience et le niveau instantané de la charge de travail et (2) le niveau de criticité de la situation. Avec une étude de faisabilité, notre modèle permet de considérer à la fois les descripteurs de contexte et les participants : opérateurs humains et agents logiciels d'une manière simple grâce à l'utilisation de la matrice de jeu.

Le domaine applicatif concerne la supervision de trafic routier par un ou plusieurs opérateurs humains, assistés par un ou plusieurs agents logiciels. Dans le cadre de plusieurs études de cas, ce travail propose et exploite une version améliorée du simulateur de trafic réalisé initialement par Wilensky avec l'outil de simulation Netlogo [Wilensky & Rand, 2015]. Grâce à la possibilité de simulation participative (c'est-à-dire avec possibilité pour des opérateurs humains d'intervenir sur des éléments de la simulation) [Wilensky & Stroup, 2002; Taillandier et al., 2019], nous pouvons implémenter et tester nos modèles utilisant la théorie des jeux, ces implémentations et expérimentations constituant nos principales contributions. Les participants au jeu proposé sont des agents logiciels et des êtres humains interagissant sur l'application de simulation de trafic, qui a été réalisée.

Organisation du mémoire

La première partie du mémoire, constituée de trois chapitres, est d'ordre bibliographique :

- Selon le point de vue de l'interaction humain-machine, nous présentons dans le chapitre 1 des principes d'interface humain-machine intelligente, la notion d'adaptation

et celle de sensibilité au contexte.

- Dans le chapitre 2 qui adopte un point de vue provenant du domaine des systèmes multi-agent, nous introduisons des travaux connexes portant sur l'interaction humain-agent, utilisant des principes d'agent.
- Ensuite, le chapitre 3 porte sur la présentation de l'outil de base sur lequel est fondé notre modèle : la théorie des jeux.

La deuxième partie du mémoire, constituée d'un chapitre, décrit notre première contribution, en termes conceptuels, avec la présentation du modèle d'interaction utilisant la théorie des jeux :

- Dans le chapitre 4, nous introduisons le modèle d'interaction fondé sur la théorie des jeux impliquant un être humain et un agent logiciel. Dans ce même chapitre, nous faisons une extension du modèle proposé précédemment, prenant la forme d'un modèle d'interaction utilisant la théorie des jeux impliquant plusieurs êtres humains et un agent logiciel. Nous terminons ce chapitre en proposant une généralisation selon un modèle de jeu impliquant plusieurs êtres humains et plusieurs agents logiciels.

La troisième partie du mémoire, constituée de deux chapitres, est consacrée à nos contributions applicatives et expérimentales, sous la forme d'études de cas portant sur la simulation participative du trafic routier :

- Le chapitre 5 présente le contexte expérimental de la simulation du trafic.
- Ensuite le chapitre 6 présente les résultats des simulations pour les trois cas étudiés dans les chapitres de modélisation. Des analyses et discussions relativement aux résultats obtenus à travers la simulation participative sont aussi fournies.

La dernière partie du mémoire présente les conclusions et les perspectives de recherche, découlant de ce travail.

Chapitre 1

Interaction humain-machine intelligente

1.1 Introduction

Le fait d'étudier et d'améliorer l'interaction humain-machine (IHM) a le plus souvent un impact positif sur l'efficacité et la performance des opérateurs humains (ou utilisateurs) vis-à-vis de l'utilisation d'un système informatique [Hewett et al., 1992; Kolski, 1993; Jacko, 2012]. Relativement aux technologies de l'information et de la communication, on peut considérer que l'IHM se trouve au centre de plusieurs disciplines, correspondant ainsi à un sous-domaine multidisciplinaire de l'informatique. La figure 1.1 montre le domaine de l'IHM et les disciplines associées :

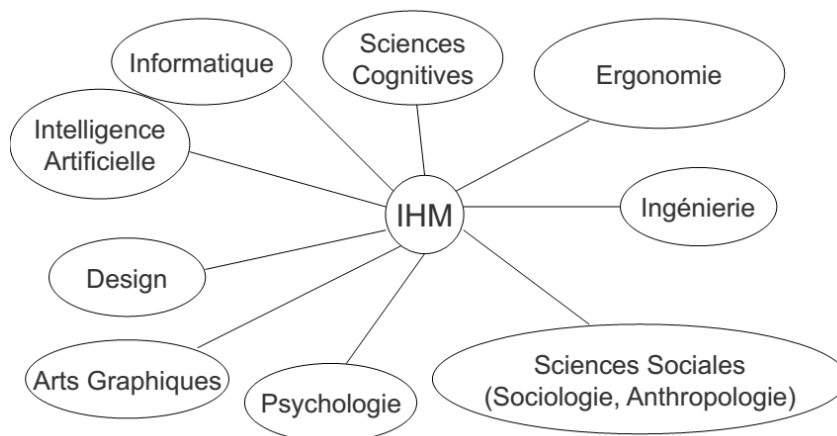


FIGURE 1.1 – IHM et sa multidisciplinarité.

Pour une interaction de qualité, on doit considérer l'intermédiaire entre le système et l'utilisateur connu sur le nom d'interface utilisateur (ou interface humain-machine).

Depuis ces dernières décennies, l'utilisation des systèmes informatiques devient incontournable dans la plupart des entreprises ou des services publics et privés. En particulier, l'utilisation de certains équipements comme les assistants personnels digitaux

[Wiggins Iii, 2004; Hoy, 2018] dans la vie quotidienne a changé le comportement des utilisateurs, avec des nouvelles attentes et espoirs liées aux nouvelles technologies. Ainsi, on peut maintenant souhaiter augmenter sa performance pour des usages aussi bien professionnels que personnels, même dans le cadre de la réalisation d'une tâche complexe. Néanmoins, l'utilisation et la manipulation de nouveaux dispositifs interactifs peuvent nécessiter un certain niveau d'expérience pour obtenir une efficacité maximale ; certains utilisateurs éprouvent parfois des difficultés en termes de manipulation et d'exploitation de ces équipements. Ils ont parfois du mal à accomplir dans le temps éventuellement imparti et avec efficacité leur tâche. Certains systèmes peuvent s'avérer difficiles à exploiter, aussi bien selon le point de vue du matériel que du logiciel, par exemple pour certaines catégories d'utilisateurs, par exemple novices ou en situation de handicap [Betke, 2010].

Pour faire face à de tels problèmes, la mise en place d'une interface humain-machine dotée d'une capacité d'adaptation aux utilisateurs, à la plateforme et à l'environnement d'interaction peut être considérée comme une solution. Cette solution fait partie des principes d'IHM actuelles dite "intelligentes". Ce type d'interface vise à communiquer d'une manière efficace avec le ou les utilisateurs du système considéré, le plus souvent en exploitant un mécanisme logiciel d'adaptation. La recherche portant sur la mise au point d'une interface intelligente d'un système informatique fait partie de la préoccupation de nombreux chercheurs académiques et industriels ; voir à ce sujet les recherches très diversifiées présentées dans le cadre de la conférence internationale IUI (Intelligent User Interfaces) de l'ACM SIGCHI, depuis sa première édition en 1997. Cette voie de recherche peut s'appuyer sur une combinaison de modèles provenant de l'intelligence artificielle et de l'interaction humain-machine. La multidisciplinarité de la recherche portant sur les interfaces intelligentes enrichit aussi ce domaine qui est en plein essor. Parmi les objectifs actuels des chercheurs, il y a l'étude et la proposition de modèles formels permettant une adaptation efficace de l'interface, tout en entraînant la satisfaction des utilisateurs.

Dans la suite, nous allons donner quelques notions sur les interfaces intelligentes en termes d'interface humain-machine. Ensuite, nous parlerons de l'interface tolérante aux fautes et de l'interface adaptative. La notion de sensibilité au contexte viendra par la suite en guise de complément sur l'interface humain-machine intelligente. Nous terminons cette partie par un tableau récapitulatif portant sur les interfaces intelligentes.

1.2 Typologie des interfaces intelligentes

1.2.1 Notions de base sur les interfaces humain-machine

L'interaction entre l'humain (l'utilisateur du système) et la machine est difficile voire impossible en absence ou en cas de défaillance de l'interface humain-machine. Littéralement, l'interface vient de la conjonction entre deux mots “**inter**” qui signifie *entre* et “**facies**” qui signifie *aspect*. L'interface humain-machine désigne donc l'ensemble de l'aspect entre les humains et les machines. Au début (à partir du moment où ce terme a été utilisé en informatique), l'interface humain-machine avait été définie comme un ensemble de composants, d'abord textuels puis graphiques, permettant aux utilisateurs humains d'interagir avec une machine. Lorsqu'ils sont graphiques, les composants d'interface constituent le support visuel permettant aux systèmes informatiques de présenter certaines informations à l'utilisateur (ou aux utilisateurs). Par rapport à l'évolution des systèmes informatiques, l'interface humain-machine désigne essentiellement l'ensemble des dispositifs mis en œuvre pour que l'utilisateur puisse interagir avec la machine [Coutaz et al., 1992; Kolski, 2011]. Dans ce cas, l'interface humain-machine sera une des composantes incontournables dans la réalisation des tâches effectuées par l'utilisateur, car elle joue un ensemble de rôles clés pendant ce qu'on qualifie, dans ce domaine, de communication, d'interaction ou encore de dialogue, entre l'utilisateur et la machine. D'une manière simplifiée, elle désigne le moyen de communication entre l'humain et le système informatique, en exploitant certaines règles communes de communication. On l'appelle aussi souvent et indifféremment interface utilisateur, ou interface graphique, ou même interface graphique utilisateur (GUI pour *Graphical User Interface*) selon [Meinadier, 1991].

Ces moyens permettront la réalisation d'une certaine *conversation* entre les machines et les utilisateurs. Elles visent à assurer la plus grande cohérence possible entre le vu et le représenté. Elles permettent aussi d'envisager une communication humain-machine à la fois simple et puissante, en fournissant à l'utilisateur des règles simples favorisant une bonne compréhension des fonctionnalités. Dans l'idéal, une interface devrait être facile à manipuler par tout utilisateur. Ceci est possible grâce à des modèles et des mécanismes logiciels sous-jacents. Selon le point de vue des concepteurs, les éléments minimaux permettant de réaliser des interfaces utilisateur ont pendant longtemps été : les icônes, les menus, les fenêtres, etc. Depuis de nombreuses années, ces interfaces ont été réalisées selon les principes [Myers et al., 2000] :

- WYSIWIG (What You See Is What You Get).
- WIMP : Windows, Icons, Menus, Pointers.

Avec l'évolution de la technologie des composants et matériels électroniques, les interfaces humain-machine se sont généralisées à travers divers supports d'interaction. Cette évolution s'explique par l'invention des périphériques d'entrée et de sortie modernes, autres que le clavier, la souris et l'écran. Celles-ci permettent de nouvelles interactions, par exemple tangibles, tactiles, gestuelles, avec retour haptique, utilisant la réalité virtuelle ou la réalité augmentée. Elles conduisent à des interfaces utilisateur de type POST-WIMP [Van Dam, 1997; Beaudouin-Lafon, 2000].

L'interaction Humain-Machine étudie la façon dont les humains interagissent avec les machines ou ordinateurs (au sens large du terme) ou entre eux à l'aide d'ordinateurs, ainsi que la façon de concevoir des systèmes informatiques qui soient ergonomiques, c'est-à-dire efficaces, faciles à utiliser ou plus généralement adaptés à leur contexte d'utilisation (voir aussi [Hewett et al., 1992; ISO-9241-11, 2018]). L'étude portant sur l'interface humain-machine devient un élément constitutif crucial dans ce domaine de recherche. Dans ce domaine, l'une des problématiques importantes est de savoir comment peut-on concevoir et développer une interface humain-machine, qui soit satisfaisante dans sa globalité, tout en pouvant s'adapter à différentes configurations. Cette problématique a donné un sens à l'étude d'interfaces humain-machine qualifiées d'intelligentes.

1.2.2 Notion d'interface intelligente

Le terme intelligence vient du latin "**intelligentia**", qui, à son tour, dérive du mot "*inteligere*". Ce dernier est composé par d'autres termes : **intus** (qui signifie "entre") et **legere** (qui signifie "choisir"). Donc étymologiquement parlant, le mot "**intelligence**" désigne la capacité de choisir : l'intelligence permet de sélectionner ou choisir les meilleures solutions pour résoudre un problème donné.

Les définitions d'intelligence peuvent couvrir plusieurs aspects : l'intelligence psychologique (la capacité cognitive, d'apprentissage et de relation), l'intelligence biologique (la capacité d'adaptation face à de nouvelles situations), l'intelligence opérative. En bref, le mot « intelligence » traduit la capacité de comprendre, d'assimiler, d'élaborer l'information et de l'employer de façon convenable [Neisser, 1979; Troy, 1991].

Pour terminer l'étude de la définition de l'intelligence, nous pouvons retenir celle proposée par le psychologue américain Howard Gardner, de l'Université de Harvard [Gardner, 2002] : "*l'intelligence est le potentiel de chaque être humain, ne pouvant pas être quantifié mais plutôt observé et développé au moyen de certaines pratiques*". Depuis l'apparition des ordinateurs et en particulier des interfaces humain-machine, la recherche sur l'interface humain-machine intelligente [Gonçalves et al., 2019] a déjà fait l'objet de nombreux travaux de recherche avec l'implication de plusieurs disciplines connexes. Les recherches

ont pour objectif de mettre à la disposition des utilisateurs des interfaces humain-machine pouvant être qualifiées d'intelligentes, en se référant aux définitions de l'intelligence présentées auparavant.

Selon [Guériau et al., 2015; Kolski et al., 2020], il est possible d'utiliser plusieurs techniques de l'intelligence artificielle afin de pouvoir les exploiter dans le domaine de l'interface humain-machine. Dans ce sens, [Peres et al., 2011] a exploité le potentiel de la combinaison des domaines de l'interaction humain-machine et de l'intelligence artificielle en vue de promouvoir l'accessibilité des jeux et, par conséquent, de les rendre plus démocratiques et utiles pour la société, en particulier pour les personnes en situation de handicap, qui dépendent de ressources technologiques d'assistance. Par ailleurs, [Hefley & Murray, 1993] ont implémenté un modèle d'interface intelligente, en s'appuyant sur une architecture UIMS (User Interface Management System).

Nous pouvons partir de la définition de l'interface intelligente, selon [Maybury & Wahlster, 1998] : l'interface intelligente présente une certaine efficacité, adaptabilité, une bonne représentation des informations, un raisonnement. En plus, selon [Rohrbach & Schmid, 2008], une interface intelligente doit avoir aussi un caractère adaptatif, permettre la personnalisation en fonction de l'utilisateur (en prenant en compte le profil utilisateur), contenir un module d'assistance personnalisé. Elle doit non seulement être sensible au contexte, si on se réfère à [Alegre et al., 2016; Schilit et al., 1994; Brown et al., 1997] ou encore [Vanderdonckt et al., 2005] mais en plus, elle peut avoir une tolérance à certaines erreurs humaines [Kolski & Malvache, 2006].

En vue de la modélisation d'une interface humain-machine intelligente, Khayut et ses collègues [Khayut et al., 2014] ont proposé les notions de système flou pour la conception d'interface intelligente. Ils proposent l'utilisation d'un moteur d'inférence en logique floue, ainsi que des principes de généralisation, représentation et explication des connaissances, de planification et de prise de décision, de contrôle du dialogue, de raisonnement (notons que la logique floue a été aussi utilisée par d'autres auteurs du domaine, tels que [Nguema et al., 2000; Agah & Tanie, 2000; Giuffrida et al., 2019b]). L'interface intelligente peut contenir aussi un module d'assistance à l'utilisateur, connecté à un gestionnaire de dialogue [Tendjaoui, 1992; Lew et al., 2007]. Grâce à ce module, l'interface intelligente offre une possibilité à l'utilisateur d'être assisté en permanence par le système. La communication entre l'utilisateur et le système est prise en charge par le gestionnaire de dialogue proposé dans l'architecture présentée dans [Tendjaoui, 1992].

Dans ce cas, l'interface humain-machine peut aussi avoir une certaine intelligence en utilisant l'approche multi-agent pour le système, cette approche étant proposée dans la suite de cette thèse. Dans ce cas, les acteurs mis en jeu sont donc l'utilisateur et la

machine, en supposant que l'interface est un composant communiquant de l'agent logiciel [Wooldridge & Jennings, 1995]. Nous nous intéressons aux aspects comportementaux des interactions entre ces agents logiciels qui seront à leur tour en interaction avec un ou plusieurs humains, et en particulier, à la manière dont les activités des agents peuvent se dérouler. Actuellement, la problématique de l'intelligence d'une interface peut prendre en compte d'autres formes d'interaction (non traitées dans cette thèse) : les émotions, c'est-à-dire, comment l'interface peut-elle interpréter les aspects émotionnels des opérateurs humains, ou exprimer des émotions ? Ceci peut être rendu possible par exemple via une interaction avec un agent émotionnel animé qui simule le comportement d'un être humain [Rago, 2003; Law et al., 2020]. L'une des problématiques principales est de savoir comment on peut concevoir et développer une interface humain-machine, qui soit satisfaisante dans sa globalité, et qui puisse correspondre à une interface intelligente [Hefley & Murray, 1993; Hancock & Chignell, 1989]. Parmi les critères déjà mis en place par les autres auteurs, tels [Tendjaoui, 1992; Hariri, 2008; Vacherand-Revel et al., 2005; Hariri et al., 2009], la qualité d'une interface humain-machine peut être mesurée par différents critères, par exemple : l'efficacité ; la satisfaction utilisateur, la sensibilité au contexte d'usage, la tangibilité [Jofre et al., 2015], l'utilisabilité, la flexibilité (ou adaptabilité). Elle doit avoir ainsi un caractère éducatif, c'est-à-dire en facilitant la prise en charge d'une manière ou d'une autre de l'apprentissage de l'utilisateur, selon aussi ses préférences ou habitudes. Pour le contexte, au sens de [Dey, 2001] ou encore [Calvary et al., 2003], on peut le définir comme étant une information (ou un ensemble d'informations) caractérisant la situation d'un composant (ou d'une entité).

Ainsi, un modèle d'interface orienté contexte (ou sensible au contexte) peut mettre l'accent sur l'utilisateur du système, sur les moyens par lesquels l'utilisateur interagit avec le système et enfin l'environnement dans lequel s'inscrit l'interaction, tout en considérant les tâches à réaliser [Kolski & Le Strugeon, 1998]. A ce sujet, il s'agit de mettre l'accent sur le concept introduit par [Thevenin et al., 1999], relativement à la plasticité d'une interface humain-machine, qui vise l'adaptation dynamique, tout en étant sensible au contexte (voir aussi [Coutaz & Calvary, 2012]). Enfin, une synthèse des contributions relativement au concept d'intelligence dans les interfaces utilisateur intelligentes est fournie dans [Völkel et al., 2020]. Ces derniers ont utilisé la technique d'analyse textuelle pour extraire toutes les occurrences du mot "*intelligent*" dans tous les actes de conférences IUI (de l'ACM), sur une durée de 25 ans.

1.2.3 Domaines d'application des interfaces humain-machine intelligentes

Les interfaces humain-machine intelligentes se retrouvent ou devraient se retrouver à terme dans de plus en plus de domaines :

- le domaine de transports collectifs, et en particulier la personnalisation des informations voyageurs [Kolski, 2011; Ezzedine et al., 2005],
- les terminaux de télécommunications [Magedanz, 1995],
- les environnements informatiques d'apprentissage humain (EIAH), intégrant en particulier des problématiques de personnalisation des informations à afficher aux apprenants [Pushkar & Hrabovskyi, 2019],
- les interactions humain-robot [Murphy, 2004; Ren & Bao, 2020],
- Les sites web adaptatifs et personnalisés [Brusilovski et al., 2007], avec en particulier l'adaptation aux personnes en situation de handicap [Giuffrida et al., 2019b],
- des véhicules intégrant de plus en plus de systèmes interactifs et adaptatifs aux véhicules autonomes [Xu, 2020],
- l'aide à la supervision de système industriel complexe et de chaînes de production [Tendjaoui, 1992; Avouris & Liedekerke, 1993; Preuveneers & Ilie-Zudor, 2017],
- La télé-médecine, le diagnostic et l'opération chirurgicale assistée par ordinateur [Kondakov & Kulik, 2020],
- les domaines de l'aéronautique et de l'espace [Boy, 1999; Xiao et al., 2019] et [Boy, 1987],
- les nouvelles problématiques liées à l'internet des objets, à la Smart City et à la Smart home [Hammi et al., 2017; Bissoli et al., 2019; Abdulla et al., 2020],
- etc.

Malgré les études portant sur les interfaces intelligentes, les êtres humains qui sont les utilisateurs d'un système informatique à travers ces dispositifs sont parfois sujets à des erreurs plus ou moins inattendues. Ces erreurs surviennent souvent lorsqu'une personne à un niveau de charge de travail très ou trop élevé par exemple, et/ou est en situation de stress et/ou de fatigue. Ceci nous amène à l'étude d'un type particulier d'interface intelligente : l'interface tolérante aux erreurs humaines.

1.3 Interfaces tolérantes aux fautes ou erreurs humaines

Lorsque plusieurs personnes sont impliquées dans la réalisation d'une tâche complexe, certaines erreurs peuvent survenir d'un moment à l'autre pour diverses raisons [Boy, 2017]. Ces erreurs peuvent provoquer des dysfonctionnements ou des perturbations, que ce soit au niveau du système au bien au niveau des autres utilisateurs. Quel que soit l'auteur, l'origine et la nature des erreurs, le système informatique devrait reconnaître certaines erreurs commises par quelqu'un et réagir à temps, voire anticiper sur le problème pouvant survenir en conséquence. Cette réaction peut s'avérer possible grâce à la mise en œuvre d'une interface dite tolérante aux erreurs humaines [Rouse & Morris, 1985].

Les erreurs humaines sont des phénomènes inattendus qui peuvent survenir à tout moment. Les erreurs ont plusieurs sources : ils peuvent provenir de l'utilisateur, de défaut matériels et logiciels, d'erreurs de fonctionnement [Rouse & Rouse, 1983]. La figure 1.2 présente différentes catégories d'erreurs, selon [Avizienis, 1967].

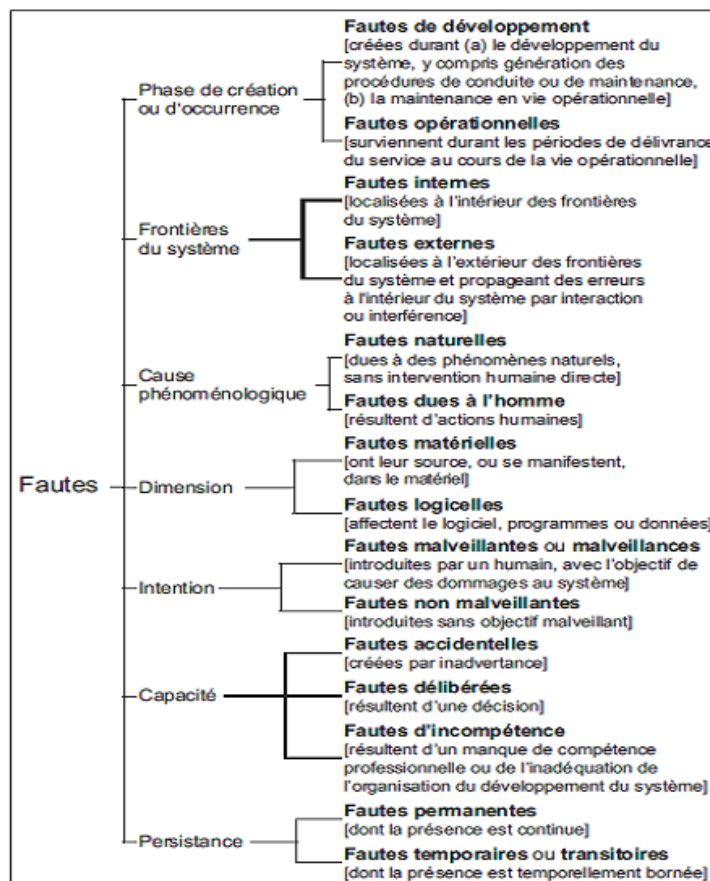


FIGURE 1.2 – Classification des fautes [Avizienis, 1967] provenant de [Arlat et al., 2006].

Dans la figure 1.3, on représente une catégorisation un peu plus détaillée provenant de [Avizienis et al., 2004]. La signification des numérotations visibles dans la figure 1.3

est fournie en figure 1.4.

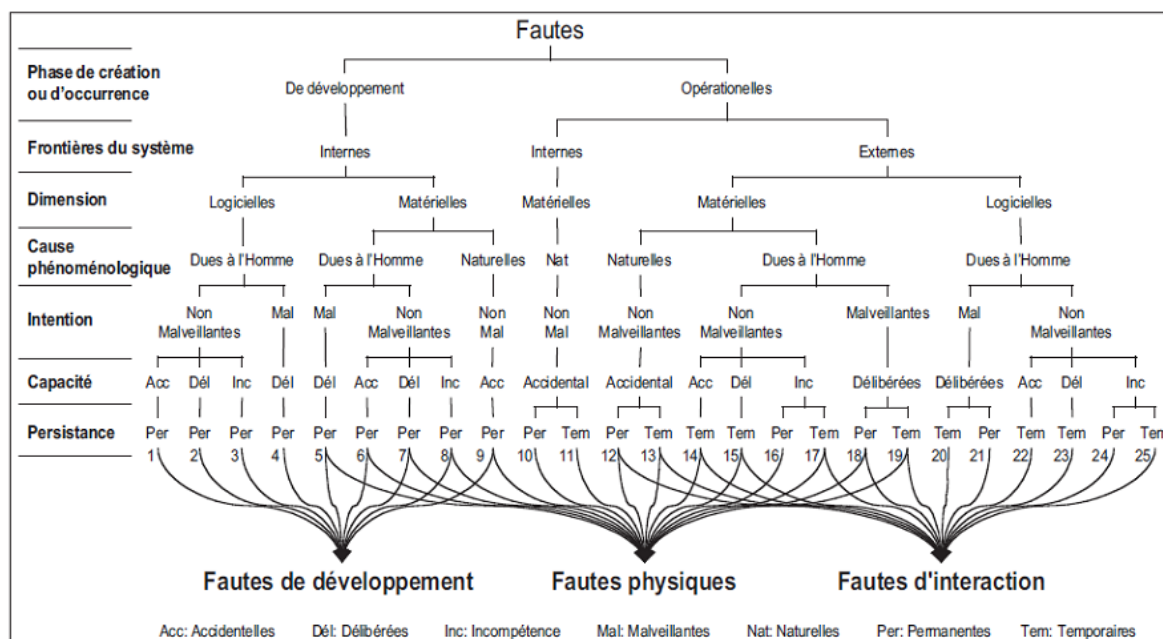


FIGURE 1.3 – Catégorisation [Avizienis et al., 2004] provenant de [Arlat et al., 2006].

Fautes de développement									Fautes d'interaction															
									Fautes physiques															
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Défauts logiciels			Logiques malignes		Errata matériels		Défauts de production		Dégradat. physiques		Agressions physiques						In-trus.		Vi-rus		Erreurs d'entrée			

FIGURE 1.4 – Signification des numérotations.

Cette classification permet de situer la nature des fautes suivant plusieurs aspects. Il est possible de distinguer la phase d'occurrence de la faute qui détermine à quelles étapes la faute est susceptible de se produire. La dimension de la faute permet de caractériser l'origine de celle-ci ; la faute peut être en particulier de nature matérielle ou logicielle. Enfin, cette classification nous permettra aussi de connaître si les fautes sont malveillantes ou non vis-à-vis de l'intention de l'auteur.

En termes de techniques de tolérance aux fautes, la figure 1.5 présente des principes de tolérance d'un système tolérant aux fautes. Cette proposition utilise principalement deux composants de base : la détection d'erreur et le rétablissement du système. Le deuxième composant servira à accomplir le traitement des erreurs détectées par le premier composant avec comme objectif d'éviter qu'une erreur ne se reproduise dans le futur. Ceci a pour objectif d'éviter le fait que le système risque de tomber en panne suite à une erreur commise ou une faute, quelle qu'en soit la nature.

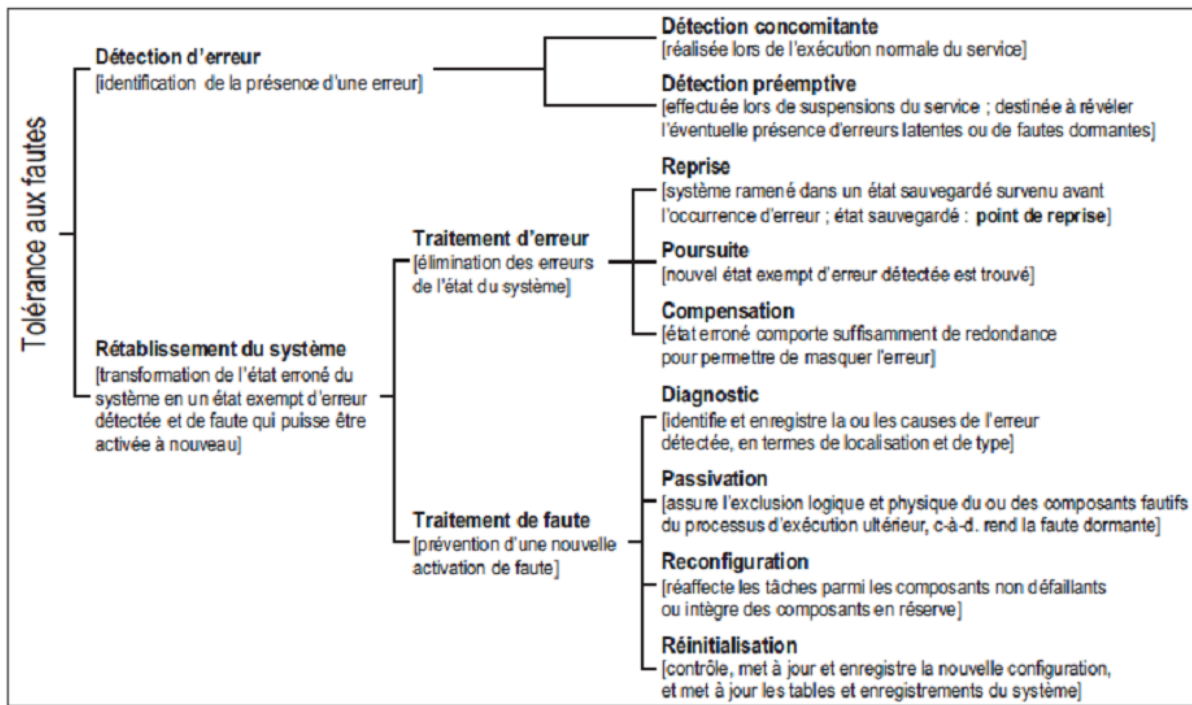


FIGURE 1.5 – Technique de tolérance aux fautes (provenant de [Arlat et al., 2006]).

Une première architecture générale d'un système tolérant aux erreurs humaines, provenant de [Tendjaoui, 1992] est fournie en figure 1.6 :

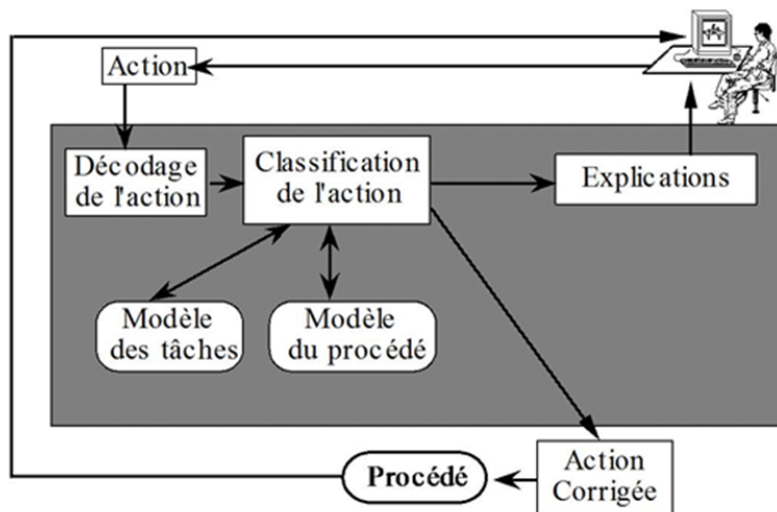


FIGURE 1.6 – Architecture d'interface tolérante aux erreurs [Tendjaoui, 1992].

Une évolution de cette architecture, disponible dans [Nguema et al., 2000], et visible en Figure 1.7 (avec HETI signifiant Human Error Tolerant Interface), est résumée par [Thevenin, 2001] :

- Un premier module appelé décodeur qui prend en charge la traduction des intentions de l'opérateur humain en données exploitables par le système informatique.

- Le module suivant joue le rôle d'un classifieur de l'action présumée de l'opérateur, en se basant sur un modèle des tâches prescrites de l'opérateur et sur un modèle de l'application. Ensuite, il effectue une correction si cette dernière n'est pas conforme avec les consignes de production.
- Un autre module prend en main l'explication à l'opérateur humain des problèmes liés à l'action d'origine et des avantages apportés par l'action corrigée, vis-à-vis des consignes de départ.

Plusieurs travaux de recherche ont fait l'objet d'études particulières portant sur la réalisation d'interfaces tolérantes aux erreurs humaines, dans un cadre de système complexe. Nous pouvons citer entre autres celles proposées par [Rasmussen, 1986] et [Rouse & Morris, 1985; Rouse et al., 1988]). En termes de réalisation, un modèle permettant de construire un système d'aide "intelligente" aux pilotes d'avion a été proposé par Amalberti & Deblon [1992]. Ce modèle cognitif sert à développer un système intelligent d'assistance à la navigation qui peut fonctionner comme un automate ou comme un système de soutien tactique. Il permet une classification des erreurs humaines selon les catégories suivantes :

- les erreurs de routine et d'inattention,
- les erreurs guidées par un faux modèle mental,
- les erreurs dues à un manque de connaissances,
- les erreurs de personnalité.

Un autre exemple a été introduit par Masson et De Keyser [Masson & De Keyser, 1992] avec la proposition d'un système "intelligent" de prévention d'erreurs dans le cadre du contrôle de procédé. A ce sujet, plusieurs modèles d'erreurs humaines existent dans la littérature, citons [Roscoe & Williams, 1980; Nagel, 1988] dans le domaine de l'aviation, ces deux modèles concernant particulièrement les erreurs d'inattention. Pour terminer, des propositions ont été introduites par [Nguema et al., 1992], [Nguema et al., 2000] et [Agah & Tanie, 2000] en utilisant la logique floue en vue de la conception d'une interface tolérante aux erreurs humaines.

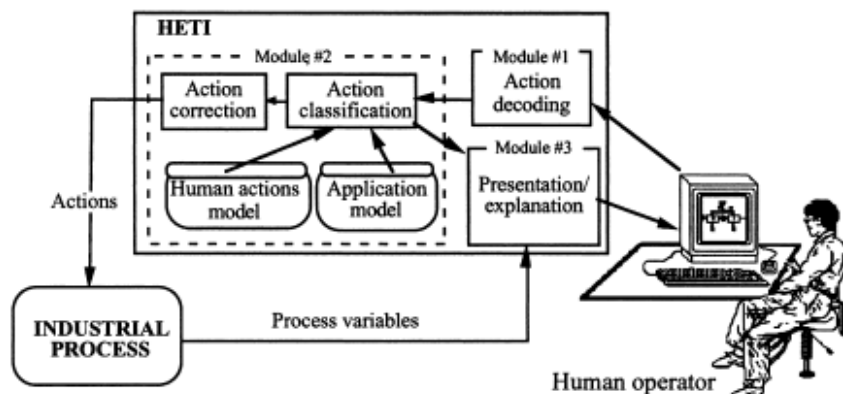


FIGURE 1.7 – Exemple d’interface tolérante aux erreurs [Nguema et al., 2000].

1.4 Interfaces adaptatives

L’adaptation fait partie des critères permettant de modéliser une interaction intelligente. En d’autres termes, les interfaces adaptatives sont des dispositifs intermédiaires qui doivent s’adapter d’une manière dynamique aux exigences du système et aux utilisateurs.

1.4.1 Définition d’une interface adaptative

Par définition, l’interface humain-machine adaptative est un type d’interface possédant, en principe, la capacité de s’adapter à chacun n’importe quel utilisateur [Gullà et al., 2015; Norcio & Stanley, 1989]. En général, elle s’appuie sur un modèle de l’utilisateur humain en prenant en compte des éléments caractéristiques (connaissances, préférences, expérience, etc.). Avec la prise en compte des fonctionnalités du système, ce genre d’interface vise à offrir à l’utilisateur une certaine simplicité en termes d’utilisation et de manipulation. Il facilite ainsi la recherche de solutions adaptées aux problèmes rencontrés dans le cadre de la réalisation d’une tâche, pouvant s’avérer plus ou moins complexe. Ainsi, la modélisation et la conception des IHM adaptatives a fait l’objet de très nombreux travaux depuis ces trente dernières années. Ceci entraîne une certaine pluridisciplinarité en matière de recherche, en faisant appel à différentes branches, telles que les sciences de l’information, les sciences humaines (ex. : la psychologie), l’intelligence artificielle, la pédagogie, etc.

1.4.2 Principe d'Adaptation

En vue de la modélisation d'un système adaptatif, plusieurs travaux menés sur les systèmes adaptatifs ont permis d'identifier différentes sortes d'adaptation. Dans un but de clarification, nous allons donner quelques définitions utiles à la compréhension du concept. L'adaptation d'une application est sa capacité à satisfaire l'utilisateur dans sa situation ou contexte d'interaction. Pour simplifier, le contexte est le triplet (*utilisateur, plateforme, environnement*), [Thevenin, 2001].

L'adaptabilité d'un système désigne un comportement dans lequel il peut exécuter les demandes de personnalisation à l'initiative de l'utilisateur. Du point de vue de la conception, il s'agit d'adaptabilité. L'adaptativité : On dit qu'un système interactif est adaptatif s'il peut s'adapter automatiquement à n'importe quel utilisateur, dans n'importe quelle situation [Thevenin, 2001]. Selon une approche globale, [Vanderdonckt et al., 2005] précise qu'un espace d'adaptation contient la Cause de l'adaptation, de l'objet qui s'adapte, du moment où l'adaptation se produit, de l'acteur qui déclenche l'adaptation et enfin la manière dont l'adaptation se réalise.

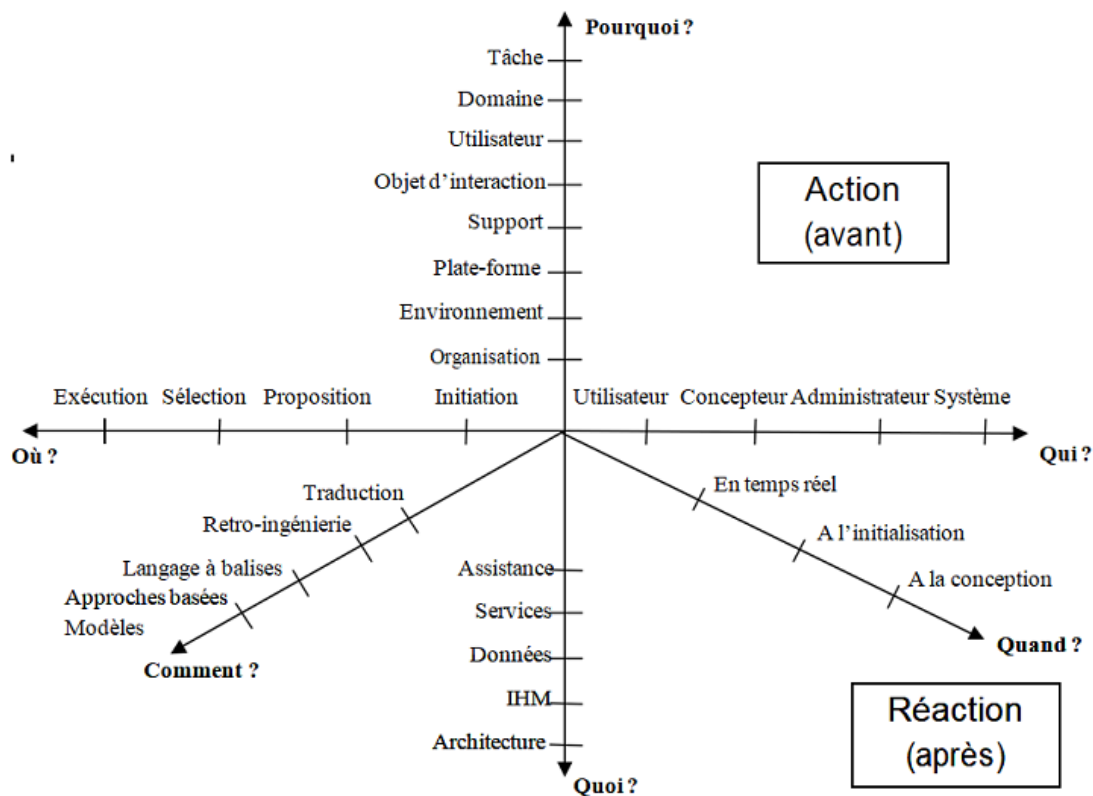


FIGURE 1.8 – Espace de conception.

Dans la figure 1.8, les différents aspects de l'adaptation sont montrés suivant plusieurs axes. Suivant l'axe des causes, on a affaire à une adaptation aux caractéristiques physiques

de la plate-forme, ou une adaptation environnementale. Suivant l'axe du quand, l'adaptation est statique, c'est-à-dire que les contraintes peuvent être fixées à la conception, et l'interface est générée en fonction, ou l'adaptation est dynamique, c'est-à-dire qu'au cours de l'exécution, l'interface est adaptée en fonction des variations de contraintes. Selon l'axe des objets, l'adaptation suit la hiérarchisation des tâches. Selon l'axe de l'acteur, l'humain ou le système lui-même, peut gérer l'adaptation.

1.4.3 Critère d'adaptation

En vue de la conception d'une interface adaptative, on doit savoir : à quoi s'adapter ? Qui adapte et quand a lieu l'adaptation ? Qu'adapte-t-on et Comment ? Selon quels critères ? Avec quoi ? [Habieb-Mammar & Tarpin-Bernard, 2004]. Pour cela, Vanderdonckt et ses collègues [Vanderdonckt et al., 2005] ont essayé d'apporter des éléments de réponse en proposant un espace de conception pour la prise en compte des informations du contexte. La figure 1.9 représente cet espace de conception.

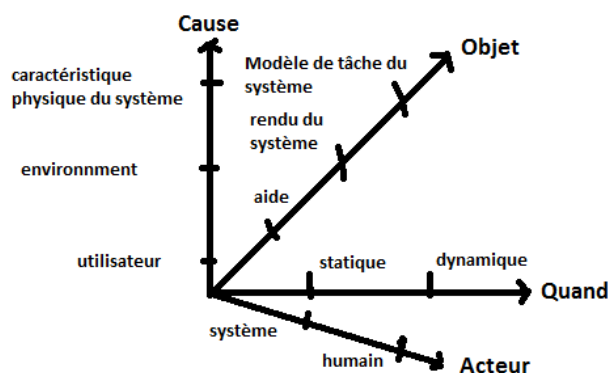


FIGURE 1.9 – Espace d'adaptation.

Dans cette figure 1.9, les axes correspondent aux questions permettant l'identification du chacun des éléments faisant l'objet d'une adaptation en matière d'interaction humain-machine. Les réponses aux questions pointées au sommet de chacun des axes sont données sous forme d'une graduation tout au long de l'axe concerné. Selon toujours les explications fournies dans [Vanderdonckt et al., 2005], la partie supérieure de l'espace de conception désigne la variation de contexte qui va à son tour provoquer l'adaptation (l'action), la partie inférieure quant à elle représente les éléments impliqués dans le processus.

1.4.4 Le processus d'adaptation

Le processus d'adaptation constitue le cœur du système pouvant procéder à la réalisation d'un service adapté à l'utilisateur. Il peut également relever de configurations

qui combinent les caractéristiques de l’adaptabilité (i.e. contrôle par l’utilisateur) et de l’adaptativité (i.e. contrôle initié par le système). La Figure 1.10 représente différents types de processus d’adaptation.

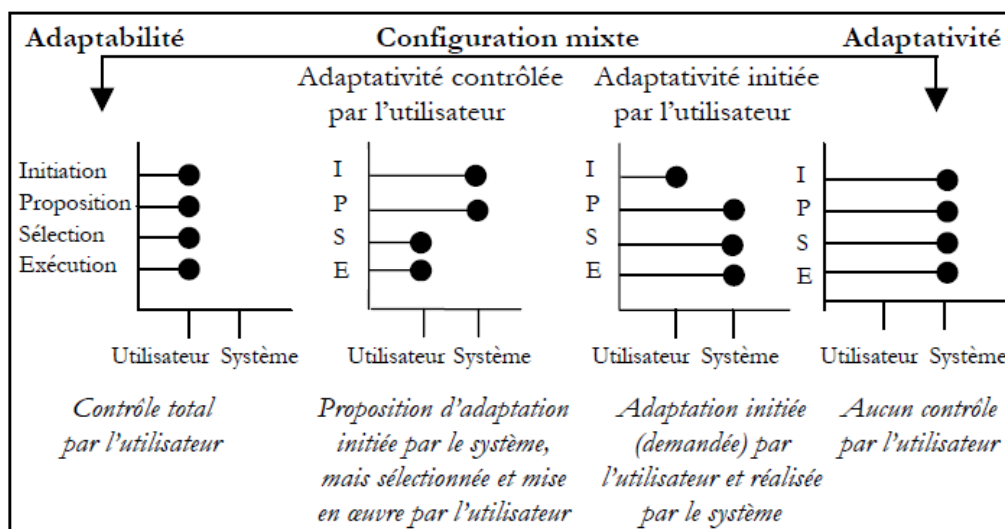


FIGURE 1.10 – Différents types de processus d’adaptation selon Dieterich [Dieterich et al., 1993](traduction provenant de [Vacherand-Revel et al., 2005]).

Concernant les approches en vue d’obtenir l’adaptation, nous pouvons citer entre autre le travail de [Giuffrida et al., 2019b] qui a introduit un système utilisant la logique floue en vue de modéliser une interface humain-machine adaptative. Ces auteurs ont utilisé dans cette approche Fuzz4u pour un site web personnalisé (des utilisateurs en situation de handicap par exemple) afin de pouvoir effectuer une réservation d’hôtel [Giuffrida et al., 2019a]. Une architecture d’interface adaptative dans un cadre de procédé industriel a été proposée par [Tendjaoui, 1992], (cf. Figure 1.11). Le système proposé est composé essentiellement d’un système intelligent d’aide à la décision qui permet de prendre les bonnes décisions en termes d’informations à présenter, et d’un système de gestion de l’interface utilisateur qui prend en charge la manière de présenter l’information.

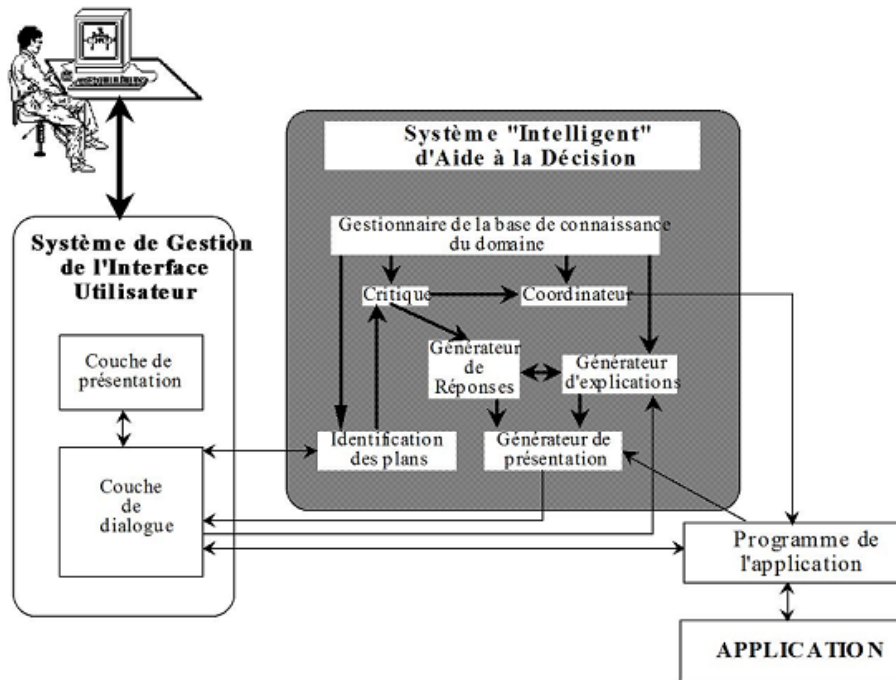


FIGURE 1.11 – Exemple d'interface adaptative [Hefley, 1990] provenant de [Tendjaoui, 1992].

1.4.5 Approches à base d'agent(s) pour l'adaptation

En ce qui concerne les agents dans les interfaces adaptatives, [Fels & Hinton, 1990] ont utilisé des techniques basées sur les réseaux des neurones artificiels pour concevoir ce type d'interface. Par ailleurs, [Vaudry & Crampes, 2001] ont proposé une architecture pour la modélisation de l'adaptation dans des interfaces Humain-Machine. Celle-ci prend la forme d'un modèle applicable à différents types d'application interactive. Son avantage est qu'il permet la présentation des fonctions qui peuvent intervenir dans un processus d'adaptation, indépendamment du type d'application visée. La figure 1.12 représente l'architecture proposée :

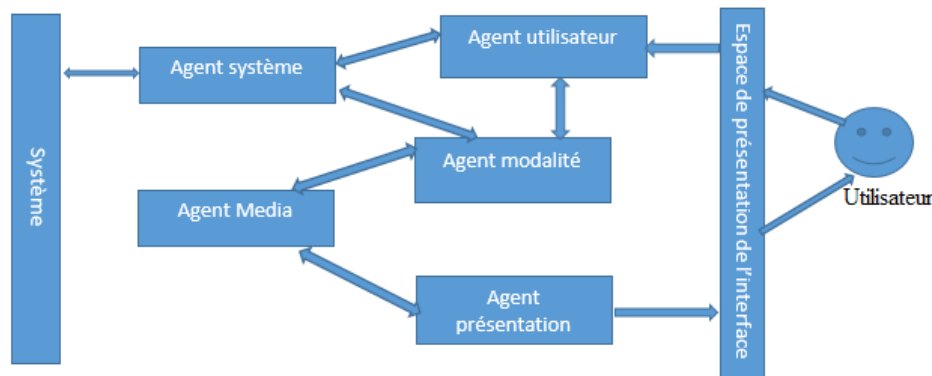


FIGURE 1.12 – Architecture basée sur des agents pour la modélisation des IHM Adaptatives [Vaudry & Crampes, 2001]

Cette architecture présente un modèle plutôt général avec visée d'adaptation des interfaces humain-machine. Il propose différents modules considérés comme importants pour l'adaptation, contenant des fonctions d'adaptation distribuées dans plusieurs agents.

Une autre approche à base d'agents en vue de la modélisation d'une interface adaptative a été proposée par [Victor & Montero, 2005]. Le système proposé est un système multi-agent capable de gérer le processus d'adaptation de manière flexible ; dans celui-ci le même langage est utilisé pour la spécification de l'interface utilisateur et des règles d'adaptation. En plus, le système proposé détecte le contexte d'utilisation au moyen d'un ensemble de capteurs qui modifient le modèle de contexte inclus dans les croyances des agents, ce qui fait que le SMA réagit efficacement pour adapter l'interface utilisateur aux différentes situations produites par les changements du contexte d'utilisation détectés par les capteurs. Pour terminer cette partie consacrée à l'étude de l'adaptation en interaction humain-machine en utilisant un système multi-agent, [Viano et al., 2000] ont proposé une architecture innovante d'interface multimédia auto-adaptative, basée sur la collaboration entre des agents intelligents. D'après ces auteurs, l'utilisation de cette technologie devrait permettre d'accélérer la conception et la mise en œuvre d'interfaces multimédia centrées sur l'utilisateur, et d'améliorer considérablement leur convivialité. L'architecture proposée sépare les connaissances génériques sur la gestion adaptative des interfaces utilisateur des connaissances spécifiques aux applications afin de fournir un cadre générique pouvant être adapté à différents domaines d'application. Pour terminer, ils ont établi un mécanisme d'adaptation selon les réponses de l'opérateur humain. Un résumé à ce sujet est fourni dans le tableau 1.1 ; celui-ci met en avant le processus d'adaptation, devant être pris en charge par des agents, en fonction de l'état de la réponse de l'opérateur.

TABLEAU 1.1 – Adaptation selon la réponse de l’opérateur : cas AMEBICA [Vaudry & Crampes, 2001]

Réponse de l’opérateur	Processus dans un état normal	Processus dans un état perturbé, taux d’informations élevé	Processus dans un état perturbé, taux d’informations faible
Normale	Adaptation déclenchée uniquement par le processus	Adaptation déclenchée uniquement par le processus	Adaptation déclenchée uniquement par le processus
Retardée (par rapport au temps de réponse attendu)	Accentuer la présentation pour attirer l’attention	(4) Surchargé : Filtrer les informations, alléger la présentation	(7) Paralysé : Répéter les informations récentes, essayer des représentations alternatives
Erratique (erreurs de manipulations occasionnelles)	(2) Inattentif : Accentuer la présentation pour attirer l’attention	(5) Surchargé : Alléger l’affichage, supprimer les informations inutiles	(8) Perte partielle de compréhension : Changer de modalité
Désorganisée (erreurs de manipulations répétées)	(3) Confus, perte de contrôle : Passer à une vue plus générale	(6) Perte importante de contrôle : Aide ("Voice of God")	(9) Perte totale de compréhension : Généraliser d’un niveau, résumer l’information

1.4.6 Conclusion sur les interfaces adaptatives

Dans cette partie, nous avons présenté des concepts d’Interface Humain-Machine adaptative, en rapport avec notre travail portant sur la proposition d’un modèle d’interaction. Relativement à ce domaine riche, ayant fait l’objet de nombreuses propositions depuis une trentaine d’années, nous avons mis l’accent sur le processus d’adaptation en vue d’une interaction intelligente. La section suivante présente une autre notion, un peu plus élargie en termes d’interaction humain-machine : le système interactif sensible au contexte. Dans l’objectif d’une interaction intelligente, nous allons expliquer la notion de contexte avant de caractériser cette notion de système interactif sensible au contexte.

1.5 Du contexte aux systèmes interactifs sensibles au contexte

1.5.1 Définition du contexte

Nous allons commencer par fournir quelques définitions du contexte selon les dictionnaires :

- Selon Technoscience, encyclopédie scientifique en ligne : *“le contexte d’un événement inclut les circonstances et conditions qui l’entourent. En informatique, le contexte est l’ensemble des conditions sous lesquelles un dispositif est en train d’être utilisé, par exemple l’occupation actuelle de l’utilisateur”*.
- Selon le Grand Dictionnaire Technologique (GDT) : *“texte entourant un terme, ou situation dans laquelle ce terme est employé. En informatique, ensemble d’informations concernant l’action du stylet, en rapport principalement avec sa localisation à l’écran, qui permet au système d’exploitation de l’ordinateur à stylet de différencier les commandes et l’entrée des données, et de fonctionner en conséquence”*.
- Selon le Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales : *“Ensemble de circonstances liées, situation ou un phénomène apparaît, un évènement se produit. En informatique, le contexte est l’ensemble d’informations concernant un évènement en rapport ‘ principalement avec sa localisation, qui permet au système informatique de fonctionner et de s’adapter en conséquence”*.

La définition du contexte d’utilisation a fait l’objet de plusieurs tentatives dans la littérature. L’expression *“context-aware”* a été introduite pour un système interactif ayant la capacité de reconnaître l’identité des personnes, leur localisation, des objets à leur proximité ainsi que les modifications pouvant modifier le comportement de ces objets [Schilit & Theimer, 1994]. Dey [Dey, 2001] définit le contexte comme : *“toutes les informations qui peuvent être utilisées pour caractériser la situation d’une entité. Une entité est une personne, un lieu, ou l’objet que l’on considère pertinent pour l’interaction entre un utilisateur et une application, y compris l’utilisateur et l’application eux-mêmes”*. Une autre définition du contexte est fournie par Rey et Coutaz. Ces auteurs ont essayé de proposer une définition formelle pour le contexte d’interaction, en s’intéressant particulièrement aux changements du contexte (au sens de [Dey, 2001]) dans le temps : *“Etant donné un utilisateur U , engagé dans une activité A , le contexte d’interaction à l’instant t est la composition des situations entre les instants t_0 et t pour la réalisation de A par l’utilisateur U ”* en expliquant que la notion de situation traduit les *“circonstances qui entourent*

l'action” [Rey & Coutaz, 2003]. Ces dernières années, les tentatives de proposer une définition de contexte ont fait l’objet de plusieurs travaux de recherche. Actuellement, la définition la plus souvent adoptée par les équipes travaillant dans le domaine de l’interaction humain-machine, et plus précisément concernant l’étude des systèmes interactifs, décrit le contexte par le triplet “*Utilisateur, Plate-forme, Environnement*” [Calvary et al., 2003] [Vanderdonckt et al., 2005] où :

- la plate-forme désigne les outils (matériels et logiciels) utilisés dans le cadre de l’interaction.
- l’environnement correspond à l’environnement physique dans lequel l’interaction a lieu.

En général, le contexte est décrit par un ensemble d’informations, ou bien par les valeurs des variables qui peuvent modifier les circonstances de l’interaction. Par exemple, la luminosité, le bruit, la localisation, la présence ou non d’une couverture de réseau Wifi, etc. De plus amples détails sont fournis ci-dessous.

1.5.2 Description d’éléments possibles pour la description du contexte

1.5.2.1 L’utilisateur

D’abord, le modèle de l’utilisateur fait partie des premiers modèles utilisés dans les processus d’adaptation des systèmes interactifs [Fischer, 2001]. Selon Hôök et al. [Hôök et al., 1998], "Un modèle utilisateur est une connaissance à propos de l’utilisateur, explicitement ou implicitement codée, utilisée par le système afin d’améliorer son interaction". Les éléments de base permettant de constituer ce modèle sont composés en particulier des préférences, des expériences, les connaissances, des capacités visuelles, cognitives et motrices [Woodly et al., 2007] :

- Les préférences : chaque utilisateur possède ses propres préférences, et c’est généralement lui qui les communique explicitement au système en personnalisant son environnement de travail. Les préférences peuvent aussi être analysées automatiquement par le système, en se basant sur des interactions précédentes.
- Les expériences : elles désignent les informations liées à l’habitude et les expériences passées, qui ne pas forcément en relation avec l’application considérée (par opposition aux connaissances, abordées ci-dessous). Parfois, l’expérience est décrite par un niveau : débutant, intermédiaire et avancé.

- Les connaissances de l'utilisateur constituent un élément essentiel du modèle de connaissance qui est largement utilisé, le plus souvent, dans le domaine pédagogique. En effet, les connaissances sont généralement acquises au départ dans des centres de formation, des écoles ou bien des instituts ; mais elles peuvent aussi être acquises sur le terrain (ou sur le poste de travail), au fur et à mesure des situations rencontrées. Un système adaptatif qui utilise les connaissances de l'utilisateur doit gérer les changements d'état de celles-ci et mettre à jour le modèle utilisateur en permanence.
- Les capacités perceptives, motrices et cognitives désignent généralement différentes caractéristiques, telles que l'aptitude de l'utilisateur en matière de capacité intellectuelle, son niveau de perception visuelle, son habilité par exemple à utiliser le clavier ou un pointeur, etc. La mise en œuvre de ces capacités peut déboucher sur de grandes variations, dès lors qu'on s'intéresse aux utilisateurs en situation de handicap, domaine vaste et riche [Stephanidis, 2009].

1.5.2.2 La plate-forme

Elle désigne l'ensemble des dispositifs d'interaction utilisés. La plus répandue est l'ordinateur personnel fixe ou portable, les assistants personnels numériques (PDA) et les téléphones mobiles. De grands supports d'interaction peuvent être utilisés, qu'ils soient verticaux ou horizontaux (voir par exemple [Kubicki et al., 2013b] pour un modèle de contexte centré sur les tables interactives). Ces dernières années, l'internet des objets a pris une place de plus en plus importante, en mettant en œuvre les objets connectés, avec de nombreuses applications en domotique, ville intelligente, etc. [Jaafar et al., 2019; Miori & Russo, 2014].

Suite à cette évolution incessante et rapide des plates-formes d'interaction, il est nécessaire de promouvoir les recherches portant sur la construction de modèles ayant en vue l'efficacité et la satisfaction des utilisateurs. Pour modéliser une plate-forme d'interaction, on doit considérer les deux facettes incontournables, allant de pair dans le cas d'un système informatique : la partie matérielle qui désigne l'aspect physique de la plate-forme ; la partie logicielle regroupant le logiciel système et les autres outils (navigateur, traitement de texte/image, applications diverses). Relativement au contexte, les informations peuvent être classifiées en plusieurs catégories, descriptives particulièrement : (1) des dispositifs d'interaction en entrée (souris ou dispositif de pointage, clavier, microphone, stylet, objets tangibles, etc.), (2) des dispositifs d'interaction en sortie (écran, mur interactif, haut-parleurs, etc.) et (3) des capacités physiques du support (processeur, mémoire, capacités de calcul, etc.).

1.5.2.3 L'environnement

En tant que composant du contexte, l'environnement désigne l'ensemble des lieux où l'utilisateur entre en interaction avec le système interactif, ainsi que les informations caractérisant ces lieux. En d'autres termes, il peut être décrit par un ensemble d'informations pouvant avoir une influence sur l'interaction, et qu'il s'agit donc de prendre en compte, aussi bien lors de la conception, que durant l'exécution du système sensible au contexte [Calvary et al., 2004]. On peut ainsi explicitement considérer des informations pouvant impacter d'une manière ou d'une autre l'utilisateur, le système et l'interaction humain-machine. Par exemple, la luminosité, l'ambiance sonore, la localisation géographique (le fait d'être à la maison, au travail, dans la rue, dans un transport collectif, etc.), les conditions météorologiques, etc.

1.5.3 Modélisation du contexte

La représentation de contexte est la structuration de ce contexte selon un modèle. Le choix du modèle dépend fortement de mécanismes choisis pour adapter les actions du système au contexte. Plusieurs méthodes de représentation ont été proposées dans la littérature, en invoquant les diverses approches de modélisation et de représentation des données. Ces méthodes sont synthétisées par Riahi dans la figure 1.13. Cette figure synthétise les modèles existants pour la représentation et la modélisation du contexte. On y retrouve des modèles graphiques, des modèles textuels, des modèles utilisant un langage de balisages et des modèles relevant de l'intelligence artificielle.

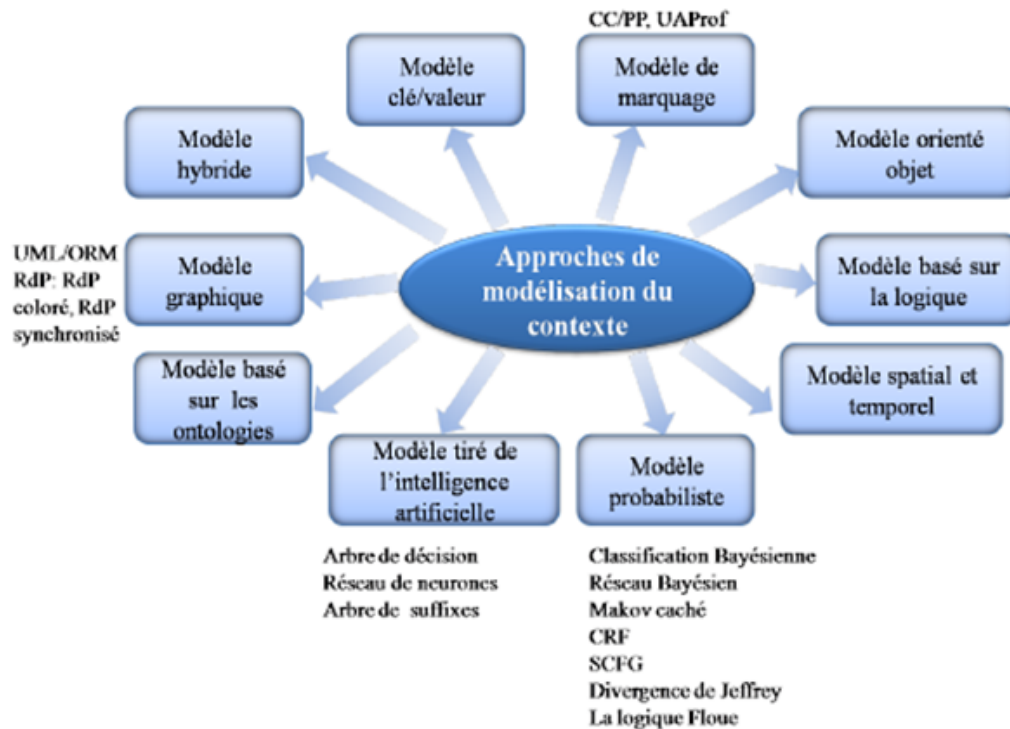


FIGURE 1.13 – Les différentes approches de la modélisation du contexte [Riahi, 2016].

1.5.4 Système interactif sensible au contexte

Dans les sections précédentes de ce chapitre, nous avons introduit plusieurs aspects liés à l’interaction humain-machine intelligente : aspects d’intelligence, d’adaptation ou de tolérance aux erreurs humaines. Dans cette section nous allons généraliser les notions en étudiant particulièrement le système interactif sensible au contexte.

1.5.4.1 Définition d’un système sensible au contexte

En général, un système interactif est dit sensible au contexte s’il est capable d’identifier les circonstances qui entourent l’action utilisateur en vue d’offrir des réponses appropriées en fonction du contexte. En d’autres termes, il peut interpréter et utiliser des informations issues du contexte et adapter sa réponse en fonction de celui-ci. Ceci correspond à la première définition de la sensibilité au contexte proposée par Shilit et Theimer en 1994 [Schilit & Theimer, 1994]. Ensuite, selon la définition de Salber et ses collègues [Salber et al., 1999], la sensibilité au contexte d’un système interactif désigne le comportement d’un système à agir en temps réel avec des données provenant des informations du contexte. Par ailleurs, une autre définition, selon Brown et ses collègues [Brown et al., 1997], introduit la notion d’un système sensible au contexte comme étant un système

qui est capable d'extraire automatiquement de l'information ou d'effectuer des actions en fonction du contexte utilisateur détecté par les capteurs. Enfin Abowd et ses collègues [Abowd et al., 1999] proposent une définition plus formelle : “un système est sensible au contexte s'il utilise le contexte pour fournir des informations pertinentes ou des services utiles à l'utilisateur, l'utilité dépend de la tâche de l'utilisateur”.

1.5.4.2 Structure d'un système sensible au contexte

D'une manière générale, l'architecture des applications sensibles au contexte est plus complexe que celle des applications entrant dans le cadre d'un système interactif ordinaire. Selon Dey [Dey, 2001], les systèmes interactifs classiques se différencient des systèmes sensibles au contexte au niveau des données utilisées : les données manipulées par les applications classiques sont limitées au niveau des variables internes de l'application ou bien des données d'entrée fournies par les utilisateurs du système. Par extension, le système sensible au contexte doit manipuler aussi des informations liées au contexte. Par conséquent, ces traitements concernent la capture de ces informations de contexte, la gestion et l'utilisation de ces informations pour fournir une sortie qui soit adaptée. Pour mener à bien tous ces traitements, une architecture en couche a été présentée par [Riahi, 2016]. La figure 1.14 montre un exemple d'architecture en couche d'un système sensible au contexte. Elle contient les cinq couches suivantes : Capture de contexte, Interprétation de contexte, Stockage de contexte, Diffusion de contexte et Couche application.

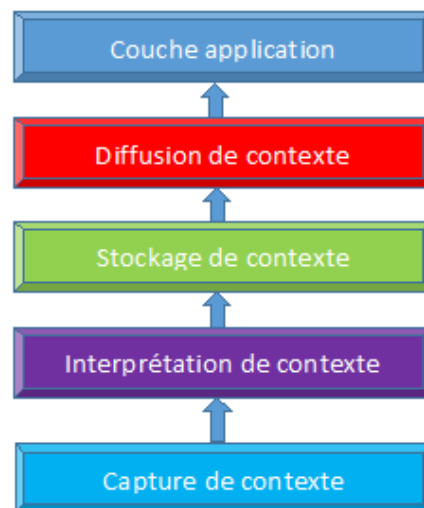


FIGURE 1.14 – Structure en couche d'un système sensible au contexte [Riahi, 2016].

Les explications provenant de [Riahi, 2016] concernant ces différentes couches de la Figure 1.14, sont résumées ci-dessous.

La couche capture de contexte : Les systèmes sensibles au contexte ont la capacité de détecter les changements de l'environnement dans lequel le système interactif se trouve. La couche de capture représentée, située au plus bas niveau de la structure en couche sur la figure 1.14, contient un ensemble de capteurs. Ces capteurs peuvent être classifiés selon leur nature :

- Capteurs physiques : ce sont des capteurs matériels qui permettent d'obtenir, en termes de quantité, les valeurs de grandeurs physiques, telles que la température, la position, l'intensité du son, la lumière, etc. Le capteur le plus utilisé est le GPS, pour connaître les coordonnées géographiques d'un utilisateur, en temps réel.
- Capteurs logiques : ces capteurs abstraits peuvent fournir des données à partir d'applications et de services logiciels. Par exemple, on peut consulter un calendrier électronique, un agenda digital personnel, etc.

Interprétation du contexte : L'interprétation du contexte se trouve juste en-dessus de la couche de capture de contexte. Cette couche permet d'obtenir une interprétation des données issues des différents capteurs. Elle sert à l'analyse et la transformation des données brutes, fournies par la couche de capture, selon d'autres formats beaucoup plus exploitables pour l'application. Les transformations effectuées sur les données brutes concernent l'extraction, la quantification et l'agrégation. Cette couche peut aussi avoir le rôle de résolution de conflits causés par l'utilisation de plusieurs sources de contexte.

Gestion de contexte : À ce niveau, le contexte capturé et interprété doit être bien géré pour en faciliter l'utilisation. La gestion de contexte contient le stockage et la représentation formelle des informations de contexte. Le stockage peut être centralisé ou distribué :

- Le stockage centralisé est le plus répandu et le plus utilisé puisqu'il facilite des mises à jour et des modifications des valeurs de contexte. Pourtant, cette solution se limite avec les contraintes de la capacité des équipements mobiles utilisés dans la sensibilité au contexte. Ces équipements sont caractérisés par leurs espaces de stockage restreints.
- Le stockage distribué remédie à la contrainte de l'espace de stockage des équipements utilisés. Cependant, il nécessite des fonctions additionnelles relatives à la synchronisation et à l'actualisation des valeurs de contexte.

La couche diffusion du contexte : Cette couche prend en charge la transmission et l'adaptation des informations du contexte, issues de la couche de stockage, afin qu'elles

soient prêtes à être exploitées par l'application. Pour mener à bien ces fonctions de diffusion, cette couche nécessite des techniques de communication appropriées pour transmettre les informations du contexte les plus adaptées vis-à-vis de la couche application. Ainsi, cette couche permet :

- la transmission à la couche suivante les ressources nécessaires aux développements d'application sensible au contexte.
- la notification du changement au niveau des informations du contexte.

La couche application : La couche application constitue le niveau le plus haut de la structure. Il prend en charge la définition des différents mécanismes d'adaptation ainsi que la gestion des services permettant au système interactif de réagir d'une manière pertinente par rapport à des événements provoquant un changement du contexte.

Ainsi, la figure 1.15 représente le fonctionnement d'un système sensible au contexte.

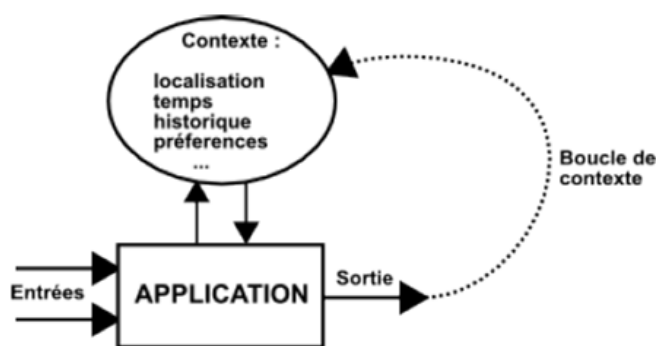


FIGURE 1.15 – Système sensible au contexte selon [Schilit et al., 1994].

Dans cette figure 1.15, l'application peut agir et modifier le contexte. C'est pourquoi les auteurs mettent l'accent sur une boucle de contexte où la sortie contextuelle de l'application va modifier les valeurs des variables contextuelles.

1.5.4.3 Difficultés liées à la sensibilité au contexte

Des difficultés découlant de la sensibilité au contexte proviennent de la capture, de la représentation en mémoire et du traitement des données du contexte. Dans certains cas, il faut équiper les dispositifs de capteurs supplémentaires (par exemple, permettant de connaître la température dans la pièce, ou de connaître la localisation de l'utilisateur en mobilité). Les données des capteurs doivent être filtrées et traitées, avec si besoin une utilisation de modules exploitant des méthodes d'analyse de données et/ou d'intelligence artificielle. Enfin, l'utilisation du contexte peut nécessiter la combinaison de données en provenance de plusieurs capteurs.

Nous allons terminer ce chapitre par un tableau récapitulant un ensemble d'approches représentatives portant sur l'interaction humain-machine intelligente.

1.6 Tableau de synthèse sur des approches représentatives provenant de la littérature

L'interaction humain-machine intelligente a fait l'objet de nombreuses recherches et études de cas depuis l'utilisation et l'exploitation des systèmes informatiques utilisant les interfaces humain-machine. Sans souci d'exhaustivité, le tableau 1.2 synthétise selon plusieurs critères, différentes recherches déjà menées sur l'interaction intelligente. Ainsi, un ensemble d'approches, certaines parmi les plus anciennes, permettant de montrer la variété des travaux dans ce domaine, sont mises en avant, tout en terminant par un positionnement de l'approche visée dans cette thèse. Parmi les approches citées, nous présentons aussi la notion d'adaptation vis-à-vis de certains éléments descripteurs de contextes. Un de nos objectifs est de montrer qu'aucune approche ou modèle d'interaction humain-machine n'a fait l'objet d'une utilisation explicite de la théorie des jeux en vue de d'obtenir un système adaptatif et sensible au contexte. Pour les différentes approches, visibles dans le Tableau 1.2, sont mises en avant le type d'interaction intelligente, le mécanisme logiciel (ou la technique particulière) sur lequel l'approche est basée, les critères d'adaptation et enfin l'étude de cas (ou domaine d'application) permettant d'illustrer ou de valider l'approche.

TABLEAU 1.2 – Tableau récapitulatif de quelques approches sur l'interaction intelligente.

Travaux	Type d'interaction intelligente (dénomination utilisée)	Mécanisme logiciel (ou technique particulière)	Critères d'adaptation	Étude de cas (ou domaine d'application)
[Rouse, 1977]	Système d'aide à la décision	files d'attente	Charge de travail, Nombre de tâches	Système avec des tâches indépendantes

[Chu & Rouse, 1979]	Système adaptatif	Théorie des files d'attente, Modèle de Prédiction de tâche	Temps d'attente, Occupation (humain-machine)	Gestion de vols
[Halpin, 1984]	Interface intelligente	Moteur d'inférence	Rôle de l'utilisateur, Profil de l'utilisateur	Système d'information militaire
[Tendjaoui et al., 1991]	Interface intelligente : Module Décisionnel d'imagerie	Moteur d'inférence	Criticité de la situation, Charge de travail de l'utilisateur, Expérience utilisateur, Surface d'affichage	Contrôle de procédé industriel
[Senay, 1992]	Interface intelligente	Moteur d'inférence, systèmes flous	Comportement de l'utilisateur, Préférence utilisateur	Non mentionné
[Vale et al., 1996]	Interface intelligente	Moteur d'inférence, systèmes flous	Erreur opérateur humain, Moyens d'interaction disponible, Temps d'exécution, Surface d'affichage, Préférences de l'utilisateur	Centre de contrôle
[Thevenin & Coutaz, 1999]	Interface humain-machine plastique	Moteur d'inférence	Caractéristiques physiques du système, Interacteur disponible, Surface d'affichage	Agenda électronique

[Agah & Tanie, 2000]	Interface intelligente avec contrôleur intelligent	Systèmes flous	But de l'utilisateur, Intention de l'utilisateur, Position curseur	Mouvement du curseur sur surface d'affichage
[Nguema et al., 2000]	Interface tolérante aux erreurs	Systèmes flous	Criticité, Comportement de l'opérateur, Erreur humain	Contrôle de procédé industriel
[Vaudry & Crampes, 2001]	Interface adaptative, Nom : AMEBICA	Agent rationnel de type BDI, Moteur d'inférence, Système flou	Comportement de l'utilisateur, Préférence utilisateur	Supervision industrielle
[Duric et al., 2002]	Interface adaptative	Modèle de Markov Caché (HMMs)	Capacité mentale, Criticité, Émotion, Etat cognitif de l'utilisateur, Charge de travail de l'utilisateur, Surface d'affichage, Profil de l'utilisateur	Interaction de l'utilisateur avec un simulateur d'environnement pour opérateur radar : ARGUS
[Victor & Montero, 2005]	Interface adaptative	Agent BDI, Plateforme multi-agent JACK	Données d'entrée utilisateur, Préférence de l'utilisateur	Nom mentionné
[Hariri, 2008]	IHM plastique	Moteur d'inférence	Préférence de l'utilisateur, Expérience de l'utilisateur, Environnement	Système de guidage touristique, Supervision d'usine chimique

[Dujardin et al., 2011]	Système de pilotage intelligent	Protocole de communication entre agents : bus WSE (web server Event)	Préférence de l'utilisateur, Profil de l'utilisateur, Localisation de l'utilisateur	Domotique
[Villaren, 2012]	IHM adaptative sensible aux contextes SAMANTA	Algorithme de recherche et de suivi des graphes	Etat physique et mental, Charge de travail de l'utilisateur, Préférence de l'utilisateur, Expérience de l'utilisateur, Surface d'affichage, Charge de travail, Nombre de tâches	Surveillance maritime, Système de commande et contrôle de drone, Contrôle de centrale nucléaire
[Riahi et al., 2013]	Interface adaptative sensible au contexte	Réseau de Petri : PNML	Criticité, Besoins de l'utilisateur, Contexte d'usage, Profil de l'utilisateur	Système de suivi médical du patient souffrant du diabète
[Bauer & Dey, 2016]	Système intelligent d'assistance	Fine-tuning mechanism	Criticité, Préférence de l'utilisateur, Expérience de l'utilisateur	Système intelligent pour aider le patient diabétique quotidiennement
[Taktak & Moussa, 2017]	Système d'assistance à l'utilisateur	Réseau de Petri : PNML	Capacité de l'utilisateur, Profil de l'utilisateur, Préférence de l'utilisateur, Surface d'affichage	Application mobile pour Assistance au voyage

[Giuffrida et al., 2019a]	IHM adaptative appelée Fuzzy4U	Systèmes flous	Perception de l'utilisateur, Localisation, Handicap, Surface d'affichage	Site web personnalisé pour la réservation d'hôtel
Approche visée dans le cadre de la thèse	Système adaptatif	Théorie des jeux	But de l'utilisateur, niveau de Criticité, niveau de charge de travail de l'utilisateur, niveau d'expérience de l'utilisateur	Simulation de la supervision de trafic routier

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un ensemble d'aspects relatifs à l'interaction humain-machine intelligente. Ce chapitre a démarré avec des notions générales sur l'interface humain-machine, tout en listant quelques domaines d'application possibles des interfaces intelligentes, au sens large du terme. L'objectif principal de ce chapitre était ensuite de présenter sous forme d'état de l'art différents types d'interaction intelligente, sans souci d'exhaustivité, mais plutôt de représentativité. En particulier, nous avons passé en revue des concepts d'interfaces dites intelligentes, d'interfaces tolérantes aux erreurs humaines, d'interfaces adaptatives, et enfin de systèmes interactifs sensible au contexte. Cette dernière catégorie nous intéresse en particulier, car l'objectif de ce travail porte sur la modélisation d'un système interactif adaptatif impliquant des êtres humains et des agents logiciels et considérant des informations du contexte.

Dans la dernière partie du chapitre, un tableau récapitulatif d'approches représentatives, visant une interaction intelligente, avec ou sans étude de cas, a été proposé et commenté. Malgré la variété des différentes solutions proposées, nous constatons qu'aucune de ces approches n'exploite un mécanisme d'adaptation s'appuyant sur la théorie des jeux. Le chapitre suivant, qui est aussi d'ordre bibliographique, se focalise sur un cas particulier de l'interaction humain-machine intelligente, sous la forme de l'interaction humain-agent qui constitue un sous-domaine de recherche, à l'intersection entre interaction humain-machine et intelligence artificielle/systèmes multi-agents.

Chapitre 2

Interaction humain-agent

2.1 Introduction

Les interactions entre les utilisateurs humains et les agents logiciels deviennent de plus en plus élaborées ces derniers temps. Avec la multidisciplinarité de l'interaction humain-machine, ceci peut engendrer de nouvelles formes d'interaction, telle que l'interaction humain-agent. Ceci souligne l'étroite collaboration qui peut exister entre un être humain et une entité informatique connue sous le nom d'agent. Par extension, on peut considérer l'interaction d'un ou plusieurs êtres humains avec plusieurs agents au travers d'un environnement dynamique. Dans cette section, nous allons rappeler quelques notions fondamentales concernant les systèmes multi-agents. Puis, nous introduisons un concept important dans ce domaine, la coordination. Quelques approches portant sur l'interaction humain-agent seront présentées dans cette section avant de terminer avec l'approche liée à notre étude de cas : la simulation du trafic.

2.2 Définitions sur les agents et systèmes multi-agent

2.2.1 Définition d'un agent intelligent

Notion d'agent : Par définition, un agent est une entité qui se trouve dans un environnement donné, capable de percevoir son environnement, d'agir en cas de besoin ou de communiquer avec d'autres agents [Wooldridge & Jennings, 1995; Wooldridge, 2009] (Cf. Fig 2.1).

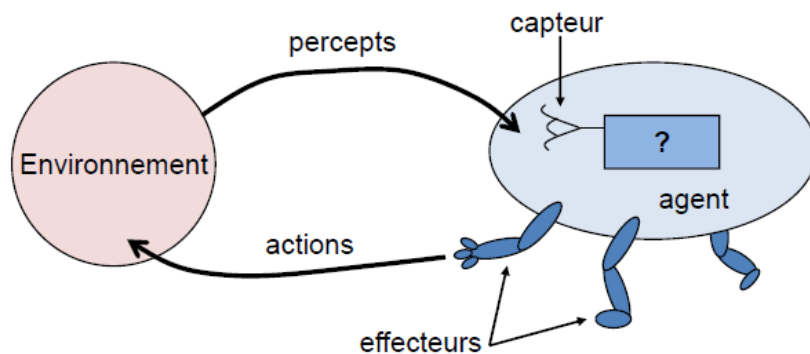


FIGURE 2.1 – Architecture simplifiée d'un agent [Russell & Norvig, 2003].

Avec ses compétences et ses ressources propres, il a aussi son objectif et la volonté de l'atteindre avec ou sans l'aide des autres agents. Il est pratiquement difficile de donner une définition formelle à un agent mais on peut le considérer comme une entité qui peut agir à sa façon dans un environnement donné [Wooldridge, 2002] Selon [Ferber, 1999] et [Wooldridge, 2002], nous pouvons rappeler les caractéristiques suivantes pour la définition d'un agent :

- **Perception** : il est capable d'agir sur son environnement à partir des informations qu'il reçoit de son environnement.
- **Autonomie** : il est capable d'agir sans l'intervention des autres (humain ou autre agent de même type) et contrôle ses propres actions ;
- **Proactivité** : il est doté d'un comportement proactif et opportuniste, en restant capable de prendre l'initiative au bon moment face à la situation ;
- **Capacité de donner une réponse** : il est capable de percevoir son environnement et d'élaborer une réponse dans le délai requis sans tarder ;
- **Sociabilité** : il est capable d'interagir avec des autres agents (logiciels ou humains) afin d'accomplir des tâches ou aider ces agents à accomplir leurs missions.

D'autres chercheurs se sont focalisés sur des propriétés plus spécifiques pour caractériser un agent intelligent [Wooldridge & Jennings, 1995; Wooldridge, 2009] et [Müller, 1999] :

- **Personnalisé** : L'agent intelligent est adaptable et peut être éventuellement configuré pour répondre aux besoins de l'utilisateur (on parle d'agent assistant).
- **Auto-adaptatif** : L'agent intelligent sait ajuster son comportement en fonction de la situation selon les attentes de l'utilisateur.
- **Auto-apprenant** : Il peut aussi mémoriser l'expérience antécédente pour mieux comprendre les buts actuels de l'utilisateur ou bien aller au-devant de ses désirs (aide en amélioration).

2.2.2 Les type d'agents

Les agents intelligents peuvent notamment être employés pour l'assistance du décideur et la collecte d'informations. Les agents destinés à l'assistance du décideur aident dans un premier temps celui-ci lors des premiers contacts avec le système, puis grâce à des fonctions d'auto-apprentissage, adoptent les habitudes de l'utilisateur pour anticiper ses désirs et ses préférences.

L'agent intelligent peut être en deux grandes catégories : Agents cognitifs et Agents réactifs. Pour pouvoir imiter le modèle de l'intelligence de l'être humain et son mode de raisonnement, plusieurs chercheurs en matière d'intelligence artificielle ont caractérisé un agent intelligent en s'inspirant des modèles mentaux de l'humain comme l'utilisation de la notion de connaissance, la croyance, les intentions, les désirs, les choix, les engagements et obligations [Rao & Georgeff, 1995]. En outre, il est important de rappeler que les agents intelligents doivent faire preuve de capacités d'apprentissage, de communication, de coopération et de raisonnement. Ceci pourra être utile en vue d'une interaction intelligente [Revelli, 1998].

Ceci est possible grâce à des croyances, des désirs dans le processus de raisonnement [Wooldridge & Jennings, 1995]. Une perspective mentale ou intentionnelle des agents intelligents n'est pas simplement une *invention* des concepteurs et développeurs orientés agents, mais demeure une problématique encore actuelle pour la description des systèmes distribués. De tels agents intelligents, principalement caractérisés par un niveau symbolique de la représentation des connaissances et par des notions mentales, sont nommés des agents cognitifs. Ces derniers possèdent une représentation partielle de l'environnement, des connaissances, des buts explicites, ils sont capables de planifier leur comportement, mémoriser leurs actions passées, communiquer par envoi de messages, négocier, etc. En complément de la propriété d'un agent classique, nous allons décrire brièvement la structure de l'agent BDI (Belief-Desire-Intention) qui illustre le concept d'agent cognitif, et qui est basée sur trois aspects :

- **La croyance (B)** : Constituée d'informations courantes qu'il possède à propos de son environnement.
- **Le désir (D)** : Constitué des objectifs à atteindre dans la mesure du possible.
- **L'intention (I)** : Constitué de plans à suivre pour exécuter des actions afin d'atteindre le but.

La figure 2.2 représente l'architecture générale d'un agent BDI (croyance, désirs et intention) :

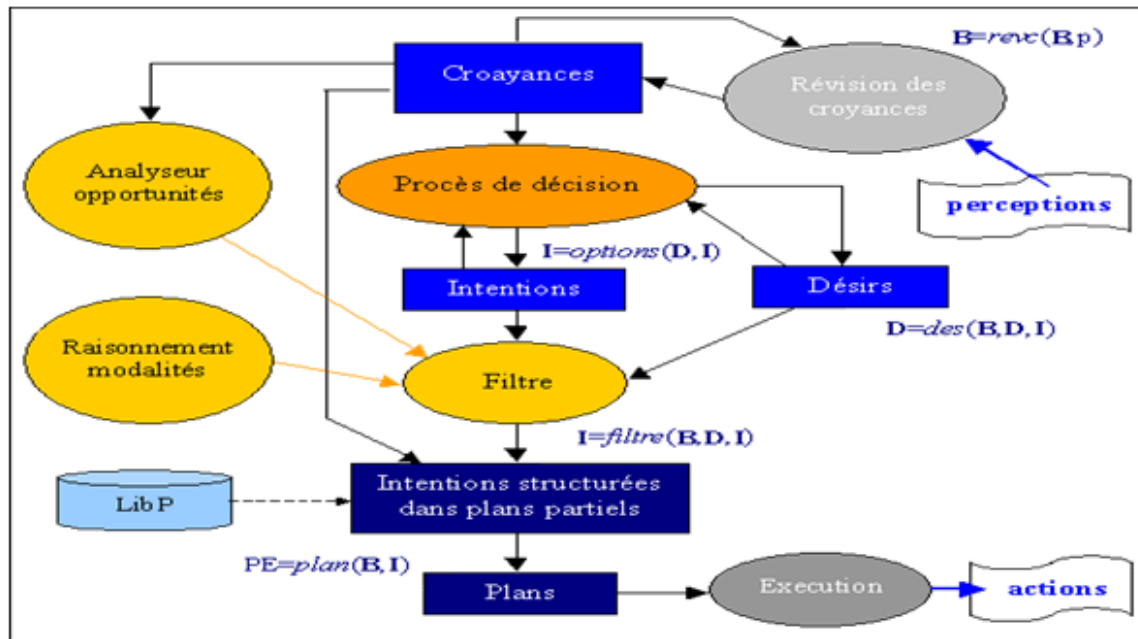


FIGURE 2.2 – Architecture d'un agent intelligent (BDI) [Wooldridge, 2009; Weiss, 1999].

Dans cette architecture, il y a principalement cinq fonctions définies à partir des désirs, des croyances et des intentions de l'agent intelligent :

revc : $B \times P \rightarrow B$ est la fonction de révision des croyances de l'agent lorsqu'il reçoit de nouvelles informations sur son environnement, où P représente l'ensemble des perceptions de l'agent ; elle est réalisée par la composante Révision des croyances ;

options : $D \times I \rightarrow I$ est la fonction qui représente le processus de décision de l'agent prenant en compte ses désirs et ses intentions courantes ; cette fonction est réalisée par la composante Processus de décision ;

des : $B \times D \times I \rightarrow D$ est la fonction qui peut changer les désirs d'un agent si ses croyances ou intentions changent, pour maintenir la consistance des désirs de l'agent (on suppose dans notre modèle que l'agent a toujours des désirs consistants) ; cette fonction est également réalisée par la composante Processus de décision ;

filtre : $B \times D \times I \rightarrow I$ est la fonction la plus importante car elle décide des intentions à poursuivre ; elle est réalisée par la composante Filtre.

plan : $B \times I \rightarrow PE$ est la fonction qui transforme les plans partiels en plans exécutables, PE étant l'ensemble de ces plans.

Agents réactifs

Les agents réactifs sont par contre considérés comme des agents qui ne sont pas effectivement à la hauteur de l'intelligence humaine d'une manière autonome, ils ont besoin d'interagir avec d'autres agents. Ils ne sont pas dotés a priori d'une représentation

symbolique de l'environnement. Leurs capacités répondent uniquement au mécanisme perception/action. Par conséquent, l'intelligence est distribuée entre plusieurs agents réactifs et le comportement intelligent du système sera obtenu via l'interaction entre ces agents réactifs et l'environnement. Par rapport à l'agent BDI, la structure générale d'un agent réactif est plus simple (voir fig 2.3) :

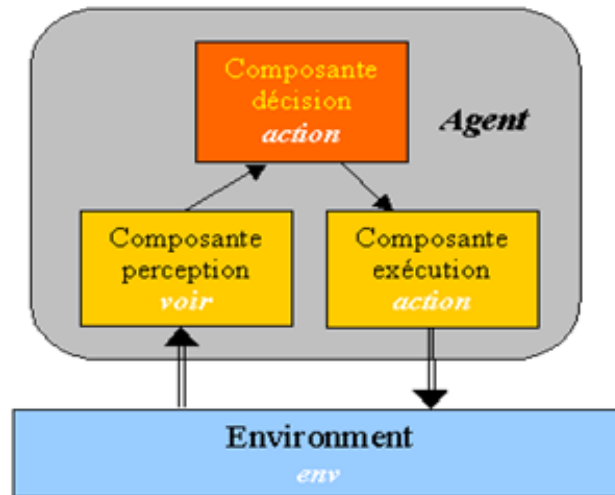


FIGURE 2.3 – Schéma d'un agent réactif [Weiss, 1999]

2.2.3 Le Système multi-agent

2.2.3.1 Définition

Un système comportant plusieurs agents s'appelle un système multi-agent. Dans ce cas, les agents peuvent communiquer entre eux, interagir, avec ou sans coopération pour un objectif commun ou individuel [Ferber, 1999]. [Ferber, 1995], [Ferber, 1999] et [Mandiau, 1993] rappellent qu'il est possible de définir un système multi-agent comme un système composé des éléments suivants :

- Environnement (E) i.e., un espace disposant généralement d'une métrique.
- Ensemble d'objets (O), ces objets sont situés i.e., pour tout objet il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E. Ces objets sont passifs i.e., et peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.
- Ensemble d'agents (A), qui sont des objets particuliers représentant les entités actives du système.
- Ensemble de Relations (R), qui unissent des objets et des agents entre eux.
- Ensemble d'Opérations (Op), permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de O.

- Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette technique de modification, que nous appellerons les lois de l'univers.

La figure 2.4 nous montre trois agents interagissant dans un environnement donné.

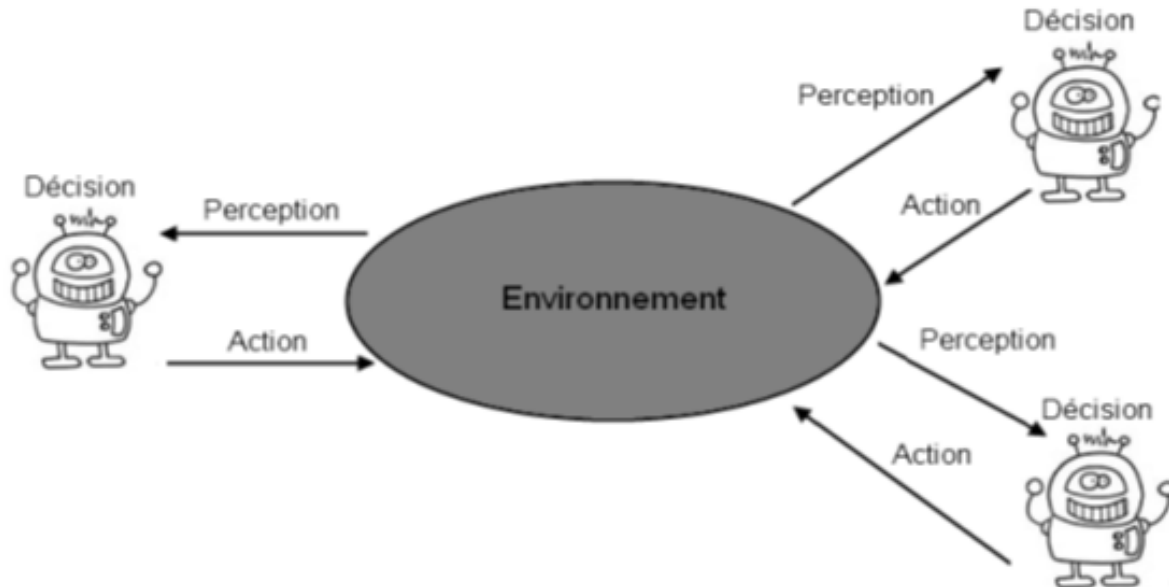


FIGURE 2.4 – Un système multi-agent (provenant de [Hamila, 2012]).

En d'autres termes, un SMA est un réseau d'agents faiblement couplés qui interagissent afin de résoudre des problèmes qui dépassent les capacités ou les connaissances individuelles de chacun des agents. Selon Demazeau, un SMA est constitué [Demazeau, 1995] :

- **D'Agents** : ce sont les agents qui interagissent
- **D'Environnements** : environnement physique ou situé
- **D'Interactions** : directes ou indirectes
- **D'Organisations** : top-down ou bottom-up

2.2.3.2 Caractéristiques des SMA

Un système multi agent peut être :

Ouvert : les agents peuvent participer ou se retirer du système pendant que le processus étudié se déroule. La composition et la taille du système en question évoluent avec le temps.

Fermé : l'ensemble d'agent reste le même et aucun agent ne peut sortir du système.

Un système multi-agent est dit homogène si tous les agents sont construits suivant le même modèle. Dans ce cas, on peut dire aussi que les agents ont la même nature. Il est

dit hétérogène dans le cas contraire : les agents peuvent avoir plusieurs natures différentes. Les agents dans un système multi-agent peuvent :

Coexister : Chacun des agents considère les autres agents comme des composantes de l'environnement. Dans ce cas, Il peut y avoir une sorte de communication indirecte parce que les agents peuvent se percevoir les uns les autres.

Etre en compétition : chacun des agents a pour objectif d'obtenir le maximum de satisfaction. La compétition est inévitable lorsque plusieurs agents veulent acquérir la même ressource. Pour cela, les agents doivent communiquer pour résoudre le conflit.

2.2.3.3 Communication

La communication désigne l'ensemble des processus physiques et psychologiques par lesquels s'effectue la mise en relation d'un émetteur avec un ou plusieurs récepteurs, dans l'intention d'atteindre certains objectifs [Cohen & Levesque, 1990]. Concernant l'intention, Nuyts a distingué explicitement l'intention de représentation qui peut être définie comme l'intention que l'expression linguistique représente un certain fait ou état de choses, tandis que son intention de communication est l'intention que prouve l'auditeur ayant la capacité de comprendre la représentation [Nuyts, 1993]. Dans un système multi-agent, la communication est un moyen ou une méthode de coopération ou d'interaction entre agents. Les acteurs principaux de la communication sont les agents du système.

Etre en coopération : Chacun ne se contente pas seulement de maximiser sa propre satisfaction ; il veut aussi considérer la satisfaction de l'ensemble.

Dans un système multi-agent, la mise en place de la communication entre les agents a été introduite pour diverses raisons. Il est très important de mettre en place la communication afin que les agents puissent :

- synchroniser leurs actions et résoudre des éventuels conflits (de ressources, de buts ou d'intérêts).
- s'entraider pour faire face aux limites de leurs champs et niveau de perception. En général, les agents du système communiquent :
 - lorsqu'ils sont face à un problème alors qu'ils ne sont pas en mesure de donner des solutions. L'incapacité du groupe à trouver des solutions est due au fait que les agents en question n'ont pas assez de ressources ou de compétences appropriées pour résoudre à temps un problème survenu.
 - lorsqu'il est nécessaire de coordonner les actions des agents.

- lorsqu'il y a un conflit entre plusieurs agents vis-à-vis des actions ou des ressources disponibles.

Nous allons nous focaliser dans ce chapitre, sur la partie coordination multi-agents. Nous ne prétendons pas être exhaustifs sur ce sujet ; mais nous donnons quelques indications sur l'un des aspects les plus difficiles du domaine.

2.3 Modèles de coordination

2.3.1 Définitions

Selon le dictionnaire Larousse, le terme **“coordination”** signifie littéralement : *“action de coordonner, harmonisation d'activités diverses dans le souci d'efficacité”*.

L'encyclopédie Universalis définit ce terme comme *“le fait de coordonner, de diriger les initiatives ou actions de plusieurs personnes dans le but commun”*.

Dans la société, une coordination de groupe désigne une sorte de rassemblement de personnes ayant des objectifs communs pour réaliser un projet commun. Elle consiste à coordonner un ensemble de personnes afin de produire un résultat satisfaisant. Dans cette thèse, nous nous intéressons aux définitions de ce mot, “coordination”, dans le domaine de l'informatique et plus particulièrement sur les SMAs. Pour cela nous pouvons citer les définitions suivantes :

Selon Gelernter et Garriero [Gelernter & Carriero, 1992], la coordination est *“le processus de construction de programmes en assemblant les parties actives ; un modèle de coordination est la colle qui lie des activités séparées en un ensemble”*. En outre, un modèle de la coordination a été proposé dans [Terán et al., 2013] en utilisant le protocole FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents). Ainsi, la coordination détermine les règles de bon fonctionnement du système et la gestion des activités des agents. En fonction de la nature des agents et des interactions, on peut considérer plusieurs formes de coordination : la coordination peut être imposée à chacun des agents par une sorte de contrat, comme le respect d'un protocole d'interaction donné. Elle peut aussi être acquise à travers un processus d'apprentissage, lorsque l'agent trouve un intérêt à participer à la collectivité. Dans ce sens, la notion de coordination est liée aux relations d'interdépendance qui peuvent s'établir entre les agents et plus généralement à la façon dont les agents sont organisés. En outre, [Agotnes & Bulling, 2014] ont décrit quelques méthodes formelles pour la coordination entre les agents dans un système multi-agent, telles que la stratégie de vote, la théorie des jeux, le principe de partage d'information en équipe, l'argumentation formelle. Selon Jennings et al. [Jennings et al., 1996], la coordination

peut être définie comme « le processus par lequel un agent raisonne sur ses actions locales et les actions (anticipées) des autres agents pour assurer que la communauté agit de manière cohérente ». Wooldridge [Wooldridge, 2009] considère la coordination comme la forme générique de l'interaction au sein d'un système multi-agent.

Dans le but de bien comprendre cette notion de “**coordination**”, certains auteurs se sont focalisés particulièrement sur la description des objectifs de la coordination. Lesser [Lesser et al., 1987] a défini les objectifs de la coordination comme suit :

- Les activités des agents permettent de résoudre tous les composants du problème global.
- Les interactions entre les agents sont cohérentes et s'intègrent dans la solution globale.
- Les groupes définis sont cohérents.

Selon Ferber [Ferber, 1999], la nécessité de la coordination d'actions au niveau d'un SMA repose sur le fait que :

- Tous les agents ont besoin d'informations et de résultats de la part des autres agents. Par exemple : un agent qui surveille l'activité d'un procédé industriel en un point donné aura besoin d'informations sur l'état de ce procédé en d'autres endroits.
- Les ressources matérielles et logicielles du système sont limitées, il faudra une structuration pour le partage et l'utilisation ces ressources d'une manière optimale. En d'autre termes, il ne faut pas gaspiller des ressources pour des actions inutiles, consacrer beaucoup plus de ressources pour les actions importantes dans le but d'éviter des conflits entre les agents ainsi que le dysfonctionnement du système.
- Les agents ont parfois des objectifs distincts mais dépendants les uns des autres. Pour chacun des agents, Il est primordial de satisfaire ces objectifs et d'accomplir leur travail grâce à des dépendances mutuelles.

2.3.2 Mécanismes de coordination

En se basant sur les propositions de Durfee [Durfee, 1996], la coordination au sein d'un système multi-agent est fondée sur des mécanismes de synchronisation, de planification, de réactions ou de réglementation. Nous allons décrire brièvement un à un ces quatre aspects de la coordination.

a) La Synchronisation :

La synchronisation dépend de la manière de gérer les ressources du système (ex. : la coordination des mouvements des jambes pour une marche sans chute). La description de

la synchronisation est rendue possible, grâce à la description utilisant un réseau de Petri par exemple.

b) Planification :

Selon la proposition de définition de Durfee, la planification [Durfee, 1996] décrit la manière dont un agent va adopter un plan d'actions. Il doit aussi prendre en compte les actions des autres agents ; ceci en priorisant les actions essentielles par rapports aux actions inutiles. En même temps, les autres agents peuvent suivre son plan s'ils le jugent pertinent. La planification doit permettre aussi à chacun des agents de construire son propre plan d'action, de déterminer explicitement les actions prioritaires vis-à-vis des actions des autres agents.

c) Coordination réactive

Selon Ferber [Ferber, 1999], ce mécanisme est plutôt adapté à des agents réactifs. Dans ce cas, il n'y a pas une planification formelle au niveau de chacun des agents. Le comportement global sera défini par chacun grâce à une capacité de réflexion et de réaction au niveau des agents. En d'autres termes, les agents n'ont pas à établir un plan pour leurs actions ni communiquer préalablement leurs intentions pour les autres.

d) Coordination par réglementation

La coordination par réglementation est l'une des solutions idéales lorsque qu'on veut résoudre d'une manière efficace des conflits entre des agents. En termes d'interaction, ceci consiste à identifier d'abord les situations de conflits. En parallèle, on doit proposer pour chacune de ces situations une règle qui détermine l'action prioritaire par un agent spécifique afin d'éviter dans la mesure du possible le conflit entre des agents. Pour cela, chacun des agents doit respecter les règles en vigueur. Du fait de ces conditions, ces règles sont dénommées des lois sociales [Chaib-draa, 1996].

La négociation, un mécanisme particulier de coordination, a fait l'objet de nombreux travaux de recherche.

La négociation

Dans un système multi-agent, les agents tentent de satisfaire ses buts. Dans le cas où les agents ont des objectifs incompatibles, certains d'entre eux peuvent empêcher les autres d'atteindre leurs objectifs. On dit qu'il y a une situation de conflit. Pour faire face à ce genre de problème, la négociation est un mécanisme permettant de résoudre des conflits entre les agents.

D'une manière générale, la négociation est nécessaire dans le cas où un groupe d'entités doit prendre une décision d'une manière consensuelle. Par exemple, dans une société ou une association, on commence la négociation avec des gens qui ont des revendications contradictoires. Si la négociation se termine avec succès, les agents impliqués ont réussi à

établir un accord qui satisfait totalement ou partiellement le but de l'un entre eux. Pour mener à bien la négociation, le processus doit prendre en considération plusieurs aspects [Mathieu & Taquet, 2000] :

Le langage de négociation : d'une manière formelle, les agents ne peuvent pas négocier sans échange de messages par communication direct ou indirect entre les agents. Ainsi, avec un langage de communication bien défini, un agent est capable d'exprimer son point de vue vis-à-vis d'une proposition ou d'un accord (accepter ou refuser). Il peut aussi accepter ou refuser la participation à une négociation spécifique portant sur une situation de conflit donnée.

Le protocole de négociation [Aknine et al., 2004] : un protocole est constitué d'un ensemble de règles permettant de gérer au mieux le processus de négociation. Étant donné que les protocoles de négociation représentent un sous-ensemble de protocoles d'interaction, ces derniers spécifient pour chaque instant un sous-ensemble de réponses ou d'interactions valide. Enfin, le protocole de négociation détermine avec certitude le point de terminaison du processus de négociation s'il se termine avec succès ou en échec.

L'objet de négociation : dans un processus de négociation, l'objet de la discussion doit être clarifié auparavant. Par ailleurs, on peut décrire l'objet de la négociation par un seul ou plusieurs éléments caractéristiques par exemple, le prix, etc.

Le processus de décision : pour atteindre ses objectifs, chacun des agents participant à la négociation doit suivre implicitement une stratégie. Ceci permet un agent de prendre une décision appropriée à chaque situation donnée. Pour cela, l'agent doit avoir aussi la capacité élevée en matière de raisonnement surtout vis-à-vis des autres agents. Il doit être aussi capable d'identifier les stratégies suivies par les autres agents.

Ces techniques de négociation peuvent être utilisées dans un domaine impliquant des agents intelligents. En termes d'évaluation, plusieurs critères ont été proposés pour l'évaluation des protocoles de négociation comme :

La rationalité individuelle [Tirole, 2013] : un protocole est rationnel dans le cas où la participation d'un agent au processus de négociation lui permet d'atteindre des buts. En d'autres termes, cet agent n'a rien à perdre en participant à la négociation. Ainsi, chacun des agents cherche, par le biais de la participation à la négociation à augmenter son gain. S'il n'a pas la possibilité d'atteindre ce but à travers la négociation, il n'a aucune raison d'y participer.

Le bien-être social [Nongaillard et al., 2008] : Dans certains cas, le protocole de négociation est choisi dans le but de satisfaire les objectifs globaux de tous les participants. Cette notion de bien-être

social est la meilleure solution pour un groupe d'agent. De ce fait, nous pouvons en déduire la comparaison de ces protocoles par rapport au bien-être global.

L'équilibre : dans des situations de conflit ou de compétition, chacun des agents doit explorer toutes les stratégies possibles des autres agents afin de pouvoir augmenter ses gains. Mais il est difficile de deviner les stratégies de l'autre agent ; surtout en absence d'une communication directe. La notion d'équilibre de Nash [Nash, 1950] a été introduite afin d'apporter une solution à ce genre de problème. Nous détaillerons l'équilibre de Nash dans le chapitre 3 portant sur la théorie des jeux.

Concernant la négociation, plusieurs techniques peuvent être appliquées dans le domaine des systèmes multi-agents [Beer et al., 1999]. Dans la suite, nous allons présenter essentiellement deux techniques : les enchères et le protocole de redistribution des tâches.

Techniques d'enchères

L'enchère est un mécanisme de négociation dans lequel un agent veut mettre en concurrence plusieurs autres agents afin d'acheter ou de vendre un objet. On distingue dans le domaine des systèmes multi-agents, quatre types principaux d'enchères [Benazi, 2018; Mueller, 1996] :

- **Enchère anglaise (premier-prix offre-publique)** : ici, les propositions de prix sont publiques. Ainsi, chaque agent connaît les propositions précédentes. En conséquence, le déroulement du protocole est comme suit : l'initiateur commence l'enchère en annonçant le prix initiale. Ensuite, chaque agent va annoncer successivement et publiquement un prix plus élevé que le dernier prix offert. Enfin, l'agent vainqueur est l'agent qui propose le « bon » prix sans qu'un autre agent propose un prix supérieur. Il va acquérir l'objet en offrant le prix proposé.
- **Enchère première offre-cachée** : dans ce cas, l'initiateur commence par l'annonce de l'objet et son prix de départ. Ensuite, les agents participants envoient d'une manière confidentielle leur proposition. Par conséquent, un agent n'a pas la possibilité de connaître les propositions des autres agents. Lorsque le délai est dépassé, l'initiateur commence l'évaluation de différentes propositions, puis il annonce le nom de l'agent vainqueur et sa proposition. L'agent vainqueur est l'agent qui propose le prix le plus élevé. Tout comme le cas de l'enchère anglaise, l'agent vainqueur va gagner l'objet en payant ce prix.
- **Enchère hollandaise (descendante)** : ce protocole reprend la méthode décrite dans l'enchère anglaise mais dans une valeur décroissante de proposition de prix pour l'objet en question. Ainsi, l'initiateur commence par l'annonce d'un prix élevé. Ensuite, il va diminuer le prix à chaque tour tant qu'il n'y a pas de propositions.

Si un agent est sûr de la valeur dernièrement proposée, alors il annonce qu'il achète l'objet. Ainsi, l'initiateur déclare cet agent vainqueur avec le prix correspondant.

- **Enchère Vickrey (deuxième-prix offre-cachée)** : ceci est similaire au protocole de premier-prix offre cachée, sauf que le gagnant (celui qui a proposé le prix le plus élevé) ne va pas payer le prix qu'il a proposé mais le prix proposé par la deuxième meilleure proposition de prix reçue par l'initiateur de l'enchère.

Après une brève description des systèmes multi-agents et de quelques mécanismes de coordination, nous allons introduire notre problématique, à savoir les modèles d'interaction entre des humains et des agents.

2.4 Modèles d'interaction humain-agent

Cette sous-section nous permet de citer quelques approches dans le cadre de la modélisation d'interaction humain-agent. Dans un premier temps, nous présentons quelques propositions d'approches combinées entre IHM et IAD-SMA en général. Ensuite, nous mettons en relief quelques applications dans le cas de la gestion du trafic qui nous intéresse en particulier dans cette thèse (cf. à ce sujet les chapitres 4, 5 et 6).

2.4.1 Approche combinée entre l'IHM et l'IAD-SMA

Au service du bien-être et de la satisfaction des utilisateurs, la recherche portant sur les modèles d'interaction humain-machine (IHM) a connu des avancées importantes ces vingt dernières années avec la création et la commercialisation de nombreux dispositifs d'interaction et technologies de l'information et de la communication [Jacko, 2012] [Soegaard & Dam, 2014]. Les systèmes interactifs sont de plus en plus utilisés dans un cadre collectif, en s'adressant à des groupes, des équipes, des organisations [Seffah & Javahery, 2004] [Gary & Judith, 2012]. En parallèle, l'utilisation de nouveaux systèmes fonctionnant comme des assistants au service des utilisateurs, que ce soit à destination du grand public, en général, ou dans les systèmes industriels en particulier, s'est répandu rapidement durant les dernières décennies. Une assistance nécessite de prendre en compte des critères d'adaptation par rapport aux utilisateurs et aux contextes d'interaction : caractéristiques de l'utilisateur, dispositifs utilisés, environnement, tâche, etc. [Edmonds, 1981; Calvary et al., 2003; Baas et al., 2014]. Les nouvelles interfaces utilisateur visent à ce que l'utilisateur puisse interagir avec facilité avec le système et réaliser sa tâche. Les besoins en termes d'efficacité et d'utilisabilité dans l'usage des supports d'interaction ne cessent d'augmenter. Parallèlement, les travaux en Intelligence Artificielle et son apparition dès la fin des an-

nées 70 dans le monde des systèmes interactifs [Edmonds, 1981; Grudin, 2009] ont permis en partie de répondre à ces besoins d'interaction intelligente. Les travaux en Intelligence Artificielle Distribuée (IAD), et particulièrement dans les systèmes multi-agents (SMA) ont permis des avancées dans la modélisation et la compréhension des interactions entre entités intelligentes, et tout particulièrement dans des nouveaux modèles de coordination, de négociation et de communication [Chaib-draa et al., 1992; Ferber, 1999; Wooldridge, 2002]. Les domaines de recherche menés sur l'interaction Homme-Robot [Buisan et al., 2020; Arora et al., 2018] devraient aussi apporter des éléments de réflexion supportant ces interactions complexes entre des entités hétérogènes, en particulier sur la prise en compte des caractéristiques propres à chaque entité.

Une fertilisation croisée entre IHM et IA [Grudin, 2009; Kolski et al., 2020] avec IAD/SMA [Millot & Mandiau, 1995] donne naissance à de nouvelles perspectives pour la résolution des problématiques liées à l'interaction humain-machine : comme on l'a expliqué dans le premier chapitre, l'interaction devient intelligente, personnalisée ou dite encore sensible au contexte, au sens de [Dey, 2001; Brézillon, 2003; Abowd et al., 1999; Xu, 2019]. La notion d'agent intelligent, capable de coopérer d'une manière intelligente avec des êtres humains grâce à une combinaison pertinente de méthodes de l'intelligence artificielle et de l'IHM, est aussi rapidement introduite [Lieberman, 1997; Lieberman & Selcker, 2000; Kolski et al., 2020]. Cette mise en œuvre nécessite un modèle d'interaction entre les êtres humains et des agents artificiels dans le cadre de [Boy & Gruber, 1990]. Pour cela, la recherche sur les modèles d'interaction constitue une pierre angulaire dans l'étude de la coopération entre humains et agents.

Plusieurs modèles d'interaction entre des humains et agents logiciels [de Albuquerque Siebra & Lino, 2009] ont fait l'objet de propositions et études de cas, dans le but d'obtenir une coopération humain-agent efficace. [Badeig et al., 2016] proposent une réflexion sur des pré-requis pour le développement de modèle d'interaction multi-agent, tout en l'adaptant à des applications réelles impliquant la coopération entre agents logiciels et des êtres humains. Nous pouvons toutefois noter qu'en pratique, de tels modèles d'interaction ont souvent été développés de manière pragmatique dans diverses applications, comme par exemple dans le domaine de la santé [Isern & Moreno, 2016], dans celui de l'apprentissage en ligne [Fasihfar & Rokhsati, 2017; Soh et al., 2008] ou encore pour le contrôle de trafic aérien [Pacaux-Lemoine & Debernard, 2002]. Sur ce point, le mécanisme d'apprentissage par renforcement a été aussi introduit dans [Crespo et al., 2000]. Des états de l'art ont ainsi vu le jour pour décrire un panorama des modèles et objectifs de ces différents travaux de recherche, notamment [Klügl & Bazzan, 2019; Sun & Yafeng, 2017; Chen & Cheng, 2010].

Depuis l'exploitation progressive de l'intelligence artificielle en interaction humain-machine à partir de la fin des années 70 [Edmonds, 1981; Grudin, 2009; Kolski et al., 2020], les recherches portant sur l'interaction humain-machine dite adaptative ou intelligente induisent désormais un sous-domaine portant sur l'interaction humain-agent. En particulier l'agent intelligent prend une place de plus en plus importante dans la conception des systèmes interactifs intelligents, de recommandation ou d'assistance, dans de plus en plus de cas d'utilisations pratiques dans lesquelles ils peuvent prendre des initiatives [Wooldridge & Jennings, 1995].

Pour la coopération avec les êtres humains dans le cadre de la réalisation des tâches complexes, plusieurs modèles ont déjà été proposés. Par exemple, Levin et ses collègues proposent un modèle stochastique pour l'interaction dans le cadre de la prise de décision au niveau de l'assistant [Levin et al., 2000]. Un modèle d'interaction utilisant une autre forme d'agent assistant est proposé par Barange et ses collègues al. [Barange et al., 2017], avec l'objectif de disposer d'agents intelligents pouvant enseigner à des opérateurs humains travaillant en groupe. Dans un cadre d'assistance, Azaria et ses collègues proposent un agent qualifié de social pouvant donner des conseils à un être humain dans le cas où la prise de décision semble compliquée [Azaria et al., 2015].

La modélisation de l'interaction entre humains et agents assistants a fait l'objet de plusieurs propositions et étude de cas. Ainsi, un modèle d'interaction basé sur les réseaux de Petri a été proposé par [Dondrup et al., 2019] a fait l'objet d'une étude de faisabilité portant sur l'interaction dialogique entre un humain et un robot. Ceci permet d'améliorer l'enchaînement au niveau de la prise de décision par le robot et par les êtres humains. Un modèle stochastique a été proposé par [Levin et al., 2000] pour l'interaction humain-agent en se basant sur le processus décisionnel de Markov (MDP). Ce modèle a été testé pour l'apprentissage de stratégies dans une tâche de contrôle dans un système de gestion des transports aériens. Enfin, dans [Nakano et al., 2007], les auteurs utilisent une technique fondée sur un réseau bayésien pour l'étude des interactions entre plusieurs humains et plusieurs agents.

En utilisant une méthode d'optimisation basée sur le principe des colonies des fourmis, Holzinger et ses collègues ont proposé un modèle d'interaction utilisant les techniques des machines Learning interactive (iML) [Holzinger et al., 2019; Kaiser et al., 1997]. Ces auteurs ont démontré en implémentant ce modèle dans un jeu appelé « Travelling snackesman » que l'intelligence des êtres humains peut améliorer celle des agents en coopération avec eux. En se basant sur une étude de cas portant sur l'interaction humain-robot, [Glas & Pelachaud, 2015] a proposé un modèle d'interaction, comportant une capacité d'apprentissage, se basant sur le modèle markovien MDP. Par ailleurs, d'autres auteurs ont

utilisé le principe de crowdsourcing [Charles et al., 2018] en matière de modélisation d'interaction humain agents ; la technique utilisée consiste à faire participer une communauté pour la réalisation collaborative d'un service. En outre, [Barange et al., 2017] ont quant à eux proposé des agents qualifiés de pédagogiques, afin de permettre à l'utilisateur de bénéficier d'une sorte d'enseignement et d'apprentissage grâce à une nouvelle architecture d'agent « pédagogique ». En termes d'architecture, les auteurs ont proposé une extension de l'agent BDI [Rao & Georgeff, 1991] et [Rao & Georgeff, 1995] pour la création d'une architecture appelé PCC BDI pour concevoir l'agent pédagogique collaboratif et conversationnel [Mimoun et al., 2017].

Enfin, un modèle basé sur la théorie des jeux a été proposé récemment par [Liang & Yan, 2019] dans le cadre de l'interaction entre plusieurs humains et assistants. Même si elle utilise la théorie des jeux, cette approche ne correspond pas à un modèle d'interaction pour système interactif sensible au contexte impliquant directement les êtres humains et les agents logiciels.

2.4.2 Réalisation d'une tâche complexe

Dans le cadre de la réalisation d'une tâche complexe ou parfois dangereuse, la collaboration et la coopération entre agent artificiel ou agent logiciel et des opérateurs humains demeure une solution privilégiée [Millot et al., 1989]. Par exemple, dans le cas de la supervision d'un procédé industriel, Le Strugeon et al. [Le Strugeon et al., 1996] proposent un modèle d'agent intelligent pour aider un opérateur humain d'une manière collaborative en vue de l'optimisation du contrôle du procédé industriel. En outre, Badeig et al. [Badeig et al., 2016] décrivent la construction et la conception d'un système collaboratif utilisant le modèle multi-agent. Pour améliorer l'efficacité de l'assistance, Mandiau et al. [Mandiau et al., 1991] proposent une approche d'assistance basée sur des concepts agent de croyance et d'intention. [Holzinger et al., 2019] propose un modèle d'interaction humain-agent avec l'objectif d'améliorer une intelligence artificielle avec l'appui d'une expertise métier humaine. Pour cela, ils ont utilisé la technique de machine Learning interactive iML basée sur un principe d'optimisation de colonies de fourmis (avec influence possible des agents par l'humain). Enfin, une étude récente propose une définition formelle de la notion d'explicitabilité dans le cadre de l'interaction humain-agent en exploitant des techniques de machine Learning. Cette approche prend en compte des informations du contexte, en particulier le niveau de charge de travail de l'utilisateur et sa performance [Rosenfeld & Richardson, 2019].

2.4.3 Exploitation d'agents dans notre domaine applicatif : le contrôle de trafic routier

Nous abordons un état de l'art sur les approches de coordination multi-agents pour la gestion de trafic routier, avec une focalisation toute particulière sur les modèles en théorie de jeux.

2.4.3.1 Approche de coordination multi-agents pour la gestion du trafic routier

Plusieurs travaux portent sur l'étude et la simulation du trafic routier en termes de modélisation à base d'agents [Naiem et al., 2010]. Par exemple, [Doniec et al., 2008b] exploite l'avantage de l'utilisation des comportements anticipatifs des agents dans la coordination multi-agent pour la simulation de trafic en carrefour. Dans [Guériau et al., 2016], un modèle de contrôle par apprentissage constructiviste est proposé pour faciliter la régulation du trafic. En vue de l'optimisation du flux du trafic, Ksontini et al. 2012 [Ksontini et al., 2012] proposent un modèle basé sur une représentation ego-centrée de l'environnement du trafic qui exploite l'hétérogénéité des véhicules et les comportements des différents conducteurs. De plus, [Correa, 2016] exploite des agents intelligents dans le cadre de l'étude des comportements des acteurs du trafic en se basant sur la psychologie de la conduite. Dans [Benhamza et al., 2010], les auteurs proposent un modèle d'agent réactif pour le trafic en vue d'une simulation microscopique développée en java. Sur l'organisation pour le contrôle des feux de trafic, [Kumar & Mitra, 2006] propose une auto-organisation du contrôle en cas de défaillance au niveau des signalisations d'une intersection. Une approche à base d'agent a été aussi proposée pour la gestion intelligente du trafic en s'appuyant sur la technologie de l'internet des objets [Al-Sakran, 2015].

Toujours dans le domaine de la gestion de trafic routier, un modèle générique d'un système de gestion des transports, intégrant ces deux composantes, est proposé par [Ezzedine et al., 2008]. Ce modèle générique est utilisé pour élaborer un système de régulation du trafic dans le cas d'un système de transport bimodal (tram-bus). Le système permet l'aide à la régulation du trafic, basé sur le modèle de décision d'un opérateur, et le système d'information des voyageurs. Par ailleurs, Balbo et Mandiau ont décrit la notion de transport intelligent qui peut satisfaire les usagers du service de transport [Balbo & Mandiau, 2016]. Afin d'améliorer le contrôle du trafic, [Burguillo-Rial et al., 2009] propose un modèle de contrôle basé sur l'historique du trafic. Avec le même objectif, une modélisation à base d'agent est aussi proposée par [Hirankitti & Krohkaew, 2007], avec utilisation de moteurs d'inférence prenant en entrée des valeurs liées à des situations temporelles du trafic. Enfin,

[Almejalli et al., 2009] proposent une division du réseau global du trafic en un ensemble de sous-réseaux afin de faciliter la tâche de contrôle en mettant en œuvre un système multi-agent. Nous avons dressé un bref état de l’art (sans volonté d’exhaustivité) sur les modèles multi-agents du trafic routier. Mais, en conclusion, l’implication des opérateurs humains dans ces approches à base d’agent ou multi-agent, n’a pas encore fait l’objet de formalisation explicite dans la littérature.

2.4.3.2 Positionnement de la théorie des jeux pour le trafic routier

Quelques travaux portent sur l’application de la théorie des jeux pour l’organisation du trafic routier. C’est le cas dans le simulateur ARCHISIM [Mandiau et al., 2008] : la théorie des jeux a été proposée pour la résolution de conflit entre véhicules aux intersections. Un modèle de jeu à deux joueurs a été proposé dans [Trinh et al., 2018] dans le cas de la résolution de conflit entre deux conducteurs de moto. Mais ces approches basées sur les jeux considèrent uniquement des participants de types véhicules ou conducteurs des véhicules. A notre connaissance, aucune approche basée sur la théorie des jeux n’implique explicitement un ou plusieurs opérateurs humains et agents assistants interagissant dans une tâche de contrôle du trafic. Des approches basées sur la théorie des jeux sont proposées dans diverses applications, telles l’Internet des Objets (IoT) et la technologie bitcoin dans le cas de partage de ressources et de tâches (cf. par exemple [Liang & Yan, 2019]), mais l’interaction avec l’être humain n’est pas traitée explicitement. Entre autres, une modélisation fondée sur les jeux stochastiques a été proposée dans le cadre de l’interaction humain-machine sous forme d’un dialogue afin d’obtenir une meilleure réponse [Merwan et al., 2015]).

Relativement aux méthodes décrites, on constate qu’aucune approche, qu’elle soit centralisée ou distribuée n’explique l’implication directe des contextes utilisateur relatifs aux interactions. Les méthodes proposées ne prennent pas en compte d’une manière directe les caractéristiques prises en compte concernant les êtres humains ni le contexte d’usage liée à l’environnement dans lequel évolue un système interactif.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu plusieurs aspects de l’interaction humain-agent dans le cadre d’une coopération. Pour cela, on a introduit la notion d’agent intelligent avec les éléments caractéristiques connus. En plus, ces agents intelligents peuvent construire un système multi-agent qui possède, à son tour ses propriétés caractéristiques. Pour accomplir d’une manière efficace la tâche collaborative au sein d’un système multi-agent, un modèle

de coordination est nécessaire afin de pouvoir gérer les aspects interactions des agents. Cette notion est très importante dans l'étude d'un système multi-agent. En particulier, plusieurs types de modèles d'interaction humain-agent ont été aussi présentés dans ce chapitre sans oublier les études de cas portant sur la simulation ou l'étude de cas réels du trafic routier. En vue de pouvoir introduire notre proposition, nous avons introduit quelques propositions utilisant la théorie des jeux. Mais on a constaté qu'aucune de ces approches n'explique directement la participation des êtres humains et des agents logiciels dans le cadre des modèles proposés. Le chapitre suivant nous permettra de connaître davantage les aspects de la théorie des jeux.

Chapitre 3

La théorie des jeux

3.1 Introduction

Depuis l'antiquité, les êtres humains utilisent le jeu, dans le cadre de leurs loisirs, ou en tant que passe-temps. Certains jeux permettent de développer des capacités intellectuelles, lorsqu'ils font office d'exercice mental, c'est le cas par exemple du jeu d'échecs. On peut citer aussi différents jeux de cartes, le jeu de pile ou face, qui peuvent pousser de différentes manières à la réflexion. D'autres jeux se présentent comme une compétition physique entre humains avec la possibilité d'obtenir une récompense pour le vainqueur. Dans une telle compétition, le vaincu n'a théoriquement rien à perdre. Il peut s'entraîner de nouveau pour la préparation d'une autre compétition. Mais au-delà des acteurs directs du jeu, certaines personnes peuvent tenter de bénéficier du succès d'un joueur en formant une équipe de personnes qui vont soutenir un seul participant. Dans le cas où le participant en question gagne le jeu, l'ensemble de son équipe peut en profiter, en particulier financièrement ; dans le cas contraire, l'échec peut leur coûter une fortune. Désormais, le jeu ne se résume plus à une simple distraction. Tout le monde peut organiser un jeu à but lucratif, et chacun des participants peut chercher à obtenir le maximum de chance de gagner, y compris l'organisateur.

Dans ce chapitre, nous allons introduire les concepts de base de la théorie des jeux. Dans le but de bien comprendre la notion, quelques exemples de jeux célèbres seront mis en avant, avant de terminer par des applications de la théorie des jeux.

3.2 Définitions et concepts

La théorie des jeux au sens de [Neumann & Morgenstern, 1944] est un modèle utilisé initialement en économie pour étudier le comportement d'entités économiques (prix,

concurrence, justification des décisions économiques, etc.). Cette théorie permet à chaque entité de prendre l'initiative pour chercher des gains dans les marchés où plusieurs agents économiques interagissent en prenant en compte les décisions des autres agents. Actuellement, l'exploitation de cette théorie est étendue vers plusieurs domaines impliquant des problèmes de prise de décision stratégique dans des situations ou états possibles d'un système multi-participant : par exemple, cette théorie est déjà utilisée en biologie, dans le domaine militaire, celui de l'environnement ou encore dans le domaine de l'informatique, en particulier l'Intelligence artificielle distribuée ou dans beaucoup d'autres systèmes d'assistance ou de coopération impliquant des humains et des agents artificiels.

Pour pouvoir définir un jeu [Osborne, 2003], on doit savoir au minimum les éléments essentiels qui le caractérisent :

- les participants (appelés joueurs),
- Chaque joueur possède aussi un ensemble d'actions possibles (appelé stratégies) suivant certaines exigences (appelées règles du jeu),
- Le résultat ou le gain de chaque joueur à l'issue du jeu,
- Utilité : valeur numérique représentant le gain ou la perte de chacun des joueurs en fonction de ses choix stratégiques.

3.2.1 Forme d'un jeu

Un jeu peut se présenter sous deux formes : la forme normale et la forme extensive.

3.2.1.1 Jeu sous la forme normale

Un jeu en forme normale est donné par :

- Un ensemble I de n joueurs, indexés par $i = 1, 2, \dots, n$,
- Un ensemble de stratégies S_i pour chaque joueur i qui peut choisir une stratégie (pure) s_i ,
- Le vecteur $s = (s_1, \dots, s_n)$ est le résultat (ou profil de stratégies) avec S l'ensemble des profils de stratégies,
- Une fonction de gain pour chaque joueur i ; $u_i : S \rightarrow \mathbb{R}$.

Notation : $s = (s_i, s_{-i})$ où s désigne le profil stratégique dans lequel s_i correspond à l'action du joueur i et s_{-i} les actions des autres joueurs (autre que i).

Représentation du jeu : Dans le cas d'un jeu à deux joueurs, il est plus facile de représenter un jeu sous forme d'une matrice. Les actions possibles pour le premier joueur sont placées dans la première colonne et celles du deuxième dans la première ligne. Ainsi,

le gain de chacun des joueurs qui correspond au numéro de ligne et de colonne est présenté dans chaque cellule.

Exemple : Deux joueurs A et B tel que A ont chacun trois actions possibles : A_1, A_2, A_3 pour A et B_1, B_2, B_3 pour B .

TABLEAU 3.1 – Matrice de jeu : Exemple

Joueur A \ Joueur B	B1	B2	B3
A1	(A_{11}, B_{11})	(A_{12}, B_{12})	(A_{13}, B_{13})
A2	(A_{21}, B_{21})	(A_{22}, B_{22})	(A_{23}, B_{23})
A3	(A_{31}, B_{31})	(A_{32}, B_{32})	(A_{33}, B_{33})

Par exemple, dans le tableau 3.1 : A_{11} désigne le gain du joueur A lorsqu'il choisit A_1 et le joueur B choisit B_1 . Dans ce cas, B_{11} désigne le gain du joueur B .

3.2.1.2 Jeu sous la forme extensive

Définition : Un jeu sous forme extensive est défini par :

- un ensemble N de joueurs,
- un arbre composé d' :
 - un ensemble de nœuds représentant les coups,
 - un ensemble de branches représentant les alternatives à chaque coup,
 - une fonction de nommage qui indique à chaque nœud quel est le joueur qui doit jouer,
 - une fonction d'évaluation qui associe à chaque nœud terminal un vecteur de nombres représentant les gains de chacun des joueurs,
 - une partition des nœuds en un ensemble d'ensembles d'informations représentant les croyances (imparfaites) des joueurs.

Dans le cas d'un jeu sous forme extensive à 2 joueurs, les histoires terminales désignent toutes les successions des actions choisies par tous les joueurs. Les nœuds terminaux de l'arbre représentent des *issues* possibles du jeu, et il est possible d'associer à chacune d'entre elles une *histoire terminale* du jeu. Dans de la figure 3.1, il y 4 histoires terminales :

- $(u_1(A,a), u_2(A,a))$ correspond à l'histoire terminale (A,a) ,
- $(u_1(A,b), u_2(A,b))$ correspond à l'histoire terminale (A,b) ,
- $(u_1(B,a), u_2(B,a))$ correspond à l'histoire terminale (B,a) ,

- $(u_1(B,b), u_2(B,b))$ correspond à l'histoire terminale (B,b) .

Définition Un jeu sous forme extensive en information parfaite consiste en :

- un ensemble de joueurs,
- un ensemble de séquences (histoires terminales) tel qu'aucune séquence n'est sous-séquence d'une autre séquence,
- une fonction (la fonction joueur) qui assigne un joueur à chaque sous-séquence d'une histoire terminale,
- pour chaque joueur, des préférences sur l'ensemble des histoires terminales.

La figure 3.1 représente un arbre pour un jeu à deux joueurs 1 et 2.

Exemple d'un arbre de jeu :

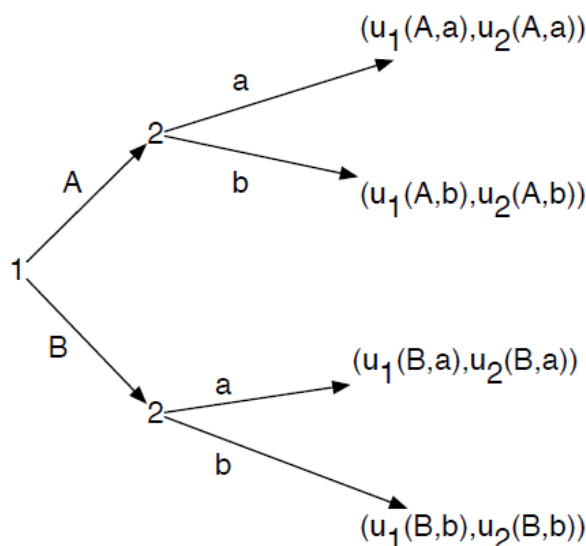


FIGURE 3.1 – Arbre du jeu à deux joueurs

Dans cette figure 3.1, le joueur 1 a deux actions possibles : A et B . Pour le joueur 2, les actions possibles sont a et b . Les fonctions d'utilités pour les deux joueurs sont notées u_1 et u_2 .

Dans cette thèse, nous considérons la notion de coordination sans communication, ce qui montre l'importance de rappeler les deux types de jeu extensif. La notion d'information est importante en termes de communication ou non (voir détails sur la coordination).

En général, la communication est possible grâce à l'utilisation d'information (transmission, réception). La communication, qu'elle soit directe ou indirecte, ne se réalise toujours pas avec une transmission ou réception parfaite d'informations entre les joueurs. C'est pourquoi dans le cadre de cette description de jeu extensif, nous avons besoin de connaître aussi le cas du jeu extensif avec information imparfaite.

Définition : Un jeu sous forme extensive, en information imparfaite (avec hasard), est défini par :

- un ensemble de joueurs,
- un ensemble de séquences (histoires terminales) tel qu'aucune séquence n'est sous-séquence d'une autre séquence,
- une fonction (la fonction joueur) qui assigne un joueur ou la "nature" (qui désigne le caractère lié au hasard du processus) à chaque sous-séquence d'une histoire terminale,
- une fonction qui assigne pour chaque sous-séquence à laquelle le joueur "nature" est associé (par la fonction joueur) une distribution de probabilités sur les actions disponibles après cette histoire (les différentes distributions étant indépendantes les unes des autres),
- Pour chaque joueur, une partition (la partition de l'information) de l'ensemble des histoires qui lui sont assignées par la fonction joueur,
- Pour chaque joueur, des préférences sur les loteries d'histoires terminales.

Propriété : Tout jeu (fini) sous forme extensive à information parfaite a un équilibre de Nash en stratégies pures (équilibre qu'on peut obtenir par récurrence à rebours) [Osborne, 2003]. A chaque jeu sous forme extensive correspond un jeu sous forme stratégique dans lequel les joueurs choisissent simultanément les stratégies qu'ils mettront en œuvre. En revanche, un jeu sous forme stratégique peut correspondre à plusieurs jeux sous forme extensive différents.

3.2.2 Définitions

La stratégie s_i du joueur i est strictement dominée par la stratégie s_0 si et seulement si, quel que soit le comportement des autres joueurs, le joueur i obtient avec s_i une utilité strictement inférieure à celle obtenue avec s_0 .

La stratégie s_i est faiblement dominée par s_0 si l'inégalité est faible pour toutes les stratégies des autres joueurs et qu'il existe au moins un profil de stratégies des autres joueurs pour lequel l'utilité avec s_i est strictement inférieure à celle avec s_0 .

Un profil de stratégies s_0 est un équilibre en stratégies dominantes strict si :

$$\forall i \in N, \forall s'_i \in S_i, u_i(s_i, s_{-i}) > u_i(s'_i, s_{-i})$$

Un profil de stratégies s_0 est un équilibre en stratégies (faiblement) dominantes si :

$$\forall i \in N, \forall s'_i \in S_i, u_i(s_i, s_{-i}) \geq u_i(s'_i, s_{-i})$$

La recherche de ces deux équilibres est rendu possible grâce à l'élimination progressive des stratégies dominées.

3.2.2.1 Définition

Une stratégie mixte du joueur i est une mesure de probabilités p_i définie sur l'ensemble des stratégies pures du joueur i . On note P_i l'ensemble des stratégies mixtes du joueur i . p_i est la probabilité que le joueur i joue la stratégie pure s_i . Alors p_i correspond à une stratégie mixte du joueur i .

Théorème de Nash Tout jeu sous forme normale fini possède au moins un équilibre de Nash en stratégies mixtes.

3.2.2.2 Élimination progressive de stratégie

Un jeu est dit résolvable par élimination itérative des stratégies dominées, si on obtient un unique profil en éliminant successivement des stratégies (strictement) dominées. Les profils obtenus après élimination itérative des stratégies (strictement) dominées (EISD) ne dépendent pas de l'ordre choisi pour l'élimination des stratégies. Par contre, on peut obtenir des profils différents lorsque l'on choisit des ordres différents pour l'élimination itérative de stratégies faiblement dominées (EISfD).

Les résultats obtenus par EISD sont plus robustes que ceux obtenus par EISfD car on obtient des stratégies dominées dans des conditions moins strictes que dans le premier cas.

3.2.3 Exemples de jeu

3.2.3.1 La bataille des sexes

Deux personnes doivent aller au spectacle le soir et acheter leur billet à l'avance, chacun séparément ; ils n'ont pas la possibilité de communiquer et n'ont pas la même préférence : la femme préfère l'Opéra ; tandis que l'autre personne aime le football. Mais ils verront leur soirée gâchée s'ils ne se rendent pas ensemble au spectacle. Le tableau 3.2 présente le jeu sous forme matricielle, dans laquelle les actions possibles pour le joueur 1 se trouvent dans la première colonne tandis que celles du joueur 2 sont dans la première ligne. Dans ce jeu, les deux joueurs ont le même ensemble d'actions possibles (chacun peut choisir entre Opéra et Foot).

TABLEAU 3.2 – Matrice de jeu : bataille des sexes

	Mari		
Femme			
Opéra		(3,1)	(0,0)
Foot		(0,0)	(1,3)

Peut-on dire ce que doivent faire l'un ou l'autre ? Peut-on prédire ce que comptent faire ces deux personnes ? S'ils sont rationnels, chacun a intérêt à choisir sa préférence, car il vaut mieux gagner 3 points que 0, ou gagner 1 point plutôt que 0. Mais dans ce cas, ils vont perdre à coup sûr. Il vaudrait mieux jouer (Opéra, Opéra) ou (Foot, Foot). Mais cela ne donnera des gains supérieurs à 0 pour chacun des joueurs que s'ils jouent le même jeu c'est-à-dire s'ils ont choisi la même action.

3.2.3.2 Le dilemme du prisonnier

Ce jeu est tiré du scénario suivant, se passant dans un centre de détention provisoire : “Deux criminels présumés sont interrogés séparément par la police ; s'ils nient tous les deux ils seront condamnés à une faible peine (3 ans) et s'ils avouent tous les deux ils seront condamnés à une peine plus forte (6 ans) ; si l'un des deux avoue tandis que l'autre nie, le premier n'aura qu'une peine de principe (1 an) alors que le second aura la peine maximale (10 ans)”. La matrice visible dans le Tableau 3.3 représente donc des pertes (gains négatifs) en fonction des réponses. Dans ce tableau du jeu, chacun des prisonniers a le choix entre “*avouer*” et “*nier*”. En fonction de son choix et du choix de l'autre, chacun obtiendra le gain correspondant.

TABLEAU 3.3 – Matrice de jeu : dilemme du prisonnier

	Bob		
Alice			
Avouer		(-6,-6)	(-1,-10)
Nier		(-10,-1)	(-3,-3)

Que vont-ils faire, que doivent-ils faire, ces deux prisonniers ? Quelle que soit l'action de l'autre, chacun a intérêt à avouer, car les gains seront toujours meilleurs (peines moindres) que nier.

3.3 Typologie d'un jeu

En général, il y a plusieurs types de jeux suivant les aspects régissant le déroulement et les règles du jeu. On distingue le jeu coopératif du jeu non coopératif :

- Un jeu est dit **coopératif** si les joueurs ont la possibilité de communiquer entre eux d'une manière libre sur les informations permettant de décider, et passer des accords ou des contrats entre eux dans le but d'obtenir un meilleur gain.
- Le jeu est dit **non coopératif** dans le cas contraire.
- Suivant la fonction de gain : le jeu à *somme nulle* et *non nulle* : un jeu est à somme nulle si la somme des gains des joueurs est constante ; il est dit non nulle si cette somme est variable.
- Suivant l'information accessible par les joueurs : Un jeu est dit à *information complète* si chaque participant connaît l'ensemble des actions possible et les fonctions d'utilités des autres joueurs. Par contre, il est à *information incomplète* si les joueurs ne connaissent pas toutes les informations du jeu. Un jeu est à *information parfaite* si chacun des joueurs connaît en détail les actions des autres joueurs avant qu'il ne prenne sa décision.
- Suivant le déroulement du jeu :
 - Un jeu est dit *statique* s'il n'y a qu'un seul tour. Dans ce cas, tous les joueurs doivent choisir une action simultanément et on s'arrête.
 - Il est dit *dynamique* dans le cas où le jeu se joue avec le temps. Dans ce cas, les joueurs auront le temps d'examiner les décisions antérieures avant de pouvoir adopter leurs comportements, actuel et à venir.
 - Un jeu est *répété* si on peut jouer plusieurs fois un même jeu à information complète.

3.4 Équilibre de Nash

Pour que des agents prennent leur propre décision, nous prenons l'hypothèse simplificatrice de rechercher un équilibre. Il en existe plusieurs, et nous prenons celui de Nash, l'un des plus connus [Nash, 1950].

3.4.1 Définitions

Soit le jeu défini par la donnée de N joueurs $1, 2, \dots, N$ ayant chacun un ensemble de stratégie S_i .

Meilleure Réponse - Une stratégie s_i d'un joueur i est la **meilleure réponse** à une stratégie jointe s_{-i} de ses adversaires si et seulement si : $\forall s'_i \in S_i, u_i(s_i, s_{-i}) \geq u_i(s'_i, s_{-i})$

Équilibre de Nash - Une stratégie jointe $s \in S_1 \times \dots \times S_n$ est un équilibre de Nash si chaque s_i est une meilleure réponse à s_{-i} , c-a-d. $\forall i \in N, \forall s'_i \in S_i, u_i(s_i, s_{-i}) \geq u_i(s'_i, s_{-i})$

Équilibre de ε -Nash - Une stratégie jointe $s \in S_1 \times \dots \times S_n$ est un **équilibre de ε -Nash** si chaque s_i est une meilleure réponse à s_{-i} , c-a-d. $\forall i \in N, \forall s'_i \in S_i, u_i(s_i, s_{-i}) \geq u_i(s'_i, s_{-i}) - \varepsilon$

Remarque : La meilleure réponse est les stratégies ou l'ensemble de stratégies qui produisent pour un joueur donné, le résultat le plus favorable, sachant les stratégies des autres joueurs. Alors que l'équilibre de Nash désigne le profil stratégique dans lequel aucun joueur n'a intérêt à changer unilatéralement son stratégie. Dans ce cas, aucun joueur ne regrette son choix (il n'aurait pas pu faire mieux) au vu du choix des autres. Les propriétés suivantes sont valables pour l'équilibre de Nash en stratégie pure :

3.4.2 Propriétés

- Un profil (unique) obtenu par élimination itérative de stratégies (strictement) dominées (EISD) est un équilibre de Nash (et c'est le seul équilibre du jeu).

- Un jeu (en stratégies pures) peut avoir plusieurs équilibres de Nash, mais il peut aussi n'en avoir aucun.

- Deux équilibres de Nash $s=(s_i, s_{-i})$ et $s^*=(s_i^*, s_{-i}^*)$ sont interchangeable si pour tout i , (s_i, s_{-i}^*) et (s_i^*, s_{-i}) sont aussi des équilibres de Nash.

- Deux équilibres de Nash sont équivalents s'ils donnent la même utilité à tous les joueurs.

Théorème de Glicksberg-Nash [Glicksberg, 1952] : Tout jeu sous forme normale a au moins un équilibre de Nash en stratégies pures s'il vérifie les conditions suivantes :

- L'ensemble des stratégies est un sous espace Euclidien non vide, compact et convexe.
- Les fonctions d'utilité $u_i : S \rightarrow \mathbb{R}$ sont continues.
- Les fonctions d'utilité $u_i : S \rightarrow \mathbb{R}$ sont quasi-concaves.

3.4.3 Equilibre de Nash en stratégie mixte

Une stratégie mixte du joueur i est une mesure de probabilités p_i définie sur l'ensemble des stratégies pures du joueur i . On note P_i l'ensemble des stratégies mixtes du joueur i . p_i est la probabilité que le joueur i joue la stratégie pure s_i . Alors p_i correspond donc à une stratégie mixte du joueur i .

Un profil $p = (p_1^*, \dots, p_n^*)$ avec p_i^* est un élément de P_i pour tout $i = 1..n$ est un équilibre de Nash en stratégies mixtes si :

$$\forall i \in N, \forall p'_i \in P_i, u_i(p_i^*, p_{-i}^*) \geq u_i(p_i, p_{-i}^*)$$

En stratégie mixte, l'objectif est de déterminer les stratégies du joueur i qui correspondent à la plus grande satisfaction pour lui face à tout profil stratégique s_i . Pour cela, la fonction de meilleure réponse du joueur i correspond à $BR_i(p_{-i})$ qui associe, à chaque combinaison de stratégies mixtes des autres joueurs p_{-i} la (les) stratégie(s) du joueur i qui maximise(nt) son gain :

$$u_i(BR_i(p_{-i}), p_{-i}) \geq u_i(p_i, p_{-i}), \forall p_i \in P_i, p_{-i} \in P_{-i}$$

3.5 Optimum de Pareto

L'optimum de Pareto désigne un couple de profils stratégiques, tel qu'il est impossible d'améliorer le gain de l'un des deux joueurs sans diminuer le score de l'autre. Un profil s domine un profil s' au sens de Pareto s'il est au moins aussi bon pour tous les joueurs et si s est strictement meilleur pour au moins l'un d'entre eux. Un profil s est optimal au sens de Pareto s'il n'est Pareto-dominé par aucun autre profil. En d'autres termes il n'existe pas un profil stratégique s' tel que :

$$\begin{cases} \exists i : U_i(s') > U_i(s) \\ \forall j : U_j(s') \geq U_j(s) \end{cases} \quad (3.1)$$

Exemple : On considère le jeu représenté par le tableau 3.4 suivant :

TABLEAU 3.4 – Matrice de jeu : Exemple

	Joueur 2	
Joueur 1	R	S
E	(1,0)	(5,1)
F	(0,5)	(0,1)

Il est évident que (E, S) qui correspond au couple de gain (5,1) est un équilibre de Nash : Ici (E, S) est un Optimum de Pareto (car un des deux joueurs a augmenté son gain sans baisser celui de l'autre) parce que :

a) Si on part de (E, R) : (1,0) à (E, S) : (5,1) les gains du joueur 1 ont augmenté (de 1 à 5); les gains du joueur 2 ont augmenté aussi (de 0 à 1). Si on part de (E, R) à (E, S) : le joueur 1 a augmenté son gain sans baisser celui de 2. le joueur 2 a augmenté son gain sans baisser celui de 1. Du coup, (E, S) pareto domine (E, R).

b) De $(F, R) : (0,5)$ à $(E, S) : (5,1)$ les gains du joueur 1 ont augmenté (de 0 à 5) ; mais les gains de 2 ont diminué (de 5 à 1). Ici, de (F, R) à (E, S) : le joueur 1 a augmenté son gain mais on a baissé celui de 2. Du coup, (E, S) n'est pas pareto-comparable à (F, R) .

c) De $(F, S) : (0,1)$ à $(E, S) : (5,1)$ les gains du joueur 1 ont augmenté (de 0 à 5), et les gains de 2 sont restés identiques (de 1 à 1). Ici, de (F, S) à (E, S) : le joueur 1 a augmenté son gain sans baisser celui de 2. Par conséquent, (E, S) pareto domine (F, S) .

Pour terminer cette partie introductive sur la théorie des jeux, nous allons citer quelques applications dans plusieurs domaines de l'informatique ; ceci dans le but d'avoir un aperçu sur l'utilisation de la théorie des jeux, qui nous intéresse en particulier dans la modélisation de l'interaction humain-agent.

3.6 Domaines d'application

Au départ, la théorie des jeux a fait l'objet de plusieurs domaines d'application. En économie, elle a concerné la régulation des marchés et des flux d'importation et exportation. En finance, elle a porté sur la résolution de conflits internes et externes. Dans le domaine de l'informatique, plusieurs sous-domaines bénéficient de l'utilisation de la théorie des jeux, notamment en intelligence artificielle [Tennenholtz, 2002]. Ces auteurs ont utilisé une approche combinant la théorie des jeux, avec des principes de raisonnement symbolique dans un système distribué. En robotique [Lindsay & Givigi, 2018], la théorie des jeux a été employée dans des problèmes de planification de trajectoire de robot dans un environnement domestique.

On peut citer l'application de la théorie des jeux dans les réseaux sociaux [Dong et al., 2020] ; ces auteurs ont étudié le problème de rapprochement (appariement) des utilisateurs en utilisant des informations incomplètes sur ces derniers. De plus, les utilisateurs à appairer ne sont pas en mesure d'interagir tous les uns avec les autres (c'est-à-dire que toutes les communications possibles ne sont pas réalisables). Pour cela, ils ont proposé un nouvel algorithme en s'appuyant sur l'algorithme classique de Gale–Shapley [Gale & Shapley, 1962; Irving, 1994] et considérant les contraintes de topologie du réseau considéré. Dans le domaine du cloud computing, Xu et Yu [Xu & Yu, 2014] ont contribué à l'amélioration de la gestion des ressources à la demande sur le Cloud en proposant un algorithme d'allocation des ressources basé sur la théorie des jeux, prenant en compte l'équité entre les utilisateurs et l'utilisation des ressources.

Dans le domaine de la sécurité des réseaux informatiques, Manshaei et ses collègues [Manshaei et al., 2013] ont étudié particulièrement la sécurité des réseaux auto-organisés, des systèmes de détection d'intrusion, l'anonymat et la vie privée, l'économie de la sécurité

des réseaux et la cryptographie. Pour chaque catégorie considérée dans l'étude, les acteurs impliqués sont analysés en termes d'équilibre via des modèles de la théorie des jeux. Pour terminer, une application originale de la théorie des jeux pour l'Internet des Objets (IoT) est introduite par [Lee et al., 2018]. Pour cela, un cadre auto-adaptatif est proposé pour la prise de décision dans les environnements IoT au moment de l'exécution. Le cadre comprend des conceptions de modèles de machines à états finis et des méthodes de prise de décision utilisant la théorie des jeux pour extraire des stratégies efficaces.

3.7 Conclusion

Les notions essentielles sur la théorie des jeux ont été introduites dans ce chapitre : le jeu, les joueurs, les stratégies, les fonctions d'utilité, les gains des joueurs, ainsi que la détermination d'équilibre. On a constaté ainsi qu'il y a plusieurs types de jeux dans la littérature. Les types de jeu diffèrent entre eux par les règles de jeu, la valeur de la somme des gains des participants, etc. Nous avons présenté aussi la notion de l'équilibre de Nash en stratégie pure, choisie particulièrement dans cette thèse pour mettre en place et évaluer des interactions entre agents assistants et êtres humains. Pour la recherche de l'équilibre de Nash, la méthode de l'énumération de meilleures réponses par élimination successive des stratégies dominées a été utilisée. Grâce à la simplicité de sa mise en œuvre pour les agents assistants, nous pouvons en conclure que la théorie des jeux fait partie des outils mathématiques intéressants si on veut prendre en compte les entités impliquées dans une situation d'interaction. Par conséquent, cela nous semble une solution pour la modélisation de l'interaction humain-machine et en particulier l'interaction humain-agent dans le cadre de la réalisation coopérative d'une tâche complexe. De plus, nous avons constaté que cette théorie fait l'objet de plusieurs applications, notamment dans le domaine de l'informatique. Dans le chapitre suivant, nous allons exploiter la théorie des jeux sous forme normale.

Chapitre 4

Modèle d'interaction humain-agent basé sur la théorie des jeux

4.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter notre contribution dans le domaine des interactions entre plusieurs humains et plusieurs agents assistants, sous forme d'un modèle d'interaction défini par la théorie des jeux. L'une des motivations de ce travail porte sur la conception d'un système sensible au contexte composé de deux types d'entités actives situés dans le même environnement. Plus précisément, les participants du jeu sont des êtres humains et des agents logiciels qui doivent se coordonner pour la réalisation collaborative d'une tâche complexe. Nous proposons de décrire ce modèle de coordination entre ces entités hétérogènes (humains, logiciels) par des jeux répétés. Dans le cadre de l'étude théorique, nous proposons de démarrer avec un système interactif impliquant un utilisateur et un agent assistant. Ensuite, nous proposons une extension de cette première proposition pour la formalisation du modèle impliquant plusieurs opérateurs humains et un agent assistant. Nous allons terminer ce chapitre par la généralisation de notre modèle d'interaction entre plusieurs opérateurs humains et un système multi-agent d'assistance toujours en utilisant la théorie des jeux comme modèle de coordination. Nous montrons ainsi que malgré sa simplicité, le modèle d'interaction utilisant la théorie de jeu est relativement efficace parce qu'elle prend en compte des caractéristiques du contexte et qu'elle exprime à la fois le bien-être des opérateurs humains et la disponibilité des agents logiciels en termes de gain.

4.2 Modèle d'interaction impliquant un humain et un agent assistant

Dans cette partie, un modèle d'interaction multi-agent, dans lequel peuvent se situer plusieurs êtres humains et agents logiciels, est proposé. Cependant, dans le cadre de ce travail, nous centrons d'abord l'étude sur un système composé d'un être humain et d'un agent logiciel. Après une brève introduction sur la théorie des jeux, une formalisation du système est explicitée.

4.2.1 Interaction fondée sur la théorie des jeux

Dans un système interactif, impliquant des humains, chacun d'entre eux peut être caractérisé par plusieurs aspects selon le modèle de contexte défini dans [Brézillon, 2003]. En particulier, [Brézillon, 2003] a essayé de mettre en évidence le contexte dans la représentation des connaissances et le raisonnement. Cela permet de développer une nouvelle génération de systèmes d'assistance intelligents pour mieux résoudre les problèmes au fur et à mesure qu'ils se présentent en se basant sur un modèle centré sur l'utilisateur. Par exemple, dans le profil utilisateur, on peut considérer le niveau de connaissance par rapport au fonctionnement du système avec lequel il interagit [Hall-Ellis & Greal, 2013]. On peut prendre en compte le niveau de charge de travail instantanée, par exemple selon cinq niveaux comme dans [Kirwan et al., 1997]. On peut prendre en compte aussi ses préférences, son ou ses buts, son niveau d'expertise, etc. En plus, la théorie des jeux a été utilisée comme support de communication entre deux ou plusieurs agents dans [Farooqui & Niazi, 2016]. Le jeu minimal (dans notre contexte) est un jeu à deux joueurs, nécessairement un agent assistant et un être humain :

TABLEAU 4.1 – Représentation de la matrice de jeu

Agent \ Humain	C	D
C	(a,b)	(c,d)
D	(e,f)	(g,h)

Par convention, dans le Tableau 4.1, nous supposons qu'une ligne correspond aux actions de H , (resp. une colonne) aux actions de A . Par hypothèse, nous considérons la construction d'une matrice de jeu à deux joueurs, i.e. 2×2 . Par convention, nous prendrons les actions suivantes pour les différentes entités actives (A et H) : C et D . Inspiré par le dilemme du prisonnier, C signifie que l'entité souhaite coopérer ; tandis

que D signifie qu'elle ne le souhaite pas. En fait, l'hypothèse que nous faisons peut sembler a priori simpliste. En effet, la relation de coopération entre un agent assistant et un être humain n'est pas une **relation symétrique**. Si l'humain veut coopérer avec l'agent (c'est-à-dire il sollicite de l'aide), cela ne signifie pas nécessairement que l'agent coopère (il agit en fonction de l'équilibre). En effet, A peut considérer qu'il coopère avec H s'il considère qu'il lui semble nécessaire de l'aider dans la tâche de supervision ; ou considérer que malgré la demande d'aide de H , son estimation lui permet de décider de ne pas l'assister. Concernant H , l'action C indique le besoin d'une aide car il peut se sentir en difficulté par rapport à la tâche à effectuer ; et l'action D n'est pas une "trahison", mais il estime qu'il n'a pas besoin d'assistance, car il maîtrise l'état courant du système complexe. La coordination fondée sur le jeu permet à chacun des participants de choisir les actions appropriées en réponse avec les actions des autres joueurs (dans notre cas, un seul autre joueur). Dans ce type de jeu, nous supposons que l'agent est rationnel. L'équilibre du jeu constitue un ensemble de stratégies optimales pour chacun des joueurs. La recherche d'équilibre permet ainsi à chacun des agents de décider de l'action optimale qu'il va effectuer en se servant de la matrice du jeu. On utilise très souvent la recherche de l'équilibre de Nash [Nash, 1950] pour déterminer la solution d'un jeu. Rappelons que dans ce cas l'équilibre désigne la stratégie dans laquelle aucun des joueurs n'a intérêt à changer unilatéralement sa stratégie en jouant cet équilibre. La recherche est rendue possible grâce à l'élimination progressive des stratégies dominées.

4.2.2 Formalisation du jeu à deux joueurs

La théorie des jeux a fait déjà l'objet de plusieurs modèles portant sur l'interaction multi-agent comme par exemple dans [Yuan et al., 2005]. Nous proposons dans cette partie un modèle d'interaction intelligente entre un agent et un utilisateur humain. Pour cela, nous pouvons commencer par la description du système en question. Le modèle d'interaction proposée est fondé sur le principe de la théorie des jeux dans le cas de la résolution multi-agent d'un problème donné. Les joueurs qui entrent en interaction sont : un être humain et un agent intelligent qui l'accompagne en l'assistant dans la réalisation de la tâche. Pour les deux joueurs, plusieurs actions possibles peuvent être considérées dans le cadre de l'interaction. Mais pour simplifier le jeu, nous allons le résumer en deux actions seulement : la coopération que nous notons par la suite par la lettre (C), et le non coopération notée par (D). Notre jeu sera donc modélisé par un jeu à deux joueurs et à deux actions possibles pour chacun. On a utilisé ces notations pour notre jeu à deux joueurs ayant deux actions (C, D).

4.2.2.1 Description des actions des joueurs

Pour l'être humain :

- (C) signifie une demande d'aide ou une attente de conseil ou d'information pertinente.
- (D) signifie que l'être humain est autonome : dans ce cas, il agit tout simplement sans demander l'aide de l'assistant.

Pour l'agent assistant :

- (C) signifie qu'il agit directement ou qu'il fait une proposition à l'être humain à propos de ce qu'il peut faire.
- (D) signifie qu'il ne fait rien (il ne répond pas) en laissant l'être humain se débrouiller seul, sans assistance de sa part (il peut apprendre ou continuer à apprendre par l'action, ce qui rejoint le concept du *learning by doing* [DuFour & DuFour, 2013]).

4.2.2.2 Construction de la matrice du jeu à deux joueurs

Le but est d'obtenir un système interactif sensible au contexte intégrant un agent intelligent fondé sur la théorie des jeux. Pour cela, nous proposons d'utiliser les éléments suivants, comme descripteurs de contexte dans la construction des fonctions d'utilités et donc de la matrice de jeu à chaque itération :

Le niveau de la charge de travail : Selon Lyall [Lyall, 2015], "*la charge de travail a été décrite comme un indicateur du niveau de l'effort mental et/ou physique requis pour effectuer un ou plusieurs tâches à un niveau de performance spécifique*". Cette notion nous intéresse particulièrement dans le cas d'un système interactif sensible au contexte car il peut influencer la performance de l'opérateur humain et aussi du système en question. Lorsque le niveau de la charge de travail d'un individu est beaucoup trop élevé, cela affectera obligatoirement son comportement et sa capacité de contrôle. Ainsi, l'opérateur humain risque de commettre des erreurs. A ce sujet, plusieurs méthodes ont été déjà proposées pour estimer le niveau de la charge de travail. Nous pouvons citer entre autres la méthode de Cooper Harper [Cooper & Harper, 1969], inventée au sein de la NASA, la méthode SWAT [O'Donnell & Eggemeier, 1986], la méthode NASA-TLX [Hart, 2006], la méthode RSME développée par [Zijlstra, 1993] et enfin la méthode ISA [Hulbert, 1989; Jordan, 1992]. Ces méthodes seront résumées en annexe 7. Pour cette recherche, le choix s'est porté sur l'échelle à cinq valeurs proposées dans [Kirwan et al., 1997] pour être cohérente avec les niveaux choisis pour les autres descripteurs de contexte. Nous avons

utilisé cette échelle pour exprimer la valeur numérique du niveau de charge de travail d'un opérateur humain (valeur allant de 1 à 5).

Le niveau d'expérience de l'opérateur humain en interaction : Nous considérons généralement que l'expertise d'une personne est le fruit de sa formation, de ses connaissances, ainsi que de ses expériences passées. Ces atouts lui permettront d'accomplir avec plus ou moins grande efficacité des tâches bien spécifiques, plus ou moins difficiles, tout en considérant d'éventuels changements au niveau de l'environnement de travail. En outre, tous les facteurs qui contribuent au niveau actuel de la charge de travail sont importants lorsqu'on examine dans quelle mesure une personne est prête à faire face aux tâches et situations. La combinaison de toutes les caractéristiques liées à des personnes considérées comme des opérateurs fixe son seuil d'erreur. Si le niveau d'expérience est élevé, le seuil d'erreur devient plus élevé. Ensuite, compte tenu du seuil à l'extrémité supérieure du niveau de la charge de travail, une telle personne peut gérer des niveaux croissants de la charge de travail par rapport à la valeur de la probabilité de commettre une erreur. Mais le seuil d'erreur pour les novices sera beaucoup plus bas, avec le risque de le conduire à des erreurs, surtout en cas de charge de travail élevée. L'impact serait similaire avec plus d'expertise qui peut entraîner probabilité de commettre le moindre d'erreurs par exemple dans le cas de l'aviation [Nagel, 1988].

Le modèle Dreyfus [Hall-Ellis & Grealy, 2013], est un modèle d'acquisition de compétences (liée au niveau d'expérience) qui décrit comment les étudiants acquièrent des compétences par le biais d'un enseignement formel et de la pratique, utilisé dans les domaines de l'éducation et de la recherche opérationnelle. Le modèle propose qu'un étudiant passe par cinq étapes distinctes et a été déterminé à l'origine comme : novice, débutant avancé, compétent, efficace et expert. Ces cinq niveaux correspondent bien à la description ci-dessous : Ces auteurs ont proposé une échelle de cinq valeurs pour exprimer le niveau d'expérience :

- **Niveau 1 (Novice) :** Ce niveau d'expérience exige le respect rigoureux des règles ou des plans littéralement. Le sujet en question n'a pas assez de perception globale de la situation. Par conséquent, il n'a pas de jugement personnel de la situation.
- **Niveau 2 (Débutant avancé) :** le sujet commence à reconnaître au mieux la situation et ses caractéristiques globales. Ce niveau peut être atteint après quelques expériences ou une séance d'apprentissage.
- **Niveau 3 (Compétent) :** le sujet commence à reconnaître l'importance et la signification de tous les aspects caractérisant la situation. Il peut exprimer un choix délibéré des plans d'actions. En outre, il n'a pas une grande difficulté dans la

résolution d'un problème ayant survécu.

- **Niveau 4 (Efficace)** : le sujet voit les situations de manière holistique plutôt qu'en termes d'aspects. Dans ce cas, le comportement intuitif remplace les réponses raisonnées, tout en intégrant une prise de décision détachée. Ainsi, le sujet voit ce qui est le plus important dans une situation, il perçoit les écarts par rapport au schéma normal et utilise des maximes pour l'orientation, dont la signification varie selon la situation donnée.
- **Niveau 5 (Expert)** : le sujet ne se contente plus de s'appuyer sur des règles, des lignes directrices ou des indications. Il a la capacité de saisir intuitivement des situations basées sur une compréhension tacite profonde. Il est capable de proposer des approches analytiques utilisées uniquement dans des situations nouvelles ou lorsque des problèmes surviennent. Il a une vision de ce qui est possible et/ou probable.

Le niveau de criticité de la situation : Par définition, la criticité [Chanas & Zieliński, 2002; Baruah et al., 2010] désigne les conséquences des comportements incorrects d'un système faisant l'objet d'un contrôle par des opérateurs humains. Plus les effets directs et indirects attendus d'un comportement incorrect sont graves, plus le niveau de criticité est élevé. Dans le cadre de l'étude d'un système interactif impliquant une criticité de la situation, le risque, et l'étude portant sur les ressources et les efforts nécessaires pour atténuer ce risque, constituent les principaux facteurs à évaluer. Ainsi, le niveau de criticité est évalué selon la probabilité d'échec et les conséquences. La criticité (risque) peut être calculée à l'aide de la formule suivante et en utilisant la valeur de la probabilité de survenue d'une panne.

Niveau de criticité = probabilité de la panne * conséquence de la panne.

Dans le cas d'un contrôle d'un procédé par exemple, cela peut désigner le niveau de dysfonctionnement du système. Pour l'échelle, [Eckhoff, 2016] a défini quatre niveaux de criticité :

- Pas de perturbations du processus (le meilleur : niveau 1),
- Perturbation mineure du processus, faible risque pour les installations et le personnel, arrêt du processus non nécessaire (niveau 2),
- Dérangement majeur du processus, risque important pour les installations et le personnel, arrêt progressif et attentif du processus nécessaire (niveau 3),
- Danger immédiat pour l'installation (le pire) et les opérateurs humains, arrêt d'urgence nécessaire (niveau 4).

Mais pour une raison de conformité avec les autres descripteurs de contexte considérés dans ce travail, nous choisissons une échelle à cinq valeurs pour le niveau de criticité de la situation.

C'est ainsi que dans la suite, nous allons utiliser l'échelle à cinq valeurs pour les descripteurs de contexte proposés dans le cadre de la modélisation d'un système utilisant la théorie des jeux. Pour le calcul de la matrice, nous proposons les formules suivantes, dans lesquelles :

- *wl* désigne le niveau de charge de travail de l'utilisateur [Kirwan et al., 1997] :
 - 1 - sous-chargé,
 - 2 - décontracté,
 - 3 - confortable,
 - 4 - élevé,
 - 5 - excessif.
- *crt* désigne le niveau de criticité de la situation [Purucker et al., 2014]; Ce niveau peut prendre une valeur parmi dix valeurs possibles, réparties en cinq catégories (que nous appellerons par la suite niveaux, pour simplifier) :
 - Insensible ou Normal (0),
 - Inoffensif (1),
 - Désagréable (2),
 - Dangereux (3),
 - Incontrôlable (niveau 4).
- *usl* correspond au niveau d'expérience de l'utilisateur [Hall-Ellis & Grealy, 2013] :
 - Novice (niveau 1),
 - Débutant avancé (niveau 2),
 - Compétent (niveau 3),
 - Efficace (niveau 4),
 - Expert (niveau 5).

En théorie, nous avons choisi les valeurs de gain de l'être humain selon les principes d'adaptation suivants :

- Si l'utilisateur n'a pas assez d'expérience sur la tâche (niveau d'expérience faible), il est préférable que l'agent assistant agisse, surtout si le niveau de la charge de travail et la criticité sont élevés.

- Si l'utilisateur a beaucoup d'expérience du domaine sur lequel il est impliqué (niveau d'expérience élevé), il n'a pas besoin d'assistance, surtout si sa charge de travail et le niveau de criticité sont faibles.
- Le gain de l'être humain qui demande une coopération est proportionnel au niveau de sa charge de travail et à celui de la criticité. Si l'utilisateur est autonome, il a diminué son gain suivant le niveau de criticité de la situation, surtout s'il n'a pas assez d'expérience, il prend des risques de ne pas demander de l'aide à l'agent assistant.

4.2.2.3 Fonctions permettant de calculer la matrice de jeu

Pour l'être humain, nous proposons donc la fonction d'utilité de l'être humain notée U_H et le gain correspondant noté $U_H(x_h, x_a)$, avec x_a la réponse de l'agent assistant à l'action x_h de l'utilisateur.

$$U_H(C, C) = wl + 2 \times (crt - usl) \quad (4.1)$$

$$U_H(D, C) = usl - (wl + crt) \quad (4.2)$$

$$U_H(C, D) = wl - (1 + crt) \quad (4.3)$$

$$U_H(D, D) = usl - crt \quad (4.4)$$

Pour l'agent assistant, la fonction d'utilité est notée U_A et le gain correspondant est noté $U_A(x_h, x_a)$, avec x_h l'action de l'utilisateur et x_a la réponse de l'agent assistant : Si l'utilisateur demande de l'aide, le gain de l'assistant, s'il intervient, est proportionnel à la charge de travail et au niveau de criticité. Si l'utilisateur a un niveau d'expérience élevé, on peut considérer qu'il n'a pas besoin d'assistance, surtout si sa charge de travail et le niveau de criticité sont faibles. Ceci permet à l'assistant de ne pas perdre inutilement de temps (et de laisser l'humain apprendre par l'action, au sens de [DuFour & DuFour, 2013]). Si l'être humain demande une coopération et que l'assistant ne répond pas, l'assistant peut estimer que l'humain n'a pas besoin d'aide, sauf en cas de surcharge et de niveau de criticité élevé. Si l'utilisateur est autonome, l'agent assistant ne va pas perdre de temps à intervenir au lieu de s'occuper d'autres tâches, mais la valeur du niveau de criticité doit influencer sur son choix :

$$U_A(C, C) = wl + crt - usl \quad (4.5)$$

$$U_A(D, C) = usl - wl \quad (4.6)$$

$$U_A(C, D) = -wl \quad (4.7)$$

$$U_A(D, D) = usl - crt \quad (4.8)$$

Calcul du gain moyen

Avec un jeu répété N fois, il est possible de calculer la somme des gains de chacun des joueurs afin de pouvoir obtenir le gain moyen qui dépend évidemment de la décision prise à chaque itération :

Pour l'être humain :

$$G_H = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_H(X, \bar{X})_i \quad (4.9)$$

avec U_H désigne la fonction d'utilité de l'opérateur et $(X, \bar{X})_i$ le profil stratégique à l'itération i

Pour l'agent assistant :

$$G_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_A(X, \bar{X})_i \quad (4.10)$$

avec U_A désigne la fonction d'utilité de l'assistant et $(X, \bar{X})_i$ le profil stratégique à l'itération i .

Détermination de l'équilibre. En effet : (C, C) est un équilibre, ssi :

$$U_A(C, C) \geq U_A(C, D) \text{ et } U_H(C, C) \geq U_H(D, C);$$

c'est-à-dire un système équivalent à :

$$\begin{cases} crt - usl + wl \geq -wl \\ 2 \times crt - 2 \times usl + wl \geq usl - (wl + crt) \end{cases} \quad (4.11)$$

Pour la recherche de l'équilibre dans le cas d'un jeu à deux joueurs, nous avons utilisé l'algorithme 1 :

- L'étape 1 consiste à trouver la meilleure réponse de chaque joueur i par rapport aux actions a_{-i} des autres agents en utilisant l'inégalité : $\forall a_i \in A_i, R_i(a_i^*, a_{-i}) \geq R_i(a_i, a_{-i})$. Afin de pouvoir repérer les meilleures réponses, une deuxième matrice a été nécessaire : c'est BM(s). Cette matrice possède la même taille que la matrice de paiement traitée et ne contiendra que des valeurs booléennes. A chaque fois, qu'une action a_i de l'agent i est évaluée et est considérée comme la meilleure réponse face aux actions a_{-i} des autres agents, l'entrée correspondante prend la valeur booléenne Vrai.
- L'étape 2 consiste à satisfaire l'équation suivante garantissant l'équilibre de Nash : $\forall i \in A_g, \forall a_i \in A_i, R_i(a_i^*, s_{-i}^*) \geq R_i(a_i, a_{-i}^*)$. Pratiquement, cela correspond à parcourir la matrice BM(s) et à repérer toutes les Valeurs (Vraie, Vraie) représentant des équilibres de Nash.

Algorithm 1 EMR : Énumération de meilleurs réponses [Hamila, 2012]

Entrées : Une matrice de paiement $M(s)$

Sorties : Liste des Équilibres de Nash

```

0.1 début
0.2    $ListNash \leftarrow \emptyset$ ;  $BM \leftarrow FAUX$ 
0.3   ▷ Étape 1 : Énumération des meilleures réponses
0.4   pour  $a_j \in A_j$  faire
0.5      $Max \leftarrow M(s, (\langle 0, a_j \rangle))_i$ 
0.6     pour  $a_i \in A_i$  faire
0.7       si  $(M(s, (\langle a_i, a_j \rangle))_i > Max)$  alors
0.8          $Max \leftarrow M(s, (\langle a_i, a_j \rangle))_i$ 
0.9     pour  $a_i \in A_i$  faire
0.10      si  $(M(s, (\langle a_i, a_j \rangle))_i = Max)$  alors
0.11         $BM(s, (\langle a_i, a_j \rangle))_i \leftarrow VRAI$ 
0.12   pour  $a_i \in A_i$  faire
0.13      $Max \leftarrow M(s, (\langle a_i, 0 \rangle))_j$ 
0.14     pour  $a_j \in A_j$  faire
0.15       si  $(M(s, (\langle a_i, a_j \rangle))_j > Max)$  alors
0.16          $Max \leftarrow M(s, (\langle a_i, a_j \rangle))_j$ 
0.17     pour  $a_j \in A_j$  faire
0.18       si  $(M(s, (\langle a_i, a_j \rangle))_j = Max)$  alors
0.19          $BM(s, (\langle a_i, a_j \rangle))_j \leftarrow VRAI$ 
0.20   ▷ Étape 2 : Extraire tous les Équilibres de Nash
0.21   pour  $a_j \in A_j$  faire
0.22     pour  $a_i \in A_i$  faire
0.23       si  $(BM(s, (\langle a_i, a_j \rangle)) = (\langle VRAI, VRAI \rangle))$  alors
0.24          $ListeNash \leftarrow M(s, (\langle a_i, a_j \rangle))$ 

```

Dans cet algorithme, BM désigne une matrice booléenne initialisée avec des valeurs fausses, qui servira à repérer les stratégies dominantes des meilleures réponses. Cette matrice permettra de calculer l'équilibre de Nash grâce à l'énumération des meilleures réponses et la suppression des stratégies dominées (ce qui correspond aux valeurs fausses dans la matrice booléenne modifiée).

4.3 Modèle d'interaction impliquant un agent et plusieurs humains

Après avoir effectué une formalisation de l'approche utilisant la théorie des jeux pour le cas d'un être humain interagissant avec un agent assistant, nous allons étendre l'approche pour pouvoir considérer plusieurs êtres humains. Nous considérons toujours les mêmes descripteurs de contexte que la formalisation dans la section précédente. Les participants ont le choix entre deux actions possibles : coopérer (notée C) ou non coopérer (notée D). Dans cette section, nous allons proposer la fonction d'utilité pour chacun des êtres humains ainsi que pour l'agent assistant afin de pouvoir créer la matrice de jeu. La solution consiste toujours à chercher l'équilibre. Cette fois, nous utilisons une extension de l'algorithme utilisé précédemment pour adapter la recherche dans le cas de plusieurs joueurs (supérieur à deux).

Rappelons que pour pouvoir définir un jeu [Neumann & Morgenstern, 1944; Osborne, 2003], il faut préciser au moins les éléments suivants : les participants au jeu qui s'appellent les joueurs, les règles du jeu, les actions possibles pour chacun des joueurs, les fonctions d'utilité permettant de calculer les gains de tous les participants pour la création de la matrice de jeu, les résultats possibles du jeu. Pour un jeu donné, une combinaison des actions possibles de tous les joueurs s'appelle un profil stratégique. Ainsi, la modélisation par la théorie des jeux consiste à trouver les solutions du jeu. Les approches les plus utilisées sont la recherche des meilleures réponses et la recherche de l'équilibre. Pour cette étude de faisabilité, nous allons utiliser la recherche de l'équilibre [Nash, 1950].

4.3.1 Formalisation du jeu à plusieurs joueurs à deux actions possibles pour chacun

Pour la formalisation, nous pouvons considérer le cas où m êtres humains (utilisateurs) interagissent avec n agents assistants. Dans la suite, nous choisissons de reprendre la notation usuelle C et D (venant du dilemme du prisonnier, énoncé en 1950 par le mathématicien Albert W. Tucker) pour les actions des différentes entités : C pour Cooperate, D pour Defect (sachant que dans notre cas, D signifie en fait pour un agent qu'il choisit de ne pas coopérer, cf. plus loin). Pour les êtres humains, nous choisissons les notations suivantes :

L'être humain demande de l'aide à l'assistant : C. Il ne requiert aucune aide : D. Pour les assistants, ils peuvent répondre à la demande de l'un des êtres humains (s'il y a au moins une demande) ou informer/avertir les êtres humains d'une information importante

s'il n'y a aucune demande : C. Ils peuvent aussi laisser les êtres humains travailler de manière autonome, ce qui rejoint aussi le principe de *learning by doing* [DuFour & DuFour, 2013] : D.

La Figure 4.1 montre un exemple de représentation des cas possibles sous forme d'un graphe. H_i est un des êtres humains impliqués et A_1 désigne un assistant. Ainsi les issues du jeu sont les chemins : CCC, CCD, CDD, CDC, DCD, etc. Par exemple, CCC signifie que les deux êtres humains H_1 et H_2 demandent simultanément de l'aide et que l'assistant intervient.

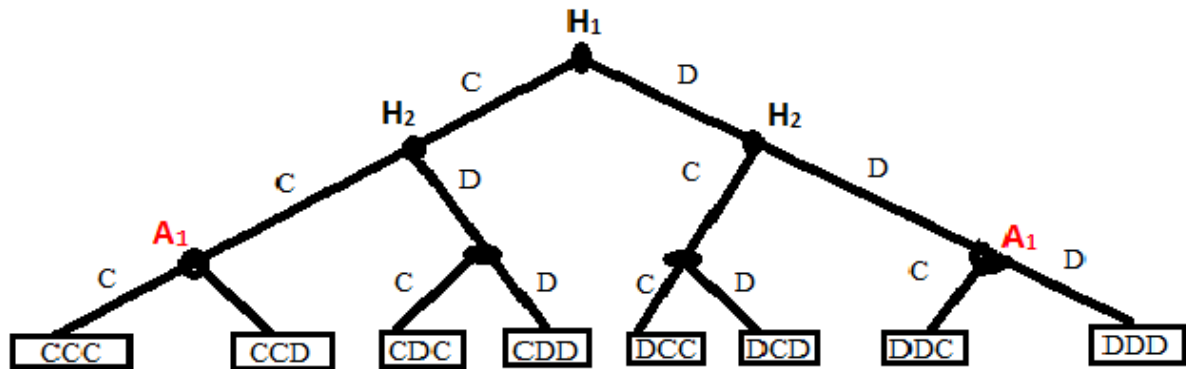


FIGURE 4.1 – Graphe montrant les issues du jeu (cas de deux humains et d'un agent assistant)

Dans le cadre de la prise de décision, chacun des agents assistants peut adopter l'une des stratégies suivantes :

- Agir ou non d'une manière aléatoire (le plus bas niveau d'intelligence).
- Agir ou non en essayant de maximiser son gain pour chaque coup du jeu (l'assistant est égoïste [Eshel et al., 1998]).
- Agir ou non en considérant le maximum de gain pour les êtres humains (il est plus altruiste [Brainov, 1996] avec les êtres humains).
- Agir ou non en fonction de l'équilibre de Nash [Nash, 1950] en considérant le gain optimal de tous.

4.3.2 Gains des êtres humains et des agents assistants

4.3.2.1 Le gain des êtres humains

Si un être humain demande de l'aide, son gain dépend des réponses des assistants et des choix des autres humains : son gain diminue avec son niveau de charge de travail. Son gain diminue aussi selon son profil car plus il a un niveau d'expérience élevé et une charge de travail minimale, moins il devrait solliciter l'agent assistant (qui devrait

pouvoir ainsi s'occuper d'autres tâches par exemple). Le gain de chacun des humains dépend aussi des autres êtres humains : si l'humain demande de l'aide, son gain augmente avec le nombre d'assistants qui répondent, avec la somme des valeurs de la charge de travail de tous les êtres humains, et le niveau de criticité. Mais le gain diminue avec son niveau d'expérience. Si l'être humain est autonome, son gain diminue avec l'intervention d'un l'assistant et surtout s'il n'a pas un niveau de charge de travail élevé. Mais, en fait, le niveau de criticité peut influencer significativement le choix de l'être humain, d'être autonome ou non.

4.3.2.2 Le gain des assistants

Les gains du ou des assistants dépendent des choix des êtres humains et des choix des autres éventuels agents assistants. En plus les valeurs numériques des gains prennent en compte les informations relevant du contexte utilisateur, à savoir le niveau d'expérience et le niveau de la charge de travail de l'être humain. L'assistant est considéré comme un agent logiciel capable d'intervenir dans le cas où les êtres humains ont besoin d'aide. En termes de théorie des jeux, l'agent et les êtres humains qui ont besoin d'aide partagent la même valeur de gain car en cas d'intervention de l'assistant, ce dernier justifie par son gain que son intervention est nécessaire ; ce gain augmente aussi avec le niveau de criticité de la situation. En cas de non intervention, on peut choisir les valeurs selon deux cas :

- (1) Lorsque les êtres humains n'ont pas besoin d'aide, l'agent assistant ne doit pas réagir (i.e. répondre à leur demande) au risque de perdre inutilement du temps (qui pourrait être consacré à d'autres tâches) ,
- (2) Lorsque les êtres humains ont demandé de l'aide (et que l'assistant n'intervient pas), le gain de l'assistant peut augmenter car il a beaucoup plus de temps pour s'occuper d'autres tâches mais il ne sera pas très utile selon le point de vue de l'être humain [Maes, 1994], surtout si ce dernier a vraiment besoin de l'aide, à cause d'un niveau élevé de charge de travail par exemple.

4.3.2.3 Fonctions permettant de calculer la matrice de jeu à chaque itération durant la tâche

Selon les principes liés aux gains, énoncés ci-dessus, nous pouvons proposer les fonctions suivantes dans le cadre de la création de la matrice de jeu pour le cas d'un agent assistant et n êtres humains :

Calcul du gain de l'assistant : (1) L'assistant a réagi (C) :

$$U_A(C, \bar{X}) = c_h \sum_{i=1}^n wl_i - \sum_{i=1}^n usl_i - d_h \times crt \quad (4.12)$$

Où : crt désigne le niveau de criticité de la situation selon [Purucker et al., 2014].

c_h désigne le nombre des êtres humains qui demandent de l'assistance.

d_h désigne le nombre d'êtres humains qui sont autonomes : pas besoin d'assistance.

wl_i désigne le niveau de charge de travail de l'être humain d'indice i .

usl_i est le niveau d'expérience de l'utilisateur i .

n est le nombre total d'opérateurs humains.

Dans cette formule, le gain de l'assistant augmente avec le nombre d'humains qui demandent de l'aide, et avec leur niveau de charge de travail. Cela montre l'importance de l'intervention de l'assistant. Mais ce gain diminue avec la somme de leurs niveaux d'expérience car si tous les humains sont des experts, l'assistant n'a pas besoin d'intervenir.

(2) L'assistant laisse le soin aux opérateurs humains de travailler de manière autonome (D) :

$$U_A(D, \bar{X}) = c_h \sum_{i=1}^n usl_i - \sum_{i=1}^n wl_i \quad (4.13)$$

Où \bar{X} sont les actions des autres joueurs. C : l'assistant réagit (C).

D : il laisse autonomes les humains (D).

Ici le gain de l'assistant augmente seulement avec la somme des valeurs des niveaux d'expérience des humains. Mais le gain de l'assistant diminue avec leur niveau de charge de travail et surtout avec le niveau de criticité (car la non-assistance peut entraîner une perte).

Calcul du gain de l'humain d'indice k : (1) L'être humain d'indice k demande de l'aide (C) :

$$U_{H_k}(C, \bar{X}) = c_a \sum_{i=1}^n wl_i - d_a \sum_{i=1}^n wl_i - usl_k \quad (4.14)$$

d_a est le nombre d'agents assistants qui choisissent de ne pas intervenir (i.e. ne pas répondre). Dans cette formule, le gain de l'être humain qui demande de l'aide augmente avec la somme des charges de travail de tous les êtres humains qui demandent de l'aide. Mais il diminue avec le niveau d'expérience de l'être humain en question (ici indexé par k) et le nombre des personnes qui ne sollicitent pas de l'aide (avec pondération par le niveau de criticité).

(2) L'être humain d'indice k est autonome (D) :

$$U_{H_k}(D, \bar{X}) = -c_a \sum_{i=1}^n wl_i + usl_k - (wl_k + crt) \quad (4.15)$$

Où : H_k désigne l'être humain d'indice k. \bar{X} sont les actions possibles pour les autres joueurs.

c_a désigne le nombre d'agents assistants qui prennent le choix d'intervenir comme assistant $usrl_k$ le niveau d'expérience de l'utilisateur.

Dans ce cas, le gain diminue avec la somme des charges de travail de tous les êtres humains. Et comme l'être humain (d'indice k) est autonome, ce n'est que son niveau d'expérience qui aura un impact positif au niveau de la valeur de son gain. Mais avec un niveau de criticité élevé et un niveau de charge de travail élevé, son gain doit diminuer en conséquence.

Autres alternatives : Dans les fonctions d'utilité proposées, on peut remplacer la sommation portant sur les charges de travail et les niveaux d'expériences des opérateurs humains par :

- le maximum des niveaux de charge de travail
- le minimum des niveaux de charge de travail
- le maximum des niveaux d'expérience des opérateurs humains
- le minimum des niveaux d'expérience des opérateurs humains

Calcul du gain moyen de chaque participant : Avec un jeu répété N fois, il est possible de calculer la somme des gains de chacun des joueurs afin de pouvoir obtenir le gain moyen qui dépend évidemment de la décision prise à chaque itération :

Pour l'être humain d'indice k :

$$U_{H_k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{H_k}(X, \bar{X})_i \quad (4.16)$$

avec U_H désigne la fonction d'utilité de l'opérateur et $(X, \bar{X})_i$ le profil stratégique à l'itération i

Pour l'agent assistant :

$$G_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_A(X, \bar{X})_i \quad (4.17)$$

avec U_A désigne la fonction d'utilité de l'assistant et $(X, \bar{X})_i$ le profil stratégique à l'itération i .

Ces formules permettent d'évaluer les gains de chacun des joueurs en étudiant les équilibres de chaque itération. Pour l'assistant, nous avons prévu l'hypothèse qu'il prend en charge d'autre tâches à part de l'assistance à l'opérateur sur une tâche bien spécifique.

4.3.3 Équilibre du jeu

Après la construction des fonctions d'utilité pour les joueurs, nous allons maintenant procéder à la résolution du jeu le plus utilisé. L'équilibre en stratégie pure du jeu correspond à la situation dans laquelle aucun des joueurs n'a intérêt à changer unilatéralement ses stratégies [Nash, 1950]. Mais l'équilibre de Nash en stratégie pure n'existe pas toujours. En alternative, il y a aussi un autre type d'équilibre appelé équilibre en stratégie mixte qui utilise une distribution de probabilité sur l'ensemble des actions possibles pour chacun des joueurs pour déterminer l'équilibre. Notre formulation conduit à un jeu à somme non nulle, c'est-à-dire que la somme des gains des différents joueurs n'est pas égale à 0. Dans notre cas, les conditions suivantes doivent être satisfaites pour qu'un profil stratégique soit un équilibre de Nash en stratégie pure. Soit un profil stratégique noté s^* tel que : $s^* = (s_1^*, s_2^*, s_3^*, \dots, s_N^*, s_A^*)$, où N désigne le nombre des opérateurs humains. Alors s^* est un équilibre de Nash en stratégie pure si :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{H_1}(s^*) \geq U_{H_1}(s_1, s_2^*, \dots, s_N^*, s_A^*) \\ U_{H_2}(s^*) \geq U_{H_2}(s_1^*, s_2, s_3^*, \dots, s_N^*, s_A^*) \\ \dots \\ U_{H_N}(s^*) \geq U_{H_N}(s_1^*, s_2^*, s_3^*, \dots, s_{N-1}, s_N, s_A^*) \\ U_A(s^*) \geq U_A(s_1^*, s_2^*, s_3^*, \dots, s_N^*, s_A) \end{array} \right. \quad (4.18)$$

Si l'agent agit, les gains des humains demandant de l'aide sont supérieurs au gain de ceux qui sont autonomes.

Si l'agent ne répond pas, les gains des humains demandant de l'aide sont inférieurs au gain des humains autonomes.

Concernant l'agent, si l'humain est autonome, le gain de l'agent en cas d'intervention est inférieur à celui en cas de non intervention.

Si l'humain demande de l'aide, le gain de l'agent intervenant est supérieur à celui en cas de non intervention. Nous utilisons pour la recherche d'équilibre de Nash l'algorithme décrit dans [Shoham & Leyton-Brown, 2008].

Si l'algorithme ne trouve pas d'équilibre, nous avons proposé que l'agent assistant

n'intervienne pas (il choisit l'action D ce qui lui permet de s'occuper d'une autre tâche).

L'algorithme suivant permet de rechercher l'équilibre dans le cas de plusieurs joueurs (notons que ce même algorithme, moyennant une adaptation, sera utilisé pour le cas décrit dans la partie suivante, impliquant plusieurs humains et plusieurs agents assistants).

Algorithm 2 EMR : Énumération de meilleurs réponses [Hamila, 2012]

Entrées : Une matrice de paiement $M(s)$

Sorties : Liste des Équilibres de Nash

```

0.25 début
0.26    $ListNash \leftarrow \emptyset; BM \leftarrow FAUX$ 
0.27   ▷ Étape 1 : Énumérer les meilleures réponses
0.28   pour  $i \in |A_g|$  faire
0.29     pour  $a_{|A_g|} \in A_{|A_g|}$  faire
0.30       pour  $a_{|A_g|-1} \in A_{|A_g|-1}$  faire
0.31         .
0.32         .
0.33         .
0.34         pour  $a_0 \in A_0$  faire
0.35            $Max \leftarrow M(s, (\langle 0, \dots, a_{|A_g|} \rangle))_i$ 
0.36           pour  $a_i \in A_i$  faire
0.37             si  $(M(s, (\langle a_i, a_{-i} \rangle))_i > Max)$  alors
0.38                $Max \leftarrow M(s, (\langle a_i, a_{-i} \rangle))_i;$ 
0.39             pour  $a_i \in A_i$  faire
0.40               si  $(M(s, (\langle a_i, a_{-i} \rangle))_i = Max)$  alors
0.41                  $BM(s, (\langle a_i, a_{-i} \rangle))_i \leftarrow VRAI;$ 
0.42   ▷ Étape 2 : Extraire tous les Équilibres de Nash
0.43   pour  $a_{|A_g|} \in A_{|A_g|}$  faire
0.44     pour  $a_{|A_g|-1} \in A_{|A_g|-1}$  faire
0.45       .
0.46       .
0.47       .
0.48       pour  $a_0 \in A_0$  faire
0.49         si  $(BM(s, (\langle a_0, a_1, \dots, a_{|A_g|} \rangle)) = (\langle VRAI, VRAI, \dots, VRAI \rangle))$  alors
0.50            $ListeNash \leftarrow M(s, (\langle a_0, a_1, \dots, a_{|A_g|} \rangle))$ 

```

Dans la suite, nous allons généraliser notre approche avec l'implication de plusieurs êtres humains et plusieurs agents logiciels.

4.4 Modèle d'interaction impliquant plusieurs agents et plusieurs humains

4.4.1 Formalisation du jeu à plusieurs joueurs à deux actions possibles pour chacun

Pour la formalisation, nous pouvons considérer le cas où n êtres humains interagissent avec m agents assistants. Pour cela, nous considérons les êtres humains et les agents assistants comme des participants au jeu en question qui modélise ainsi l'interaction personne-système.

4.4.1.1 Description des joueurs

Nous partons sur l'hypothèse que les êtres humains sont tous des joueurs rationnels capables d'optimiser leurs gains. Cependant, ils ne vont pas choisir une action en fonction de leurs gains car ils n'utilisent pas la matrice de jeu. Ils sont caractérisés par leur niveau d'expérience et leur niveau de charge de travail. Les deux actions possibles pour chacun des êtres humains sont les suivantes [Razakatiana et al., 2020b] :

L'être humain demande de l'aide à l'assistant : c'est la coopération pour exprimer la demande d'aide auprès de l'un des agents assistants (C). Dans ce cas, l'opérateur humain en question n'est pas autonome.

L'être humain est autonome, il n'a pas besoin de l'intervention de l'un des agents assistants. On considère dans ce cas qu'il est autonome selon le principe de **Learning by doing** [DuFour & DuFour, 2013] : D

Pour les assistants, chacun peut intervenir, informer ou avertir les êtres humains : C
Ils peuvent aussi laisser les êtres humains travailler de manière autonome : D

Dans le cadre de leurs prises de décision, les agents logiciels effectuent les trois étapes suivantes, de manière cyclique :

- Partage de tâches entre les agents logiciels selon l'évolution de l'environnement (dans notre cas, un trafic routier à réguler par des feux de signalisation) ; dans l'état actuel, l'algorithme décrit pour cette allocation de tâches est fondé sur un traitement FIFO.
- Intervention ou non de chacun des agents assistants par rapport à la résolution de la matrice de jeu [Razakatiana et al., 2020a].
- Considérer les autres tâches à exécuter par rapport au besoin des êtres humains dans le cadre de l'interaction humain-machine toujours en considérant la matrice de jeu.

4.4.2 Explication des choix de la formule permettant de calculer la matrice de jeu

4.4.2.1 Le gain des êtres humains

Pour un être humain qui sollicite de l'aide, la valeur numérique de sa fonction d'utilité dépend des réponses des assistants et des choix des autres humains : cette valeur est diminuée du niveau de sa charge de travail et de son profil car plus il a un niveau d'expérience élevé et une charge de travail minimale, moins il devrait solliciter l'assistant (ce dernier pouvant s'occuper d'autres tâches s'il n'est pas sollicité par le ou les humains). Ses gains dépendent aussi des réponses des autres êtres humains : s'il demande de l'aide, le gain augmente avec le nombre d'assistants qui répondent, son niveau de charge de travail, diminue avec son niveau de profil et le niveau de criticité de la situation. Si l'être humain ne sollicite pas d'aide, son gain diminue avec le nombre d'assistants qui coopèrent, car il n'a pas besoin de l'aide vu son niveau d'expérience élevé et son niveau de charge de travail minimal par exemple. Malgré cela, le niveau de criticité [Purucker et al., 2014] est aussi introduit dans le calcul du gain pour considérer son importance relativement au choix de chacun des êtres humains et des agents assistants. Ceci est rendu possible grâce à la possibilité de calculer l'équilibre à chaque itération du jeu.

4.4.2.2 Le gain des assistants

Le gain de chacun des assistants dépend aussi des choix des êtres humains (de les solliciter ou non), ainsi que des choix des autres assistants, tout en prenant en compte des informations provenant du contexte. Les assistants sont considérés comme des agents logiciels capables d'intervenir en cas de défaillance ou absences des êtres humains. En termes de jeu, le gain d'un agent augmente avec celui des êtres humains en cas d'intervention, tout en étant proportionnel au niveau de criticité car plus la situation est critique et plus son intervention est justifiée. En cas de non intervention, on peut choisir les valeurs selon le cas :

- Lorsque les êtres humains n'ont pas besoin d'aide, l'assistant ne doit pas réagir au risque de perdre inutilement du temps. Il laisse les êtres humains travailler seuls et comprendre eux-mêmes la situation, puis tenter de la résoudre [DuFour & DuFour, 2013].

- Lorsque les êtres humains ont demandé de l'aide, l'intervention d'un agent assistant est importante car il a réagi comme il le faut [Maes, 1994]. Dans ce cas, ses gains augmentent aussi avec le niveau de charge de travail des êtres humains et avec le niveau de criticité de la situation.

4.4.3 Proposition pour les valeurs des fonctions d'utilité

Selon le principe ci-dessus, nous pouvons proposer les fonctions d'utilité suivantes afin de pouvoir construire la matrice de jeu, sensible au contexte, pour le cas m assistants et n êtres humains :

4.4.3.1 Calcul du gain de l'assistant d'indice j

L'assistant d'indice j intervient :

$$U_{A_j}(C, \bar{X}) = c_h \sum_{i=1}^n wl_i - \sum_{i=1}^n usl_i - d_h \times crt \quad (4.19)$$

L'assistant d'indice j n'intervient pas :

$$U_{A_j}(D, \bar{X}) = c_h \sum_{i=1}^n usrl_i - \sum_{i=1}^n wl_i - d_h \times crt \quad (4.20)$$

4.4.3.2 Calcul du gain de l'humain d'indice k

L'être humain d'indice k demande de l'aide :

$$U_{H_k}(C, \bar{X}) = c_a \sum_{i=1}^n wl_i - d_a \sum_{i=1}^n usl_i - d_h \times crt \quad (4.21)$$

L'être humain d'indice k est autonome :

$$U_{H_k}(D, \bar{X}) = -c_a \sum_{i=1}^n wl_i + usl_k - crt + wl_k \quad (4.22)$$

Où :

- c_h désigne le nombre des êtres humains qui sollicitent l'aide des agents assistants (c'est-à-dire qui ont choisi la coopération avec des agents assistants)
- d_h : nombre des êtres humains qui ont choisi l'autonomie (ils ne sollicitent pas d'assistance)
- wl_i : Niveau de charge de travail de l'être humain d'indice i
- $usrl_i$: Niveau d'expérience de l'utilisateur d'indice i
- n : le nombre total d'opérateurs humains

Calcul du gain moyen de chaque participant : Avec un jeu répété N fois, il est possible de calculer la somme des gains de chacun des joueurs afin de pouvoir obtenir le

gain moyen qui dépend évidemment de la décision prise à chaque itération :

Pour l'être humain d'indice k :

$$U_{H_k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{H_k}(X, \bar{X})_i \quad (4.23)$$

avec U_H désigne la fonction d'utilité de l'opérateur et $(X, \bar{X})_i$ le profil stratégique à l'itération i .

Pour l'assistant d'indice k :

$$U_{A_k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_{A_k}(X, \bar{X})_i \quad (4.24)$$

avec U_{A_k} désigne la fonction d'utilité de l'assistant et $(X, \bar{X})_i$ le profil stratégique à l'itération i .

Les assistants peuvent jouer soit l'équilibre soit la meilleure réponse. Pour les êtres humains, ils interviennent ou non en fonction de leurs capacités et de leurs perceptions, que ce soit l'équilibre ou non. Le gain de chacun des êtres humains exprime la valeur numérique qui peut quantifier son bien-être (individuel), par exemple la non-augmentation du niveau de charge de travail et la sensation de la performance dans la réalisation coopérative des tâches complexes.

4.4.3.3 Recherche de l'équilibre de Nash

: Soit $s_A^* = (s_{A_1}^*, s_{A_2}^*, s_{A_3}^*, \dots, s_{A_M}^*)$ les actions des M agents assistants en équilibre, Alors, $s^* = (s_1^*, s_2^*, s_3^*, \dots, s_N^*, s_A^*)$ est un équilibre de Nash en stratégie pure si :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{H_1}(s^*) \geq U_{H_1}(s_1, s_2^*, \dots, s_N^*, s_A^*) \\ U_{H_2}(s^*) \geq U_{H_2}(s_1^*, s_2, s_3^*, \dots, s_N^*, s_A^*) \\ \dots \\ U_{H_N}(s^*) \geq U_{H_N}(s_1^*, s_2^*, s_3^*, \dots, s_{n-1}^*, s_N, s_A^*) \\ U_{A_1}(s^*) \geq U_{A_1}(s_1^*, s_2^*, s_3^*, \dots, s_N^*, s_{A_1}^*, s_{A_2}^*, \dots, s_{A_K}^*, \dots, s_{A_M}^*) \\ U_{A_2}(s^*) \geq U_{A_2}(s_1^*, s_2^*, s_3^*, \dots, s_N^*, s_{A_1}^*, s_{A_2}^*, \dots, s_{A_K}^*, \dots, s_{A_M}^*) \\ U_{A_K}(s^*) \geq U_{A_K}(s_1^*, s_2^*, s_3^*, \dots, s_N^*, s_{A_1}^*, s_{A_2}^*, \dots, s_{A_K}^*, \dots, s_{A_M}^*) \\ U_{A_M}(s^*) \geq U_{A_M}(s_1^*, s_2^*, s_3^*, \dots, s_N^*, s_{A_1}^*, s_{A_2}^*, \dots, s_{A_K}^*, \dots, s_{A_M}^*) \end{array} \right. \quad (4.25)$$

Plusieurs algorithmes ont été proposés pour la recherche d'équilibre de Nash et utilisant le principe de la meilleure réponse. L'algorithme proposé par [Shoham & Leyton-Brown,

2008] est un exemple des algorithmes connus pour la recherche de l'équilibre dans le cas de deux joueurs avec des actions finies. Un autre algorithme a été proposé par Jiang et al. [Jiang, 2016] pour le cas d'un jeu à plusieurs joueurs ayant chacun deux actions possibles en utilisant la notation binaire. Dans le cas de plusieurs joueurs, [Hamila, 2012] a proposé une extension de l'algorithme décrit dans la section du cas impliquant deux joueurs (cf. §6.1) en suivant le même principe de l'énumération des meilleures réponses. L'algorithme ci-dessous a été proposé pour la généralisation de la recherche d'équilibre de Nash [Hamila, 2012] pour le cas de n joueurs (cf. §4.3).

Pour la recherche, on utilise le même principe énoncé dans le cas de deux joueurs (voir section 4.1). La seule différence c'est le nombre de joueurs et la taille de la matrice booléenne $BM(s)$ dont les éléments sont des n -uples).

4.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté notre contribution principale dans le cadre de la thèse. Ainsi, un modèle d'interaction humain-machine fondé sur la théorie des jeux a été proposé. Nous avons présenté aussi quelques éléments utilisés dans la formalisation du jeu. En particulier, les descripteurs de contexte ont été détaillés afin de montrer la sensibilité au contexte de l'approche proposée. Pour raison d'uniformisation, nous avons choisi les valeurs numériques qui correspondent à cinq valeurs pour tous les descripteurs de contexte considérés. Des fonctions d'utilité ont été proposées dans les trois cas envisagés : on a démarré avec le cas où un opérateur humain et un agent logiciel entre en interaction sous forme d'un jeu répété à deux joueurs dont chacun a deux actions possibles : la coopération et la non coopération.

Ensuite, dans le cadre d'une première généralisation, on a proposé aussi la formalisation d'un jeu à plusieurs joueurs impliquant plusieurs êtres humains et un agent logiciel.

A la fin du chapitre, on est arrivé à une généralisation du modèle d'interaction impliquant plusieurs êtres humains et plusieurs agents logiciels. Ceci permet à un agent logiciel de créer, à chaque itération, une matrice de jeu sensible au contexte et de prendre une décision en fonction de celle-ci. Pour cela, nous avons supposé que la décision d'un agent logiciel dépend de l'équilibre de Nash à chaque itération, s'il va coopérer ou non. Malgré le fait que l'équilibre de Nash n'existe toujours pas en stratégie pure (la solution que nous avons choisie), nous pouvons en conclure que le modèle d'interaction utilisant la théorie de jeu nous permet de concevoir un système interactif sensible au contexte impliquant les êtres humains et les agents logiciels. Le modèle permet aussi de prendre en compte explicitement le bien-être de chacun des entités impliquées sous forme de gain.

Dans la suite nous allons décrire trois expérimentations réalisées, dans le cadre d'une simulation d'un système interactif de supervision impliquant un ou des êtres humains, ainsi qu'un ou des agents logiciels, tout en exploitant les trois variantes de modélisation décrites dans ce chapitre.

Chapitre 5

Environnement de simulation participative pour la mise en œuvre du cas d'étude

5.1 Introduction

Dans le but de montrer la faisabilité de notre modèle d'interaction décrit dans le chapitre précédent, selon trois versions (un humain et un agent, plusieurs humains et un agent, plusieurs humains et plusieurs agents) successivement présentées, nous avons besoin de l'implémenter dans une étude de cas. Pour chacune de ces trois versions, l'objectif est d'exécuter le jeu répété à plusieurs joueurs (c'est-à-dire avec un ou des êtres humains, un ou des agents logiciels) à travers une simulation d'une tâche complexe de supervision du trafic routier.

Nous avons construit un simulateur de trafic à l'aide de Netlogo. Celui-ci permet à un ou plusieurs opérateurs humains de gérer le trafic, en coopération ou non avec des agents logiciels, grâce à la possibilité de simulation participative dans cet environnement. A chaque itération, les agents logiciels calculent la matrice de jeu, puis déterminent l'équilibre de Nash afin de décider de coopérer ou non. Pour entamer l'étude expérimentale, nous allons introduire brièvement la notion de simulation. Ensuite, nous allons présenter quelques travaux connexes portant sur l'étude du trafic routier. Avant de présenter les expérimentations réalisées, il s'agira de décrire l'outil Netlogo utilisé dans la construction du simulateur.

5.2 Généralités sur la simulation

En informatique, la simulation peut être considérée comme la reproduction sur ordinateur d'un phénomène ou d'un système, en essayant de comprendre son fonctionnement et son comportement. Ceci permettra d'en prédire des caractéristiques. Il est possible aussi d'étudier de près les différentes activités des acteurs, qui entrent en interaction avec le simulateur, vis-à-vis d'un environnement interactif donné.

Par exemple, la simulation peut concerner :

- un mouvement des plaques terrestres, pour étudier le phénomène de tremblement de terre ou d'autres catastrophes naturelle,
- Le fonctionnement d'un procédé industriel,
- un dispositif électronique ou électromécanique,
- un trafic routier (comme dans le cadre de cette thèse),
- ou encore le mouvement d'une foule en cas d'évacuation d'urgence.

D'après [Fishwick et al., 1997] (Figure 5.1), la simulation informatique d'un phénomène ou d'un système est réalisée grâce à la combinaison des trois activités suivantes :

- conception du modèle d'un système réel ou théorique,
- exécution de ce modèle sur un ordinateur,
- analyse des résultats de cette exécution.

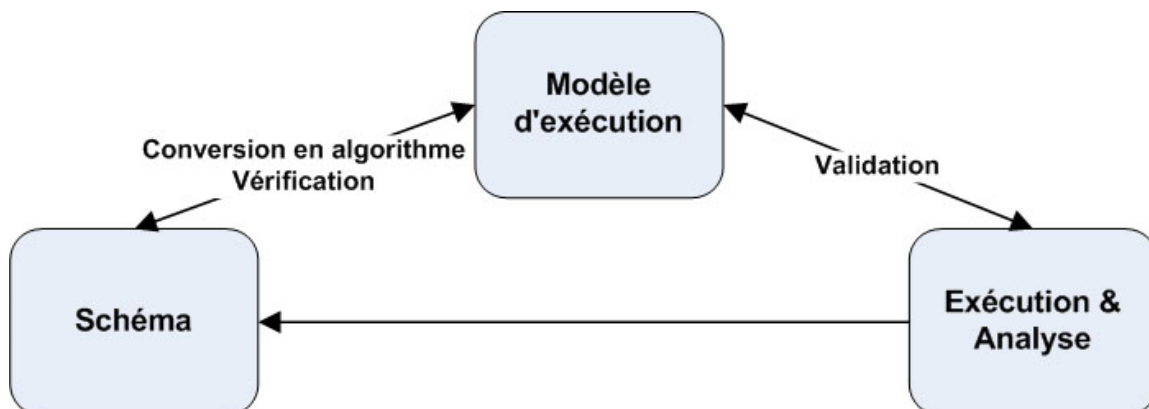


FIGURE 5.1 – Étapes de la simulation selon [Fishwick et al., 1997]

La conception du modèle associe la réalité à une représentation de celle-ci, en utilisant des données la plupart du temps formalisées. Il peut s'agir d'observations réelles (valeurs numériques) ou de connaissances sur les objets d'étude. Ces entrées sont traduites en algorithmes qui seront exécutés dans le but de produire des données compatibles avec les observations.

5.3 Travaux connexes sur la simulation de trafic

Vue l'augmentation de la taille du trafic routier dans la plupart des pays, son contrôle devient de plus en plus compliqué, particulièrement dans l'objectif de limiter la congestion au niveau des trafics routiers (peri-)urbains. Plusieurs travaux ont porté sur l'utilisation des agents intelligents pour résoudre le problème du trafic. La gestion des feux de circulation était le principal sujet sur l'utilisation des agents intelligents dans de nombreux travaux, tels [Mastio et al., 2018; Fujii et al., 2017], [Postorino & Sarné, 2016] et [Chen & Cheng, 2010]. Pour diminuer l'ampleur de la congestion au niveau des intersections de routes, [Kumar & Mitra, 2006] proposent un modèle d'auto-organisation du mouvement des véhicules en cas de défaillance des feux de trafic dans certaines intersections. En plus, une démarche multi-agent a été proposée pour la résolution de ce problème du trafic comme dans [Sankar & Chandra, 2020], [Liu et al., 2017], [Doniec et al., 2008a] et [Almejalli et al., 2009]. D'autres solutions basées sur des agents intelligents peuvent être citées, par exemple : (1) l'utilisation de l'Internet des objets (IoT) pour les systèmes de transport intelligents (ITS) [Manikanta et al., 2000; Al-Sakran, 2015], ou (2) l'utilisation d'agents virtuels capables d'interagir avec des objets tangibles sur table interactive RFID dans des situations de simulation de trafic [Lebrun et al., 2015; Kubicki et al., 2013a]. Dans [Liu et al., 2017], l'agent intelligent est doté d'un mécanisme de Q-learning pour la gestion des feux de trafic. En outre, des solutions au problème de la gestion de l'intersection sont aussi proposées dans [Mandiau et al., 2008] et [Trinh et al., 2018]; ces auteurs utilisent une matrice de jeu pour résoudre le problème de prise de décision au niveau des véhicules dans un trafic routier. Malgré la diversité de ces approches, aucune des démarches citées ci-dessus ne prend en compte explicitement plusieurs opérateurs humains qui sont aidés par un système multi-agent d'assistance dans la supervision du trafic.

Toujours dans le cadre de la gestion du trafic routier, qui nous intéresse en termes de simulation, les travaux exploitant l'intelligence artificielle sont nombreux : par exemple, [Sankar & Chandra, 2020] a proposé une approche multi-agent utilisant le principe d'une colonie de fourmis pour gérer le déplacement de véhicules. En outre, plusieurs approches utilisent des agents intelligents pour améliorer les commandes et contrôles des feux de circulation à l'intersection, comme dans [Wu et al., 2017]. Toujours en termes de régulation de trafic, [Basconcillo et al., 2017] a proposé une méthode utilisant la logique floue pour le contrôle efficace de feux à une intersection; ceci a été réalisé à travers une simulation en prenant en compte les informations permettant de gérer le passage pour les piétons. Dans ce travail, nous allons utiliser Netlogo comme outil de simulation dans le cadre de l'expérimentation liées à des situations dans lesquelles un ou des êtres humains, ainsi

qu'un ou des agents logiciels sont impliqués dans le contrôle du trafic routier. Les acteurs peuvent à n'importe quel moment utiliser les feux de trafic installés à chaque intersection pour contrôler le mouvement des véhicules à l'entrée de l'intersection.

5.4 Contexte expérimental : Simulation de trafic

5.4.1 Présentation de Netlogo

Netlogo est un outil gratuit permettant la simulation à base d'agents pour un système donné [Wilensky & Stroup, 2002; Wilensky & Rand, 2015]. Il facilite la modélisation et l'élaboration du code d'une simulation en se basant sur les éléments suivants :

- Les tortues, qui sont des agents mobiles qui peuvent se déplacer dans un espace de dimension 2 ; par exemple des véhicules (dans notre cas), des personnes ou des animaux.
- Les patches, qui sont des composants immobiles sur lesquelles les tortues peuvent se déplacer ; par exemple des routes (dans notre cas), des espaces verts ou des rivières.
- Les composants, qui permettent de construire l'interface graphique de Netlogo ; par exemple des boutons de commande, des zones de texte, des zones d'affichage qui peuvent contenir des informations graphiques (par exemple de courbes) ou encore des listes déroulantes pour effectuer un choix parmi plusieurs valeurs.

Netlogo est téléchargeable gratuitement sur le site "<http://ccl.northwestern.edu>". Il est disponible pour les plateformes de Microsoft Windows, Linux et MacOS. Actuellement, Netlogo 6.2.0 est connue comme la dernière version stable de Netlogo.

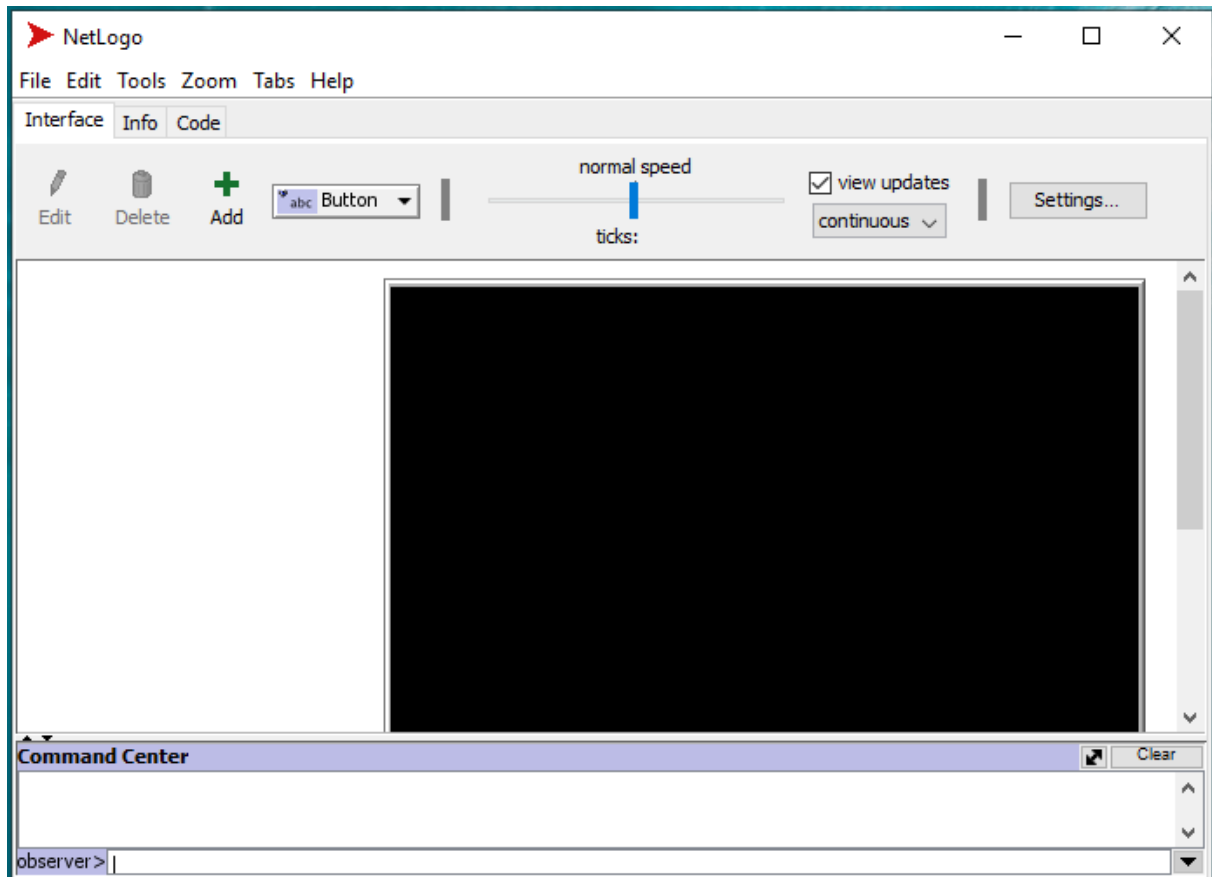


FIGURE 5.2 – Interface de Netlogo

La figure 5.2 montre la page de démarrage de Netlogo ; cette interface contient principalement les composants suivants :

- L'élément "*interface*" permet de créer l'interface proprement dite du modèle à l'aide de divers contrôles.
- L'élément "*info*" permet de saisir à l'aide d'une fonction d'édition les informations portant sur le modèle, tels que la description du simulateur développé, le guide pour l'utilisateur du simulateur, etc.
- L'élément "*Code*" permet d'éditer le code de l'application simulateur.
- Le glisseur "Normal speed" permet de contrôler la vitesse de la simulation sous forme de "*ticks*".
- La zone initialement en noir permet de visualiser des animations suite à l'exécution du programme.
- La zone "*Command center*" située en bas permet de voir certains résultats textuels de l'exécution de la simulation, tandis que "*Observer*" permet d'exécuter directement des commandes spécifiques en relation avec l'application par un utilisateur.

Pour élaborer le code, plusieurs fonctions prédéfinies sont disponibles. Il devient ainsi

possible de développer des simulateurs de systèmes complexes. De plus, Netlogo possède plusieurs modèles intégrés dans sa bibliothèque à titre d'exemples ; ils permettent à un utilisateur novice de comprendre le fonctionnement de l'outil et le commencer sans grande difficulté. On peut les réutiliser pour pouvoir améliorer un autre modèle, sous réserve de citation du modèle de départ.

Dans ce travail, nous avons utilisé le modèle de trafic de base initial de Netlogo pour construire notre simulateur de trafic routier. Nous avons aussi tiré profit de la possibilité de simulation participative, selon les principes énoncés dans (Taillandier et al., 2019) : ce type de simulation permet à un ou plusieurs participants d'être actifs dans la simulation, et d'interagir avec le simulateur pour, par exemple, pouvoir apprendre à l'utiliser ou faire des tests de fonctionnement du simulateur en question. En utilisant Netlogo, on peut mettre en œuvre le serveur Hubnet qu'utilisent les participants pour interagir avec le simulateur.

5.4.2 Principes de base de la supervision de trafic avec Netlogo

La supervision et la régulation de trafic est reconnue comme l'une des tâches complexes pouvant impliquer des êtres humains pour s'occuper de la régulation à chacune des intersections. Les assistants sont destinés à les aider dans la réalisation de ces tâches avec deux actions : s'occuper particulièrement d'une intersection ou laisser la tâche aux opérateurs humains pour le contrôle des feux de trafic installés à chaque intersection. Pour cela, certaines règles d'expertise pourront être évoquées pour justifier l'intervention ou non de chacun des agents assistants à travers chacune des intersections : un agent peut chercher une intersection qui présente le maximum de véhicules en attente d'entrée dans cette dernière (par exemple les véhicules stoppés par le feu rouge devant eux). Dans ce cas, l'agent peut procéder au changement de couleur de feu en estimant que ce changement pourrait permettre une fluidité du trafic. Ainsi, chacun des assistants possède une zone d'occupation (tout comme un être humain) et peut sélectionner une intersection qui présente le minimum de véhicules en attente d'entrée dans l'intersection (en étant stoppés par un feu rouge).

5.4.3 Le système interactif proposé

La figure 5.3 montre l'architecture globale du système, proposée afin de pouvoir lancer la simulation participative [Taillandier et al., 2019]. Plusieurs utilisateurs peuvent se connecter avec l'application de simulation de trafic, abritant des agents internes tels que les véhicules et les feux de trafic installées de chaque côté de l'entrée d'une intersection.

Ensuite, l'application peut enregistrer les données liées aux trafics et aux utilisateurs connectés, pour chaque cycle d'observation ; ce qui permet d'effectuer une analyse des résultats après chaque exécution de la simulation. Pour la simulation de la supervision de trafic, un système d'assistance est modélisé par un système multi-agent (SMA) formé par des agents assistants.

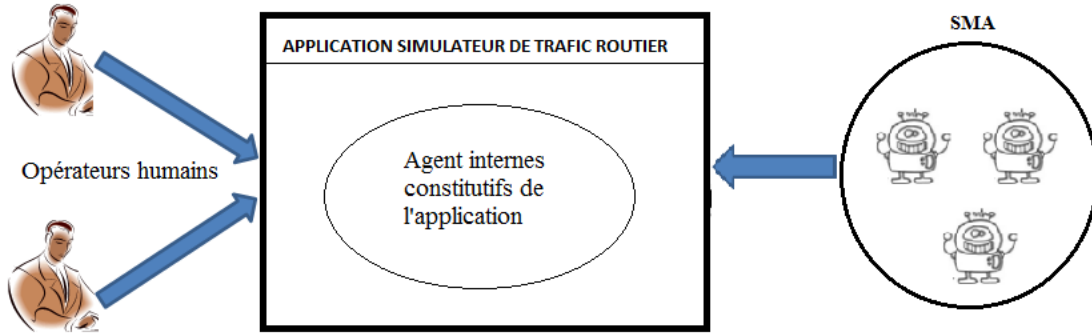


FIGURE 5.3 – Architecture du système proposé dans le cadre de l'étude de cas [Razakatiiana et al., 2020a]

En termes de formalisation, le modèle d'interaction proposé est décrit dans le diagramme ci-dessous (Figure 5.4) :

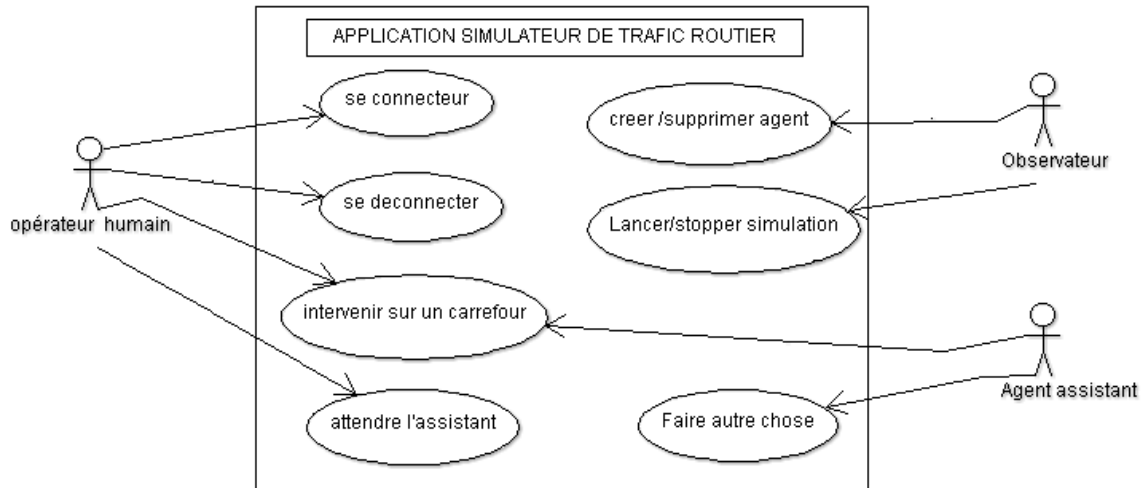


FIGURE 5.4 – Diagramme du système proposé [Razakatiiana et al., 2020b]

5.4.4 Description du simulateur

Considérons le cas où plusieurs agents assistants peuvent aider les êtres humains dans le cadre de la supervision du trafic. Pour cela, il est possible d'avoir plusieurs intersections sur lesquelles les agents et les êtres humains peuvent effectuer les changements des feux

dans le but commun d'obtenir une fluidité qui soit la meilleure possible au niveau de chacune des intersections.

5.4.4.1 Le serveur Hubnet

Le serveur Hubnet permet une simulation participative dans laquelle les clients connectés peuvent participer d'une manière coopérative à la gestion des feux de trafic afin d'obtenir la meilleure fluidité possible. Pour simplifier, nous avons considéré seulement l'intervention sur les feux de trafic bien que les opérateurs humains peuvent agir sur d'autres composants de l'interface client. L'interface du serveur Hubnet contient plusieurs composants :

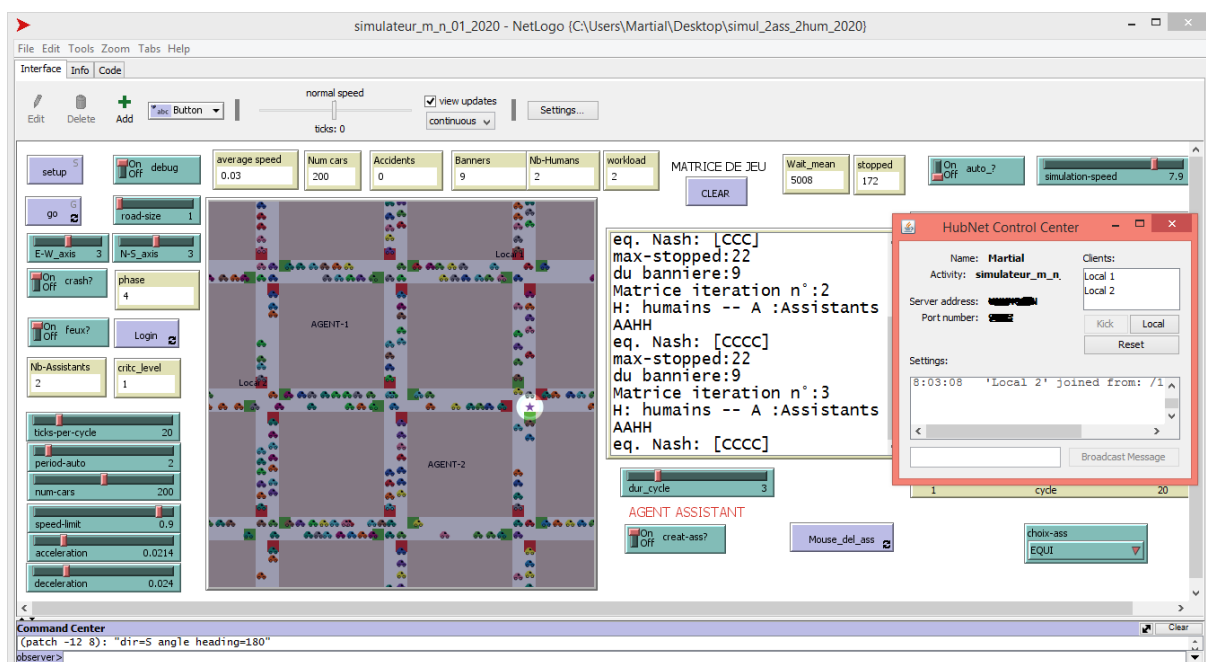


FIGURE 5.5 – Interface utilisateur du serveur hubnet

- La partie gauche contient tous les éléments permettant l'initialisation de l'environnement du simulateur, tel que le choix des dimensions des routes (nombre de voies, nombre des axes, etc.).
- La partie suivante contient la vue du trafic (les véhicules et les routes) et une zone qui montre l'évolution de l'équilibre de Nash.
- La dernière partie est une fenêtre Hubnet control center contenant la liste des clients connectés, l'adresse IP du serveur et le numéro du port utilisé (cachés pour des raisons de sécurité).

5.4.4.2 Le client Hubnet

Grâce à l'interface du client Hubnet, chacun des opérateurs humains connectés au serveur du simulateur a le choix de prendre l'initiative sur une intersection qu'il peut choisir et changer les feux de trafic correspondants ou attendre l'aide des assistants mis en place pour les aider à contrôler les feux de l'ensemble du trafic. Chacun des clients connectés peut consulter aussi les informations concernant le niveau de charge de travail des autres opérateurs ainsi que leur niveau d'expérience, pour aider sa décision à travers l'interface client hubnet. L'interface du Client contient les éléments suivants :

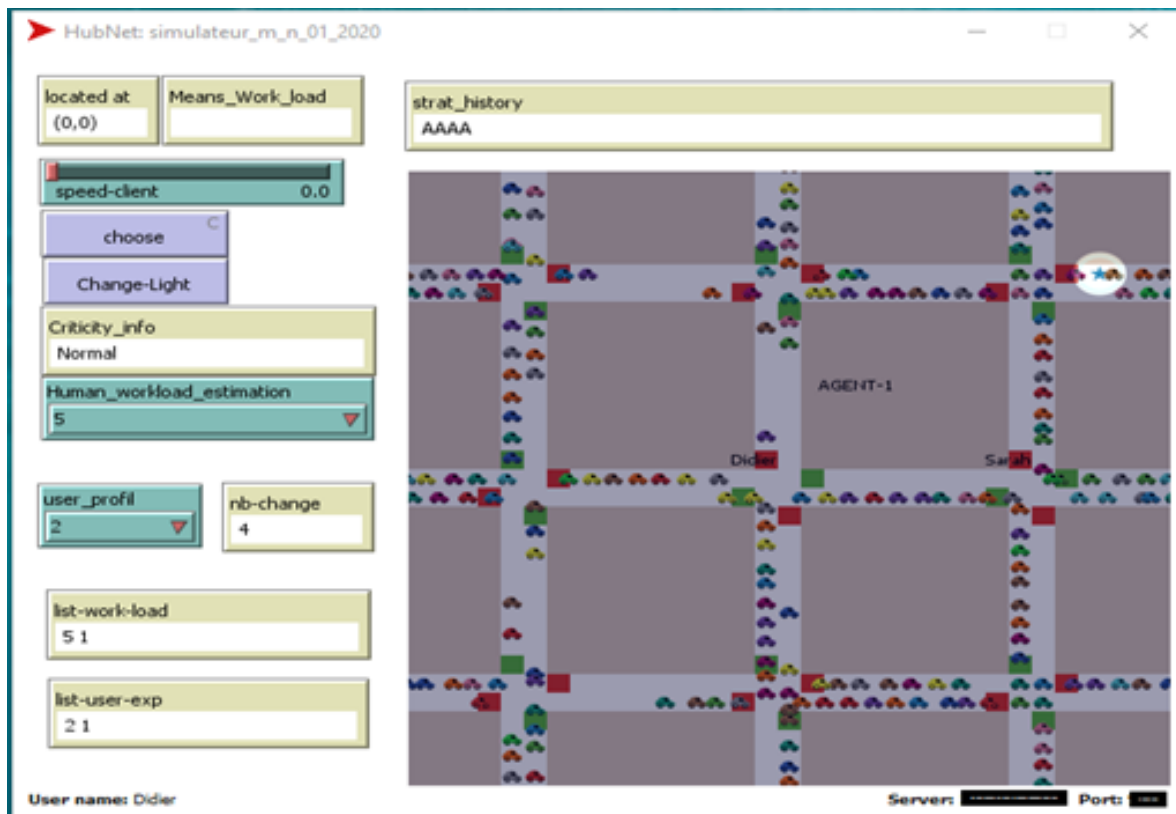


FIGURE 5.6 – Interface utilisateur du client hubnet

- les composants permettant au client Hubnet d'agir sur le trafic : changer l'intersection d'intervention, modifier la vitesse maximale (dans ce cas, seul le dernier changement effectué par un client est prise en compte) ;
- les composants qui permettent à un opérateur humain de simuler l'estimation du niveau de sa propre charge de travail et de son niveau d'expérience ;
- les composants qui permettent de voir certaines informations, telles que la liste des informations portant sur les opérateurs humains, le nombre d'interventions effectuées par chacun des opérateurs humains, le niveau de criticité du trafic.

Toutes les personnes sollicitées dans le cadre de cette première étude de faisabilité ont

accepté d'y participer, mais la situation sanitaire liée à Covid-19 n'a pas permis d'avoir plus de participants (pas d'accès aux bâtiments). La figure 5.7 montre l'expérimentation dans la salle d'expérience.



FIGURE 5.7 – Salle d'expérience

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré un aperçu de l'environnement de simulation, concernant une tâche complexe impliquant un ou des êtres humains et un ou des agents logiciels. Nous avons choisi Netlogo comme outil de simulation. La simulation participative offerte par cet outil nous a permis d'implémenter le cas ou plusieurs êtres humains participant simultanément à la tâche du contrôle du trafic à travers les feux situés à chaque intersection. Pour les agents logiciels, l'observateur a la possibilité de créer ou supprimer un agent logiciel, même en cours d'exécution de l'application de simulation, ce qui montre l'ouverture du système multi-agent proposé. En fait, nous avons considéré l'interaction des êtres humains avec un système multi-agent d'assistance. Pour cela, l'implémentation consiste à partager le contrôle du trafic pour les participants. Ainsi, chacun des opérateurs humains s'occupe prioritairement d'une ou plusieurs intersections. Il peut contrôler les feux d'intersection selon sa propre manière. Quant aux agents assistants, chacun peut prendre une décision, à chaque itération, en fonction de l'équilibre trouvé. S'il n'intervient pas, il aura la possibilité de s'occuper d'une autre tâche. Cela nous montre, encore une fois la faisabilité de l'approche utilisant la théorie des jeux avec des avantages pour l'être humain (aidé en cas de besoin ou laissé autonome avec une visée de learning by doing [DuFour & DuFour, 2013] dans le cas contraire). Pour l'agent assistant, l'approche

permet de justifier son utilité dans le cas d'une intervention, mais aussi sa disponibilité pour d'autres tâches dans le cas de non intervention.

Chapitre 6

Analyse et discussion des données issues des trois études

6.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter le protocole suivi, ainsi que les résultats obtenus pour chacun des trois cas d'étude envisagés dans les deux chapitres précédents, et selon le cadre de simulation présenté dans le chapitre précédent. Chacun des résultats présentés sera suivi d'une analyse sur la situation du trafic vis-à-vis de l'interaction entre, d'une part le ou les êtres humains impliqués, et d'autre part le ou les agents logiciels concernés. On va commencer par les résultats obtenus dans le cas où un être humain et un agent sont impliqués dans la tâche de contrôle du trafic. Dans notre cas, nous allons considérer un trafic de difficulté moyenne avec 4 carrefours et 84 véhicules. Ensuite, nous présentons les résultats avec le cas où deux êtres humains et un agent logiciel prennent en charge le contrôle du trafic avec 9 carrefours et 200 véhicules. Nous allons terminer ce chapitre avec les résultats obtenus avec deux êtres humains et deux agents logiciels toujours avec 9 carrefours et 200 véhicules.

6.2 Cas impliquant un être humain assisté par un agent

6.2.1 Protocole expérimental

Dans cette première étude, faisant office pour nous de première étude de faisabilité technique, et dont les résultats ont été publiés dans [Razakatiana et al., 2020b], l'application simulateur est au centre de l'interaction entre un opérateur humain et un agent logiciel. Il n'y a pas beaucoup d'exigence sur le participant. Il suffit tout simplement qu'il

sache manipuler la souris pour pouvoir intervenir si nécessaire, et qu'il possède une bonne capacité visuelle. Un seul participant a été impliqué. Le participant à cette première étude est un étudiant en première année de formation en Économie et Gestion. Agé de 21 ans, il est droitier et a une bonne capacité visuelle.

Le client Hubnet permet à l'être humain d'intervenir sur le simulateur. Pour cela, il peut modifier la limite de la vitesse via un glisseur, choisir une intersection et changer les couleurs des feux de cette dernière (voir Fig. 6.1). Pour les informations utilisateurs, le client permet aussi de modifier le niveau de charge de travail du client connecté, ainsi que le niveau de son profil.

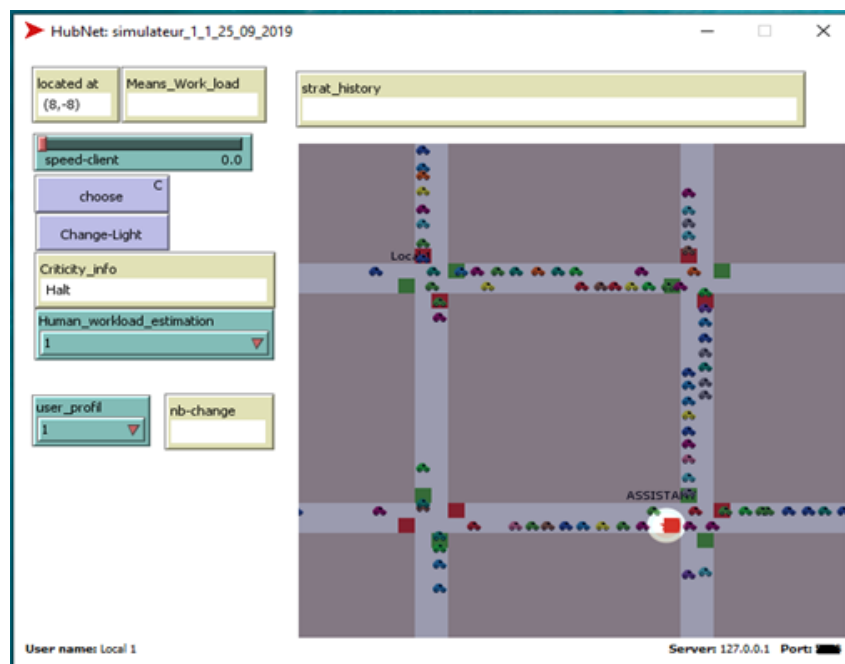


FIGURE 6.1 – Interface client Hubnet [Razakatiana et al., 2020b]

L'agent Assistant est un agent du simulateur qui est a pour mission d'aider l'être humain dans le cadre de la tâche de gestion du trafic. L'agent intervient suivant sa décision en changeant les couleurs des feux à une ou plusieurs intersections. Pour cela, l'algorithme suivant est implémenté pour le simulateur :

- Mise à jour de la matrice de jeu suivant les informations proposées et/ou estimées (le niveau d'expérience, le niveau de charge de travail, le niveau de criticité de la situation).
- Recherche d'un équilibre (en choisir un s'il y en plusieurs : il choisit l'équilibre qui contient la coopération. Si aucun équilibre ne contient une coopération, c'est donc la non coopération).
- En fonction de cet équilibre, l'agent choisit son action adaptée à l'application courante (par exemple pour le trafic, il évalue la fluidité du trafic, et change la couleur

des feux pour une intersection donnée).

- Répétition de l'analyse pour chaque itération. Dans ce cas, on a choisi 50 itérations.

6.2.2 Résultat de la simulation et interprétation

Le modèle est constitué d'un agent intelligent et d'un être humain connecté en tant que client Hubnet, avec un nombre de véhicules égal à 84. On a choisi le nombre de véhicules égal à 84 pour la raison suivante : dans le simulateur, on peut créer autant de véhicules que l'on souhaite, mais il est important de ne pas dépasser les espaces (routes) disponibles. De plus, pour avoir un seuil de niveau de criticité, il faut que le nombre de véhicules soit important. Dans notre simulation, nous supposons un environnement avec quatre carrefours (il est possible d'en avoir beaucoup plus ; mais nous pensons que ce choix est suffisant pour valider notre idée), conduisant à générer 140 véhicules environ tout en gardant un environnement pouvant facilement évoluer (si le nombre de véhicules est trop important, il faudrait définir une gestion de l'occupation de l'espace et un mécanisme d'anticipation des agents qui dépasseraient la problématique de ce travail, voir par exemple [Doniec et al., 2008b])).

Les résultats fournis ci-dessous sont obtenus sans aucune intervention de l'être humain. Il s'avère que ce participant a fait le choix de ne pas agir. Pourtant il a été constaté que, pendant l'expérience, il a bien compris le jeu en modifiant quelques paramètres : le niveau de sa charge de travail et son niveau d'expérience. Ainsi, la courbe visible en Figure 6.2 montre l'évolution dans le temps, du nombre des véhicules stoppés selon les équilibres instantanés conditionnés par les informations de contexte considérées pour 50 itérations.

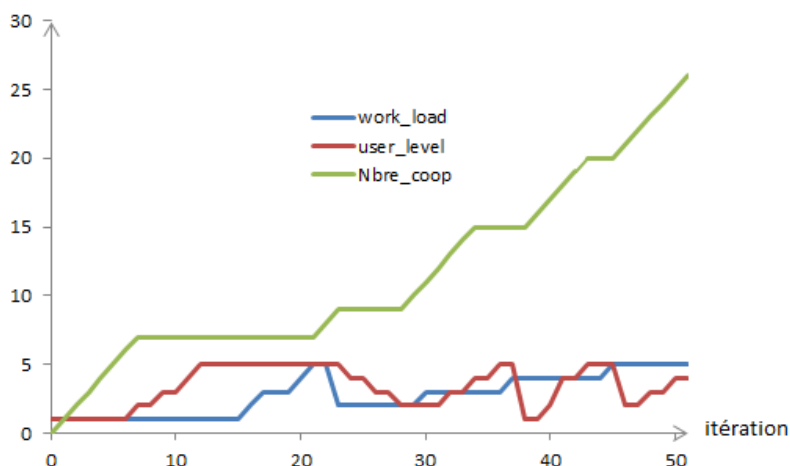


FIGURE 6.2 – Évolution des valeurs des descripteurs de contexte

Avec la variation du niveau de charge de travail et le niveau d'expérience de l'utilisateur, on peut voir aussi l'évolution du nombre d'interventions de l'agent assistant (Figure

6.3) :

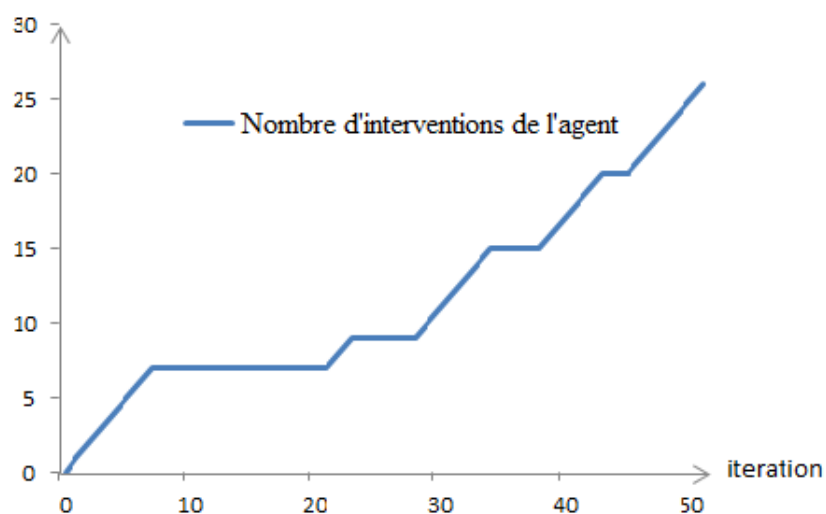


FIGURE 6.3 – Intervention de l'agent assistant

Dans le cadre de la gestion du trafic, l'intervention de l'agent assistant représentée dans la figure 6.3 entraîne aussi, à chaque itération, l'évolution de la vitesse moyenne des véhicules.

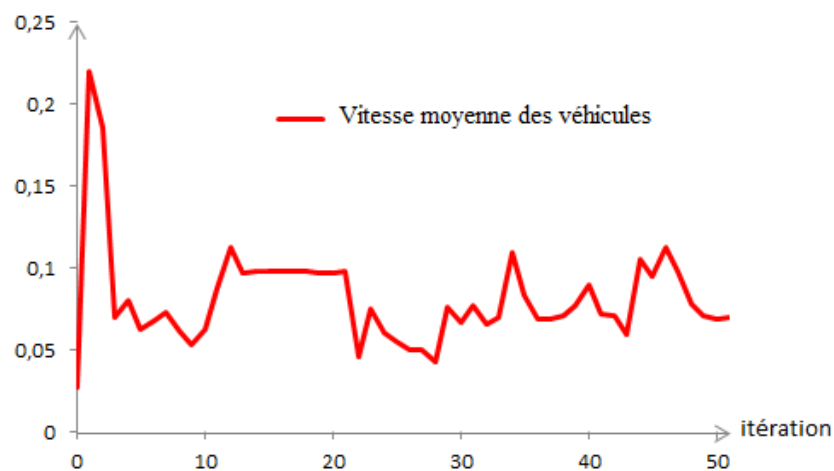


FIGURE 6.4 – Vitesse moyenne des véhicules

Par ailleurs, les deux figures 6.5 et 6.6 représentent l'évolution du nombre des véhicules stoppés et l'évolution du temps d'attente moyenne cumulés à chaque itération.

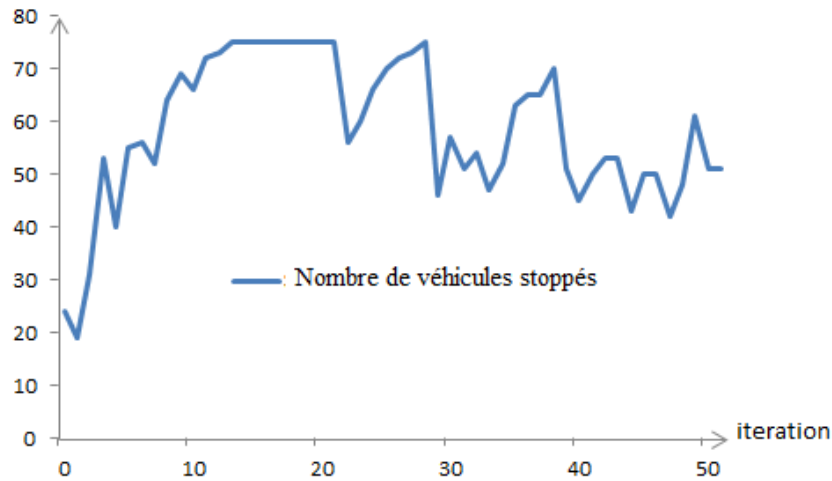


FIGURE 6.5 – Nombre de véhicules stoppés

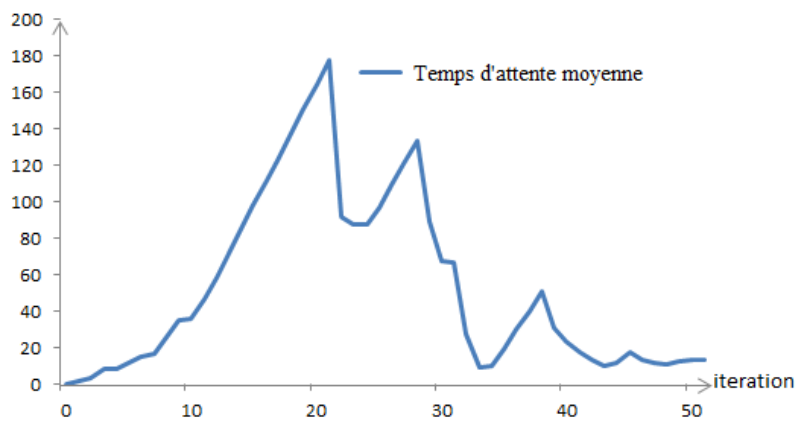


FIGURE 6.6 – Temps d'attente moyenne des véhicules

Entre les itérations 11 et 21, on constate que l'agent assistant n'intervient pas : ceci est justifié parce que durant cette période, le niveau d'expérience est élevé tandis que le niveau de la charge est faible. Il en est de même pour les itérations 21 à 30. A partir de 31, on voit que le nombre d'interventions augmente parce qu'on constate une augmentation du niveau de la charge de travail de l'être humain, et ceci relativement à son niveau d'expérience.

6.2.3 Résultat pour l'équilibre

Durant les 50 cycles, on peut constater la variation de l'équilibre de Nash suivant l'évolution des informations de contexte qui déterminent la matrice du jeu : le niveau d'expérience de l'être humain et le niveau de sa charge de travail. Pour le nombre d'itérations, on peut avoir un nombre d'itérations quelconque ; mais pour une raison de clarté de l'évolution du nombre d'interventions, de la vitesse moyenne, des temps d'attente

moyenne des véhicules dans les courbes, on a considéré sur les figures 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 6.5 une cinquantaine d'itérations.

6.2.3.1 Notation dans le résultat de la simulation

Les équilibres de Nash dans le cas de deux joueurs sont donnés sous la forme d'une ou de plusieurs combinaisons des éléments suivants : CC, CD, DD DC. Pour chaque cycle d'observation, l'intervention de l'assistant consiste à repérer tout d'abord le carrefour qui possède le maximum de véhicules en attente d'entrée dans celui-ci. Ensuite, il change les feux : les feux verts deviennent rouges et vice versa.

- CC : signifie que l'être humain attend de l'aide et que l'agent assistant agit sur un ou plusieurs carrefours du trafic.
- CC CD : signifie que l'être humain peut être autonome ou non ; mais l'assistant agit toujours tant qu'il existe une coopération dans l'équilibre de Nash calculé à chaque itération.
- DD : signifie que l'être humain est autonome et que l'assistant ne fait rien. Dans ce cas, l'être humain doit agir parce que l'assistant ne fera rien (il peut par exemple résoudre d'autres problèmes au niveau du trafic).

6.2.3.2 Interprétation

A chaque instant, l'agent intelligent calcule la matrice de jeu. Ensuite il détermine l'équilibre et à partir de ce dernier, il peut examiner l'action de l'être humain, puis il réagit à cette action par rapport à l'équilibre obtenu. La figure 6.3 présente ainsi l'évolution du nombre d'interventions de l'assistant par rapport à l'évolution à l'état de l'être humain durant les itérations :

- *work_load* : désigne le niveau de la charge de travail de l'être humain (ce niveau peut être modifié via l'interface client).
- *user_level* : niveau d'expérience de l'être humain
- *nbre_coop* : nombre d'interventions de l'agent assistant.

La figure 6.5 montre que l'augmentation du nombre d'interventions de l'assistant entraîne une diminution du nombre des véhicules en attente au cours de la simulation. Ceci explique aussi le fait que si l'être humain a besoin de l'intervention de l'assistant, ce dernier intervient ainsi en considérant les équilibres possibles. Dans le cas où l'être humain doit être autonome, par exemple lorsque le niveau de criticité et le niveau de la charge de travail sont faibles et que son niveau d'expérience est élevé, l'agent n'intervient

pas au vu du résultat de l'équilibre. Dans ce cas, si l'être humain n'intervient pas, il y aura un ralentissement global du carrefour. Ainsi, l'évolution de la courbe des vitesses moyennes (figure 6.4) et la durée d'attente moyenne aux feux (figure 6.6) illustrent le résultat du travail effectué par l'agent assistant en cas de besoin en termes de fluidité du trafic. Ces résultats nous semblent prometteurs, et ceci malgré un comportement de l'agent relativement simple au vu de la complexité de cette application : ces résultats montrent ainsi l'efficacité de l'intervention (ou non intervention) de l'agent assistant tout en considérant les informations liées au contexte.

6.3 Cas impliquant deux êtres humains assistés par un agent

6.3.1 Protocole expérimental

Trois participants (appelés par la suite P1, P2 et P3) ont été impliqués dans cette seconde étude de faisabilité, dont les résultats ont été publiés dans [Razakatiana et al., 2020a]. Ce sont des étudiants de niveau licence, en physique ou en économie (moyenne d'âge : 25 ans ; deux hommes et une femme). De plus, un observateur externe (évaluateur) est désigné pour la configuration initiale du modèle de trafic en fixant le limiteur de vitesse, le nombre de véhicules, etc. Il fixe aussi la durée d'une itération, lance et stoppe la simulation. Pour la mise en application, le protocole de la figure 6.7 est suivi.

1. Réponse à un questionnaire (âge, sexe, capacité visuelle, gaucher/droitier, niveau d'étude, niveau de connaissance du trafic routier, connaissance de l'utilisation de Netlogo comme simulateur de trafic).
2. Démonstration de la mise en œuvre de Netlogo pour la simulation de trafic (véhicules, feux de trafic) et démonstration de l'utilisation de l'interface utilisateur du client hubnet (choix du niveau d'expérience, estimation de la charge de travail, autres commandes utiles au contrôle du trafic).
3. Explication sur l'existence de l'agent assistant et son principe d'intervention ; description de l'objectif de la coopération humain-agent vis-à-vis du trafic.
4. Lancement de la simulation dans un projecteur ; chaque participant du groupe choisi d'abord sa zones d'occupation. Après le clic sur le bouton « go », ils essaient d'obtenir la meilleure fluidité possible du trafic de ses propres zones d'occupation sur son propre écran.
5. Réponse à un questionnaire après l'expérience (utilisabilité, efficacité de l'assistance, avis sur celle-ci).

FIGURE 6.7 – Protocole suivi par les participants

En termes d'architecture, le diagramme visible en Figure 6.8 montre les différents types d'acteurs : opérateur humain, simulant un contrôleur de trafic routier (au nombre de un, puis deux), agent assistant, observateur externe (évaluateur).

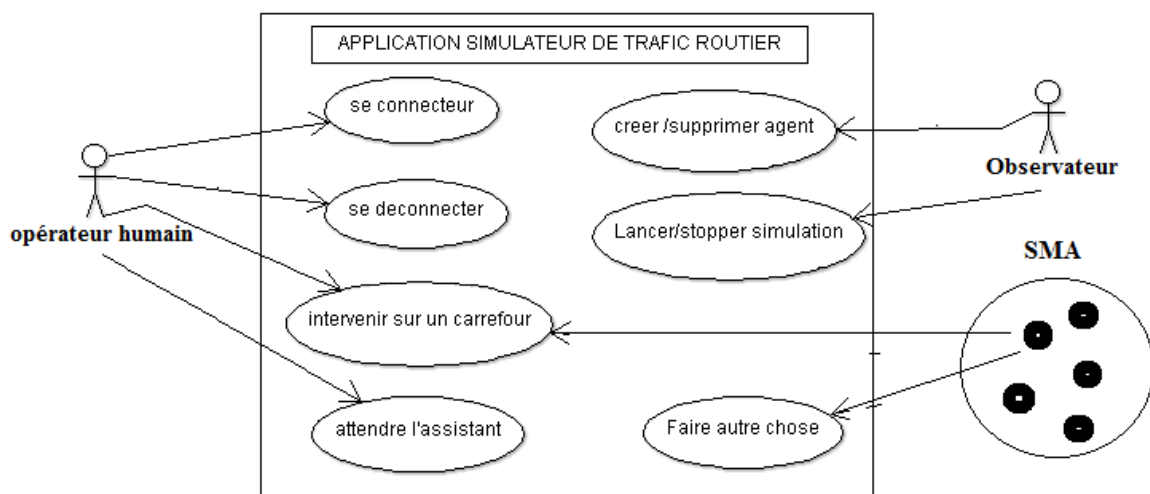


FIGURE 6.8 – Diagramme

La Figure 6.9 montre une page-écran utilisée par le participant P2 (cas de deux humains P2 et P3 impliqués dans la tâche de contrôle du trafic). Chaque participant est connecté via un client Hubnet. Chaque client leur présente une interface utilisateur avec un ensemble de commandes permettant d'intervenir sur le trafic routier. Les captures d'écrans pour l'autre participant, le serveur ainsi que les captures mettant en évidence les fichiers générés par l'application sont fournies en annexe 4.

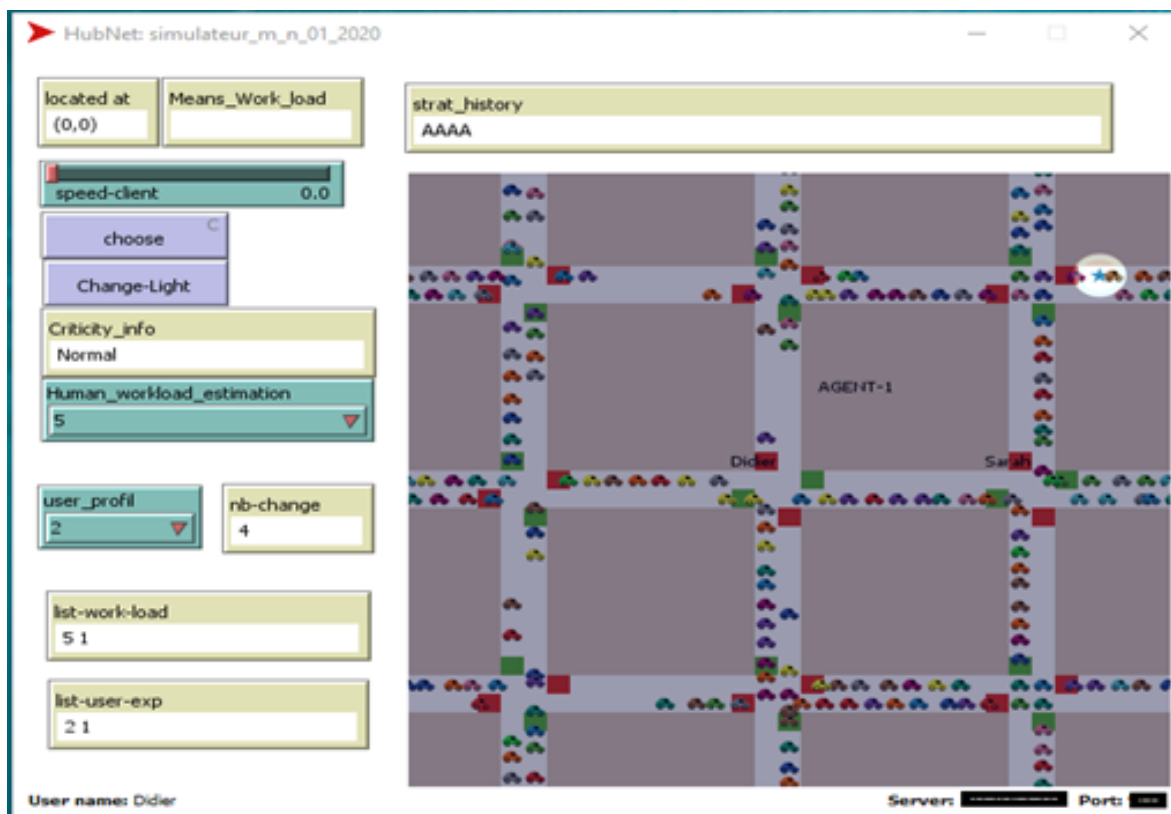


FIGURE 6.9 – Interface Client du participant P2

6.3.2 Résultats de l'étude de faisabilité avec 1 agent et 1 humain puis 2 humains

Une première étude de faisabilité (décrite dans la section 6.1) a permis d'obtenir un ensemble de résultats prometteurs. Ceux-ci permettent de mettre en évidence l'impact de décisions prises par les joueurs sur le comportement global du trafic, à savoir en termes de vitesse moyenne du trafic, du nombre de véhicules en attente, de l'évolution du temps d'attente moyenne des véhicules. Le simulateur du trafic proposé dans ce second cas contenait 200 véhicules pour donner un sens à la coopération entre les êtres humains et l'assistant dans le cadre du contrôle du trafic à l'aide des feux de trafic. Chaque participant a utilisé le simulateur Netlogo durant environ 1h30. Cette période inclut un ensemble d'exécutions

du simulateur, entrecoupées de courtes pauses (pour se rapprocher de conditions de travail dans une salle de contrôle [Ivergard & Hunt, 2009]). Pour cette étude de faisabilité, une exécution dure 180s pour un nombre d'itérations égal à 60, pour obtenir les résultats suivants : la vitesse moyenne, le nombre de véhicules en attente et le temps d'attente des véhicules pour les deux cas :

- (1) un être humain et un agent assistant,
- (2) deux êtres humains et un assistant.

Les courbes ci-après montrent des séquences d'utilisation de 60 cycles uniquement (pour une bonne lisibilité des courbes présentées dans un but représentatif, relativement à cette seconde étude de faisabilité). Ces séquences surviennent après environ une heure d'utilisation ; chaque participant a eu ainsi la possibilité de maîtriser les commandes de l'interface utilisateur.

6.3.3 Résultats numériques

La Figure 6.10 montre les vitesses moyennes des véhicules calculées à chaque cycle dans la simulation. Au début de la simulation, tous les véhicules se déplacent avec une vitesse initiale aléatoire, et on obtient un pic pour la vitesse moyenne ; après, vue la densité du trafic, on observera une baisse de la vitesse moyenne car certains véhicules doivent s'arrêter ou ralentir en fonction de la situation du véhicule en amont : présence d'un feu de trafic de couleur rouge ou attente d'un véhicule qui traverse prioritairement l'intersection.

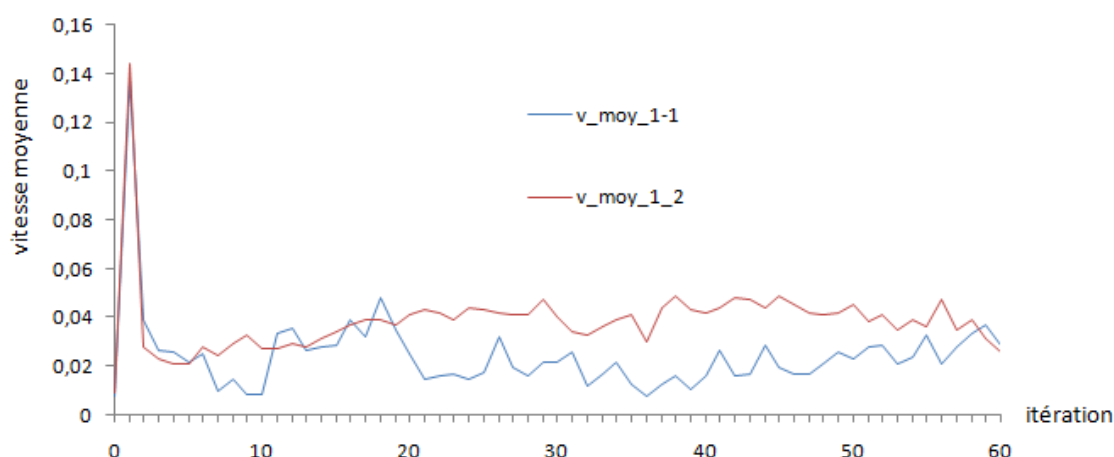


FIGURE 6.10 – Vitesse moyenne des véhicules

Dans la Figure 6.10, $v_moy_1_1$ désigne l'évolution de la vitesse moyenne des véhicules dans le cas d'un être humain (P1) et un agent assistant ; $v_moy_1_2$ concerne le cas : deux êtres humains (P2 et P3) et un assistant. Pour les deux cas de simulation

cités ci-dessus, la Figure 6.11 montre l'évolution du nombre total de véhicules stoppés durant chacun des cycles. Après le lancement de la simulation, presque tous les véhicules se déplacent avec des vitesses initiales, ce qui justifie la valeur basse de ce nombre au démarrage.

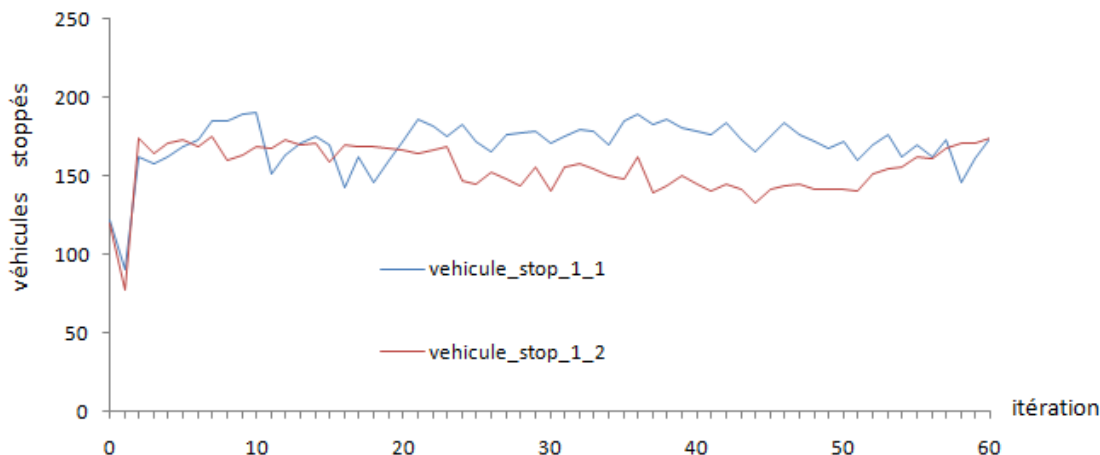


FIGURE 6.11 – Nombre de véhicules stoppés

Dans la Figure 6.11, `vehicule_stop_1_1` désigne le nombre de véhicules stoppés dans le cas d'un être humain et un agent assistant ; `vehicule_stop_1_2` désigne le cas impliquant deux humains et un agent assistant.

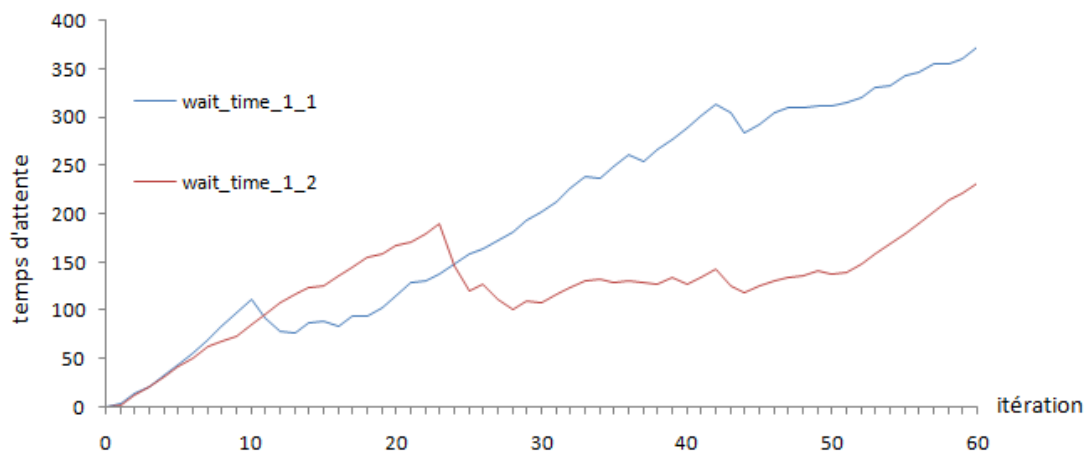


FIGURE 6.12 – Temps d'attente moyenne des véhicules

La Figure 6.12 montre ainsi le cumul des temps d'attente des véhicules durant les 60 cycles. Dans la Figure 6.12, `wait_time_1_1` montre l'évolution du temps d'attente pour les véhicules à chaque itération (cas impliquant un être humain et un agent assistant) ; `wait_time_1_2` désigne le cas impliquant deux êtres humains et un assistant.

Concernant les nombres d'interventions (exprimé par exemple par le nombre de changements des couleurs au niveau des feux de trafic), la Figure 6.13 montre l'évolution du

nombre d'interventions des êtres humains (dans les deux cas traités).

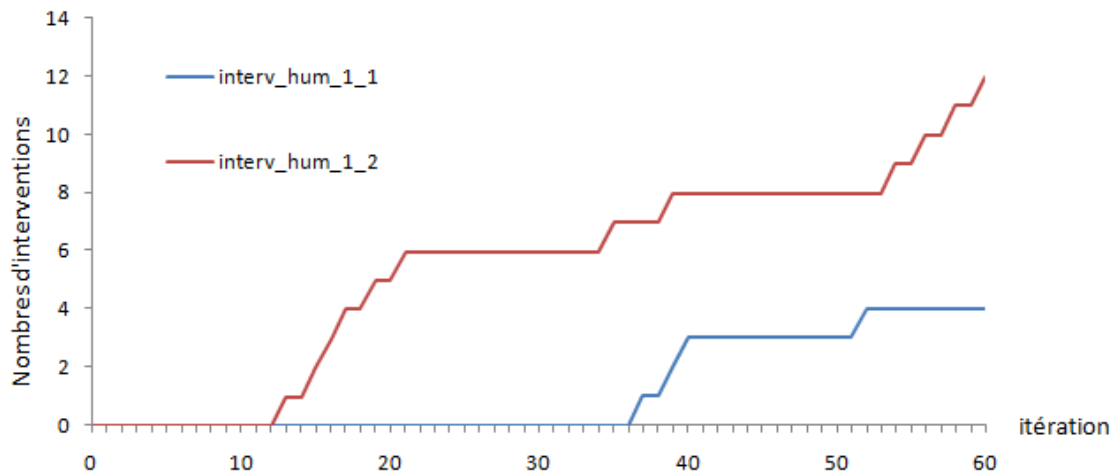


FIGURE 6.13 – Interventions des humains

La Figure 6.14 montre l'évolution du nombre d'interventions de l'agent assistant.

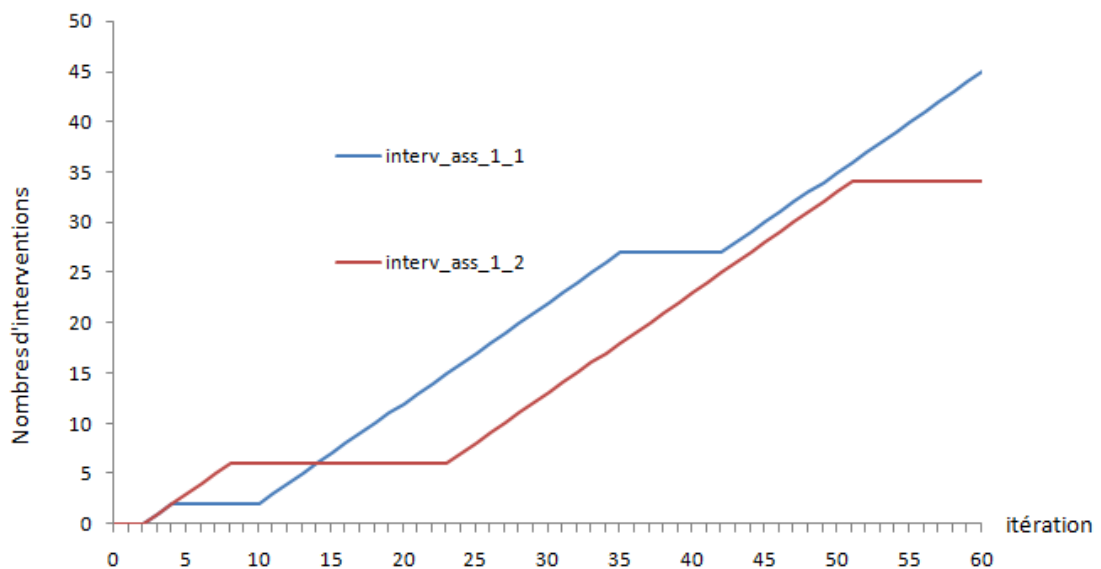


FIGURE 6.14 – Interventions de l'agent assistant

6.3.4 Résultats qualitatifs

6.3.4.1 Réponse des participants à un questionnaire

Les trois participants ont répondu au questionnaire après l'exécution de la tâche de contrôle (durant 60 itérations) assistée par l'agent. En termes d'évaluation, chacun des participants répond à plusieurs questions portant successivement sur l'utilisabilité [Nielsen, 1993] du simulateur proposé, l'efficacité de l'agent assistant pour l'aide, et l'avis sur

le mode d'assistance. Chaque réponse est mesurée à l'aide de l'échelle de Likert à 5 valeurs [Likert, 1932] (Cf. Annexe 8 pour les détails). Les valeurs vont de Pas du tout d'accord à Entièrement d'accord.

Ce questionnaire est disponible en annexe 3.

Les premiers résultats concernant les avis des participants sont visibles dans le Tableau 6.1. Ils montrent une première tendance positive, qui est prometteuse dans le cadre de cette première étude de faisabilité. Il s'agira de les confirmer dans le cadre d'autres études impliquant plus de participants (voir à ce sujet l'étude en section 6.3).

TABLEAU 6.1 – Opinions des participants

Participant	Utilisabilité du simulateur	Efficacité de l'assistance	Avis sur l'agent Assistant
Participant P1 : Cas un être humain assisté par un agent	5	4	4
Participant P2 : Cas deux êtres humains assisté par un agent	5	4	4
Participant P3 : Cas deux êtres humains assisté par un agent	4	4	3

Plusieurs premières impressions des participants sont visibles ci-dessous (verbatim issus des questionnaires remplis par les trois participants) :

“Je pense que c'est un bon simulateur de trafic. En termes de performance, j'ai vu que l'assistant offre une aide efficace sur le contrôle et la détection des intersections qui présentent beaucoup de véhicules en attente d'y entrer. C'est vraiment un assistant coopératif en gestion de trafic routier” (Participant P1).

“J'ai trouvé que le simulateur est facile à manipuler. Concernant l'assistance, j'ai constaté que l'assistant agit avec efficacité sur les intersections les plus surchargées en cas de nécessité. J'ai l'impression qu'il peut déterminer rapidement le nombre des véhicules stoppés à l'entrée des intersections à prioriser et agir sur les feux de trafic” (Participant P2).

“Je pense que le simulateur permet d'avoir certaines idées sur le trafic routier. Je l'impression que l'assistant agit comme il le faut lorsque mon niveau de charge de travail est élevé. Néanmoins, il a une limite dans certains cas intermédiaires où il n'intervient

pas, même lorsque ma charge est élevée et que l'autre personne ne l'est pas" (Participant P3).

La discussion se focalise sur deux points.

6.3.4.2 Cas d'un assistant avec deux êtres humains : équilibre contenant son intervention

L'équilibre propose une intervention pour l'assistant à chaque itération. Dans le cas où l'agent assistant prend en charge le contrôle de tous les carrefours, les résultats obtenus montrent une certaine efficacité dans le cadre de la gestion des carrefours, notamment au niveau de la vitesse moyenne du trafic (Figure 6.10), ainsi que relativement au nombre des véhicules stoppés (Figure 6.11). A chaque itération, l'assistant est donc obligé d'agir car l'équilibre lui permet d'intervenir. Pour cela, il va considérer successivement durant le même cycle, dans sa zone d'occupation, le nombre de véhicules stoppés pour chacune des intersections suivant l'ordre décroissant : l'assistant doit s'occuper tout d'abord de l'intersection ou des intersections présentant le maximum de véhicules stoppés. Ainsi, le nombre d'interventions coïncide avec le nombre d'itérations (rappelons qu'on a considéré un nombre d'itérations égal à 60).

6.3.4.3 Concernant l'agent assistant : équilibres avec intervention ou non de l'assistant

L'étude de faisabilité nous montre l'interaction entre un agent assistant et un puis deux opérateurs humains dans le contrôle du trafic. Ici l'assistant considéré utilise le principe de l'équilibre de Nash [Nash, 1950] pour la prise de décision sur l'ensemble des intersections (y compris les intersections occupées par les opérateurs humains). Des séquences de simulation sur 60 cycles ont été réalisées, plusieurs d'entre elles ayant été illustrées pour montrer la faisabilité de l'approche. Une telle durée de séquence permet d'illustrer différentes interventions de l'agent assistant, du ou des humains impliqués, et des conséquences des interventions sur le trafic. Ainsi, dans les séquences sélectionnées et illustrées plus haut, l'assistant intervient à partir de l'itération 10 - 35 (pour le cas : un humain et un assistant), et 25 - 50 (pour le cas : deux humains et un assistant) (Figure 6.14).

On constate une stabilité au niveau de la vitesse moyenne du trafic (Figure 6.10). Entre les itérations 35 - 40 (pour le cas : un humain et un assistant) et 50 - 60 (pour le cas : deux humains et un assistant) durant lesquelles l'assistant a calculé l'équilibre : les êtres humains ont un niveau de charge de travail bas et un niveau d'expérience élevé, l'assistant n'agit pas (vu l'équilibre) en espérant que les êtres humains ont la possibilité d'agir (Figure 6.10, Figure 6.11, Figure 6.13, Figure 6.14). Dans cette période, l'assistant

n'intervient pas et on observe une diminution au niveau de la vitesse moyenne malgré l'effort des êtres humains (Figure 6.13).

Toujours en considérant l'équilibre, une optimisation du trafic est observée aussi si les êtres humains ont un niveau de charge élevé avec un niveau d'expertise un peu plus bas : d'où l'importance de l'intervention de l'assistant.

6.4 Cas de deux êtres humains assistés par deux agents

6.4.1 Protocole expérimental

Les participants à cette troisième étude sont répartis aléatoirement. Ils sont caractérisés par les valeurs de leur profil : âge, sexe, niveau d'étude et niveau d'expérience de la simulation de trafic. Le remplissage des questionnaires avant l'expérimentation débouche sur les données visibles dans le tableau 6.2. Pour la simulation participative, 10 étudiants ont été recrutés. Ceux-ci proviennent de différentes filières et niveaux (cf. Tableau 6.2). Toutefois, les participants doivent satisfaire certains critères pour mener à bien l'expérience [Razakatiana et al., 2020a]; en général, ils ont tous une bonne capacité visuelle, motrice et ne sont pas sujets à des vertiges. On a formé cinq groupes de deux personnes car notre étude de cas porte sur l'interaction entre deux personnes et deux agents assistants. Pour les cinq groupes représentés ici, il y a au total sept hommes et trois femmes. L'âge des participants varie de 21 ans à 28 ans. L'âge moyen de tous les participants tourne autour de 23 ans.

TABLEAU 6.2 – Éléments caractéristiques des participants aux expérimentations

Participant	Age	Gaucher-Droitier	Niveau d'étude	Niveau d'expérience	Sexe	Groupe
P1	23	G	L1	1	F	G1
P2	21	D	L2	1	M	G1
P3	21	D	L2	1	M	G2
P4	21	D	L2	2	M	G2
P5	26	G	L3	1	F	G3
P6	22	D	L3	1	M	G3
P7	25	D	L3	2	F	G4
P8	24	G	L2	1	M	G4
P9	24	D	L2	1	M	G5
P10	28	D	M1	1	M	G5

Dans ce tableau 6.2, on voit que le niveau d'étude va de Licence 1 (L1) à Master 1 (M1). Le niveau d'expérience en matière de simulation est de 1 (niveau considéré comme

débutant) ou 2 (niveau considéré comme intermédiaire, pour les participants ayant déjà eu l'occasion d'utiliser un simulateur développé à l'aide de Netlogo). Ensuite, G signifie que le participant(e) est gaucher(re), D s'il ou elle est droitier(re), F pour les participants féminines et M pour les participants masculins.

Il est important de noter que le niveau d'expérience de tous les participants peut évoluer en fonction de la fréquence d'utilisation du simulateur. La section suivante explique les résultats obtenus pour les cinq groupes de participants à l'étude de cas du trafic. La figure 6.15 montre le protocole d'expérimentation.

Tout comme le protocole utilisé dans le cas de deux êtres humains et un agent assistant (section 6.2), il y a 5 étapes. La première étape consiste à poser quelques questions permettant de connaître les caractéristiques des participants. Ceci est suivi d'une courte démonstration de l'utilisation de Netlogo. Après la prise en main de l'utilisation de Netlogo en trafic, on explique aux participants le fonctionnement des agents assistants dans le cas de notre simulateur. Après avoir découvert Netlogo et le fonctionnement du simulateur ainsi que l'interaction avec les agents assistants, chacun des groupes de deux participants se lance dans l'expérimentation. Enfin, après l'expérimentation, on demande les avis des participants vis-à-vis de l'expérimentation effectuée (voir en annexe 3 le questionnaire à remplir).

1. Réponse à un questionnaire (âge, sexe, capacité visuelle, gaucher/droitier, niveau d'étude, niveau de connaissance du trafic routier, connaissance de l'utilisation de Netlogo comme simulateur de trafic).
2. Démonstration de la mise en œuvre de Netlogo pour la simulation de trafic (véhicules, feux de trafic) et démonstration de l'utilisation de l'interface utilisateur du *client hubnet* (choix du niveau d'expérience, estimation de la charge de travail, autres commandes utiles au contrôle du trafic).
3. Explication sur l'existence de deux agents assistants et leurs principes d'intervention ; description de l'objectif de la coopération humains-agents vis-à-vis du trafic.
4. Lancement de la simulation dans un projecteur ; chaque participant du groupe choisi d'abord sa zones d'occupation. Après le clic sur le bouton « go », Ils essaient d'obtenir la meilleure fluidité possible du trafic de ses propres zones d'occupation sur son propre écran.
5. Réponse à un questionnaire après l'expérience (utilisabilité, efficacité de l'assistance, avis sur celle-ci).

FIGURE 6.15 – Protocole inspiré de [Razakatiana et al., 2020a]

En termes d'architecture, le diagramme visible en Figure 6.16 montre les différents types d'acteurs : deux opérateurs humains, simulant un contrôleur de trafic routier et un système multi-agent composé de plusieurs agents. Notons qu'il y a aussi un observateur externe (évaluateur) qui n'est pas présenté dans la Figure 6.16.

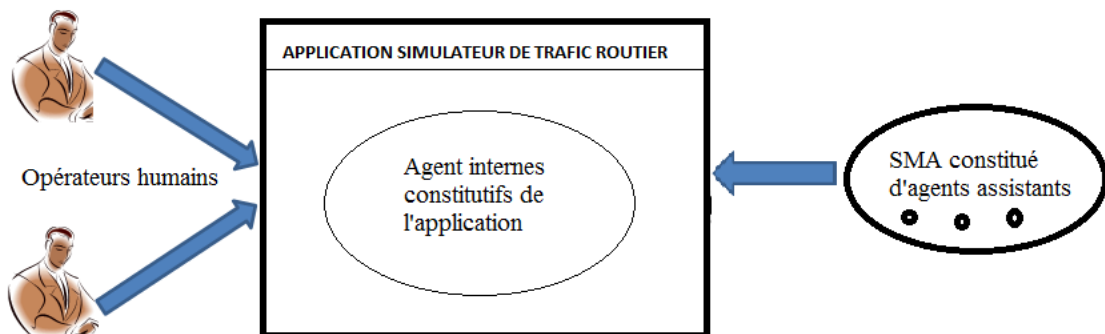


FIGURE 6.16 – Architecture de l'application

6.4.2 Résultats de l'étude de faisabilité avec 2 agents et 2 humains

Sur un réseau routier à deux voies, nous avons démarré avec 200 véhicules qui peuvent circuler librement, tout en étant aléatoirement repartis pour chaque portion de route de l'espace 2D. Initialement au repos, les véhicules se déplacent d'un axe en traversant les carrefours. Chacun des véhicules doit respecter une distance d'écart inter-véhicules de 0.5 patch (au sens des grilles d'espaces de Netlogo) et a l'obligation de s'arrêter s'il se trouve derrière un véhicule arrêté ou bien devant un feu de couleur rouge à l'entrée d'un carrefour. Par contre, un véhicule peut avancer s'il croise un feu de couleur verte tout en évitant toujours le contact qui peut provoquer un accident (distance de sécurité < 0.5 patches). L'environnement contient 9 carrefours qui possèdent chacun 4 feux de circulation à l'entrée. Le contrôle du trafic a pour objectif d'obtenir une valeur maximale de la vitesse moyenne du trafic à travers les feux de chacune des intersections. Un autre objectif est de minimiser aussi les temps d'attente moyenne des véhicules et le nombre des véhicules stoppés à chaque cycle d'observation. Chacun des opérateurs humains est désigné comme responsable au niveau d'une région du trafic en gérant les feux de trafic correspondant. Chaque agent assistant peut intervenir à n'importe quel carrefour du réseau routier en se préoccupant tout d'abord de sa zone d'occupation en agissant sur les feux de trafic. Les agents ont pour rôle d'aider les opérateurs humains pour cette tâche de contrôle du trafic en s'occupant parallèlement d'autres tâches que nous ne précisons pas ici pour le moment. Dans cette étude de cas impliquant deux êtres humains et deux agents assistants, les intersections sont divisées en deux sous-ensembles d'intersections disponibles pour la gestion des feux de carrefours.

De plus, en cas de besoin (lié à un éventuel scénario de test), on peut supprimer l'assistant en le repérant par son numéro (1 à nb assistants) affiché dans le simulateur, d'une manière dynamique (c'est-à-dire au cours de l'exécution de la simulation). Comme nous sommes dans le cas d'un système ouvert, les agents assistants et les êtres humains qui sont chargés de la supervision du trafic peuvent quitter le système à n'importe quel moment de la simulation. En termes de théorie des jeux, l'ensemble des choix possibles de chacun des joueurs est fixé. Ainsi, chacun des profils stratégiques du jeu est associé à une valeur de gain pour chacun des participants au jeu (ici les êtres humains et les agents logiciels). Ces résultats, calculés à chaque itération du jeu peuvent être représentés sous forme d'un tableau. A ce sujet, le tableau 6.3 montre un exemple de matrice de jeu enregistrée pour une itération donnée dans le cas du jeu impliquant deux opérateurs humains H1 et H2 et deux agents assistants A1 et A2.

TABLEAU 6.3 – Exemple de matrice de jeu impliquant deux êtres humains et deux agents assistants

A1	A2	H1	H2	Profil stratégique
-1	0	0	-1	CDCC
2	2	4	4	CCCC
0	0	0	-4	DDDC
-1	-1	4	-2	CCCD
-1	-1	-2	-4	CCDC
-4	-4	-2	-2	CCDD
-1	0	-1	0	CDDC
0	-1	0	-1	DCCD
2	2	0	0	DCCC
2	2	4	4	DDCC
2	2	-4	-4	DDCD
-4	-2	-1	-1	CDDD
0	-1	-1	-0	DCDC
-2	-2	0	0	DDDD
2	2	0	0	CDCC
-2	-4	-1	-1	DCDD

6.4.3 Le serveur Hubnet

Le serveur Hubnet permet une simulation participative dans laquelle les clients connectés peuvent participer d'une manière coopérative à la gestion des feux de trafic afin d'obtenir la meilleure fluidité possible. Pour simplifier, nous avons considéré seulement l'intervention sur les feux de trafic bien que les opérateurs humains peuvent agir sur d'autres composants de l'interface client. Les figures 6.17, 6.18 et 6.19 montrent des pages écrans du cas impliquant deux assistants et deux êtres humains (Les deux participants P1 et P2 considérés comme des opérateurs humains chargés du contrôle du trafic à travers les feux de circulation) connectés via le client Hubnet.

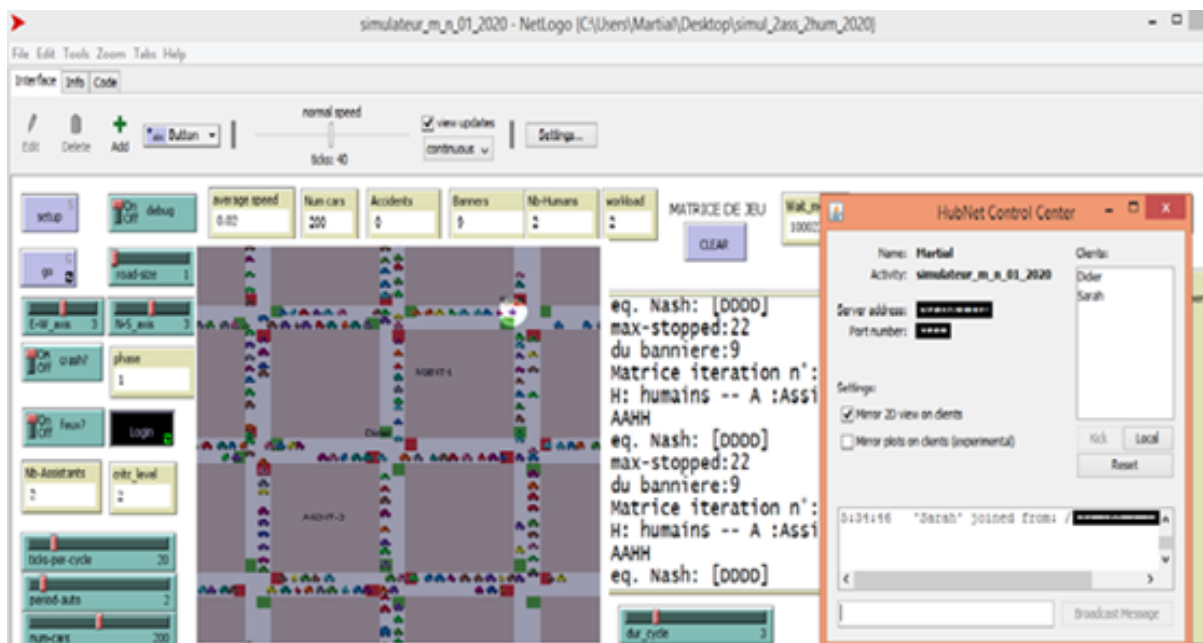


FIGURE 6.17 – Le serveur Hubnet du simulateur, dans le cas de cette troisième étude

La page-écran du serveur du simulateur, visible en Figure 6.17, contient quatre parties (de gauche à droite) :

- La partie gauche contient tous les éléments permettant l'initialisation de l'environnement du simulateur, tel que le choix des dimensions des routes (nombre de voies, nombre des axes,...).
- La partie suivante contient la vue du trafic (les véhicules et les routes) et une zone qui montre l'évolution de l'équilibre de Nash.
- La dernière partie est une fenêtre *Hubnet control center* contenant la liste des clients connectés, l'adresse IP du serveur et le numéro du port utilisé (cachés pour des raisons de sécurité).

Sur la partie vue de cette page-écran, AGENT-1 et AGENT-2 sont les agents assistants créés par l'observateur dans le but d'aider les opérateurs humains pour le contrôle des feux de trafic. Chacun des deux opérateurs humains notés respectivement P1 et P2 sont connectés au simulateur de trafic proposé grâce à l'interface client Hubnet. La connexion leur permet de participer à la simulation participative.

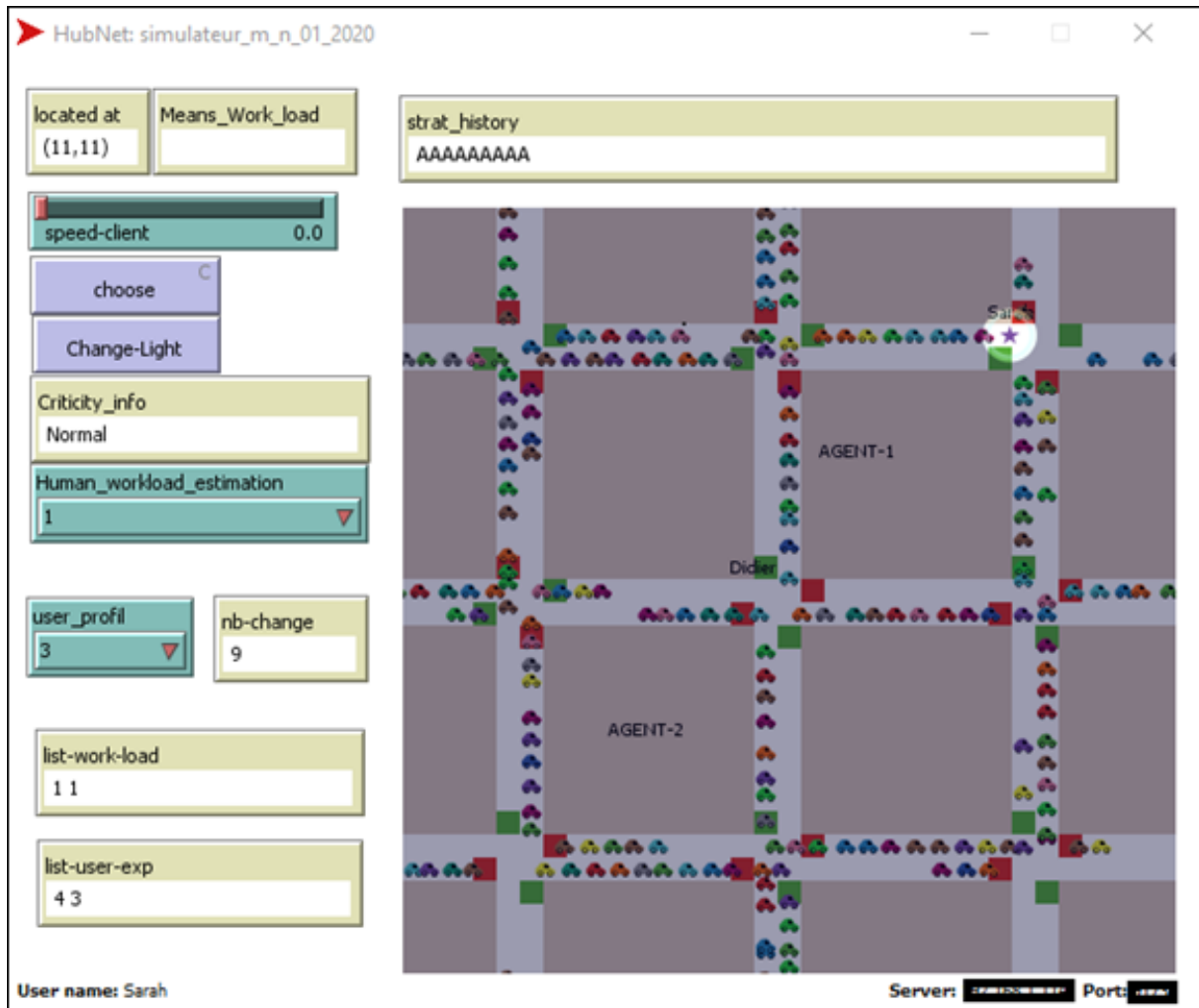


FIGURE 6.18 – Client hubnet utilisé par le participant P1 (appartenant au groupe 1)

Dans la copie d'écran visible en Figure 6.18, la partie gauche de l'écran contient deux types de composant :

- les composants permettant au client Hubnet d'agir sur le trafic : changer l'intersection d'intervention, modifier la vitesse maximale (dans ce cas, seul le dernier changement effectué par un client est prise en compte) ;
- les composants qui permettent à un opérateur humain de simuler l'estimation du niveau de sa propre charge de travail et de son niveau d'expérience ;
- les composants qui permettent de voir certaines informations, telles que la liste des informations portant sur les opérateurs humains, le nombre d'interventions effectuées par chacun des opérateurs humains, le niveau de criticité du trafic.

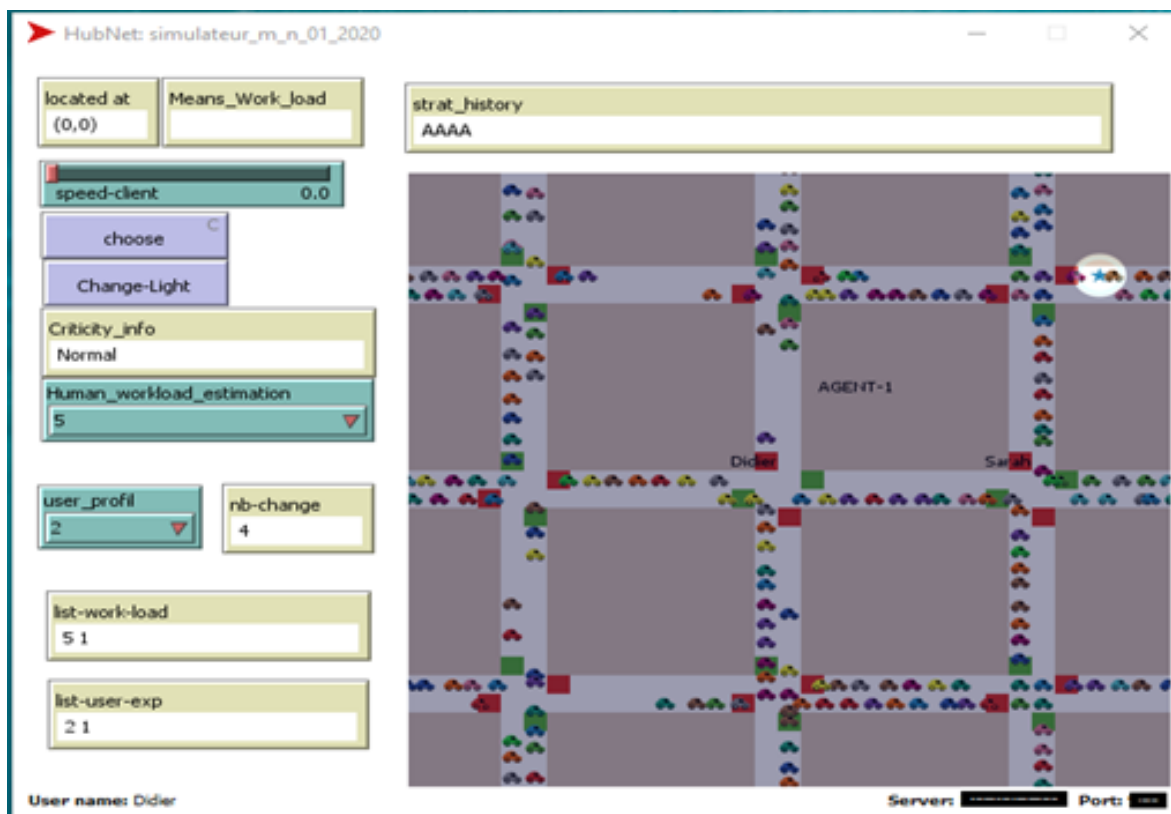


FIGURE 6.19 – Client hubnet utilisé par le participant P2 (appartenant au groupe 1)

6.4.4 L'interface client Hubnet

Grâce à l'interface du client Hubnet, chacun des opérateurs humains connectés au serveur du simulateur a le choix de prendre l'initiative sur une intersection qu'il peut choisir et changer les feux de trafics correspondants ou attendre l'aide des assistants mis en place pour les aider à contrôler les feux de l'ensemble du trafic. Chacun des clients connectés peut consulter aussi les informations concernant le niveau de charge de travail des autres opérateurs ainsi que leur niveau d'expérience, pour aider sa décision à travers l'interface client hubnet. Par exemple, en Figure 6.18, l'utilisateur en question (P2) peut constater que le niveau de charge de travail de l'autre humain est égal à 1 et que son niveau d'expérience est égal à 4. Tous les deux ont un même niveau de charge de travail égal à 1 et le niveau d'expérience de l'utilisateur P2 est égal à 3. En plus, chaque opérateur humain peut contrôler la vitesse maximale des véhicules ; il peut choisir l'intersection sur les feux de laquelle il peut intervenir. Considérons le cas où plusieurs agents assistants peuvent aider les êtres humains connectés dans le cadre de la supervision du trafic. Pour cela, il est possible d'avoir plusieurs intersections sur lesquelles les agents et les êtres humains peuvent effectuer les changements des feux dans le but commun d'obtenir une fluidité maximale du trafic.

6.4.5 Résultats numériques

Dans la figure 6.20, interv_ass_Gi ($i= 1$ à 5) désigne l'évolution du nombre total d'interventions des deux agents assistants pendant la participation du groupe i en fonction de l'équilibre de chaque itération.

Si l'équilibre contient son intervention (représenté ici par la lettre C), il intervient ; sinon, il laisse le soin aux opérateurs humains de travailler seuls (de manière autonome). Dans ce cas, il devient disponible pour pouvoir s'occuper d'autres tâches. Les résultats obtenus par chacun des groupes montrent bien que les interventions des agents assistants utilisant la théorie des jeux à travers l'équilibre de Nash restent efficaces. Ainsi, la coopération avec les êtres humains augmente l'efficacité du trafic en termes de vitesse moyenne des véhicules et de temps d'attente cumulés, comme par exemple dans le cas du groupe 4.

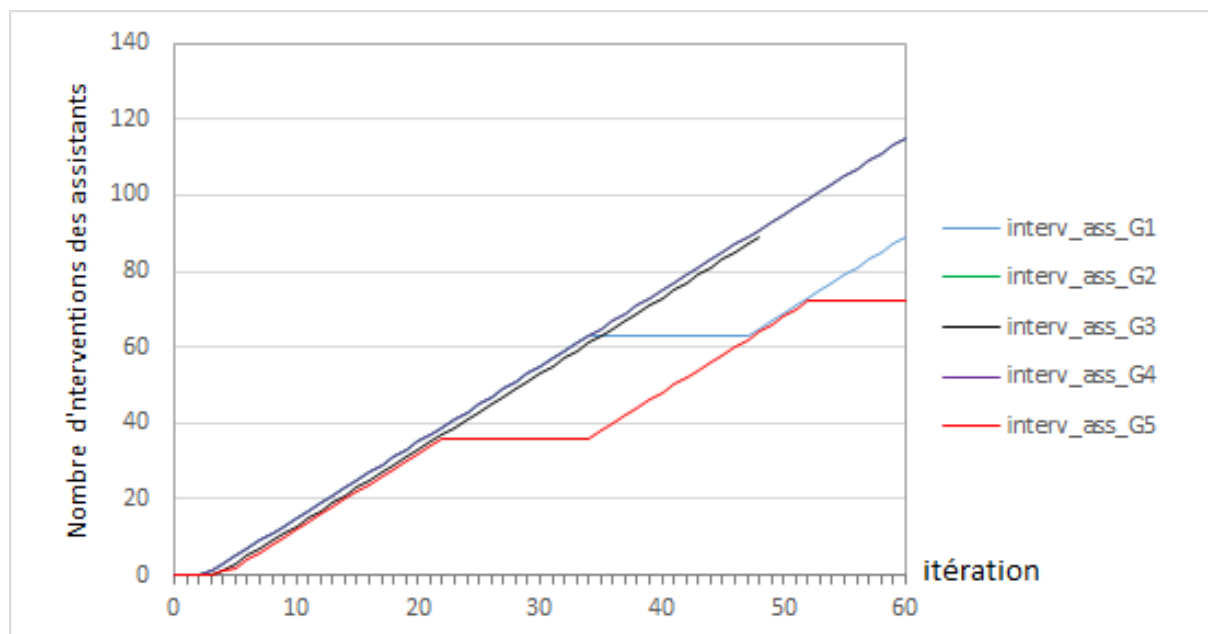


FIGURE 6.20 – Intervention des assistants pour cinq groupes

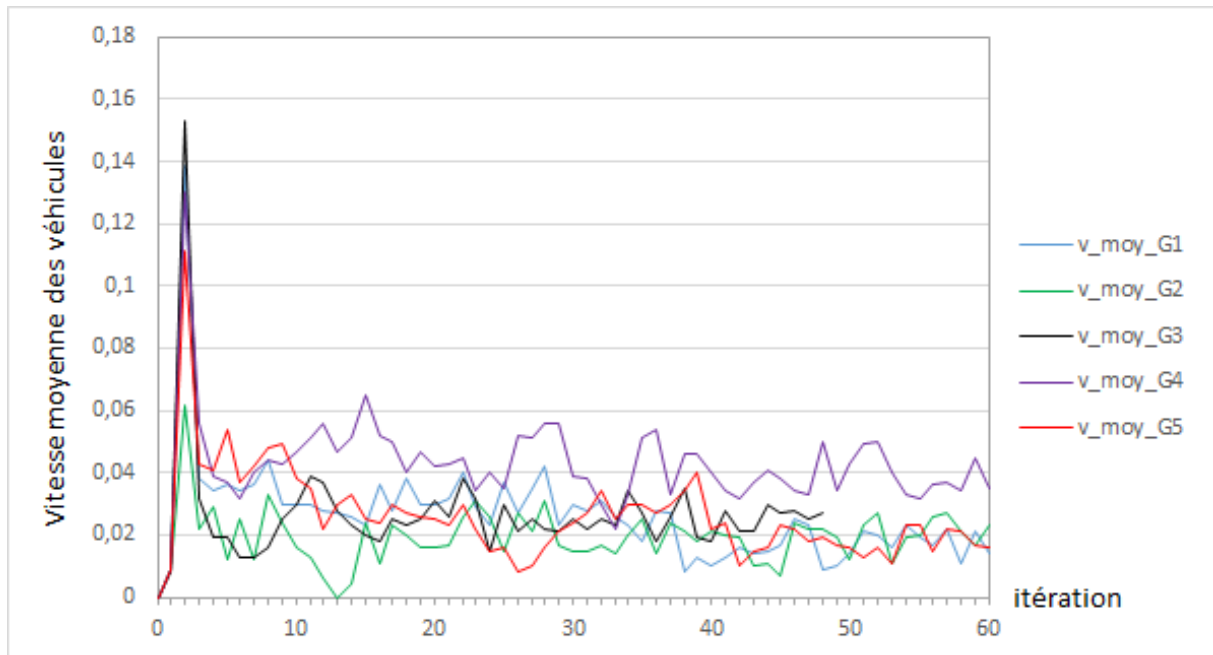


FIGURE 6.21 – Évolution de la vitesse moyenne des véhicules

Dans la figure 6.21, v_moy_Gi ($i= 1$ à 5) désigne l'évolution à chaque itération de la valeur numérique de la vitesse moyenne des véhicules durant la participation du groupe i .

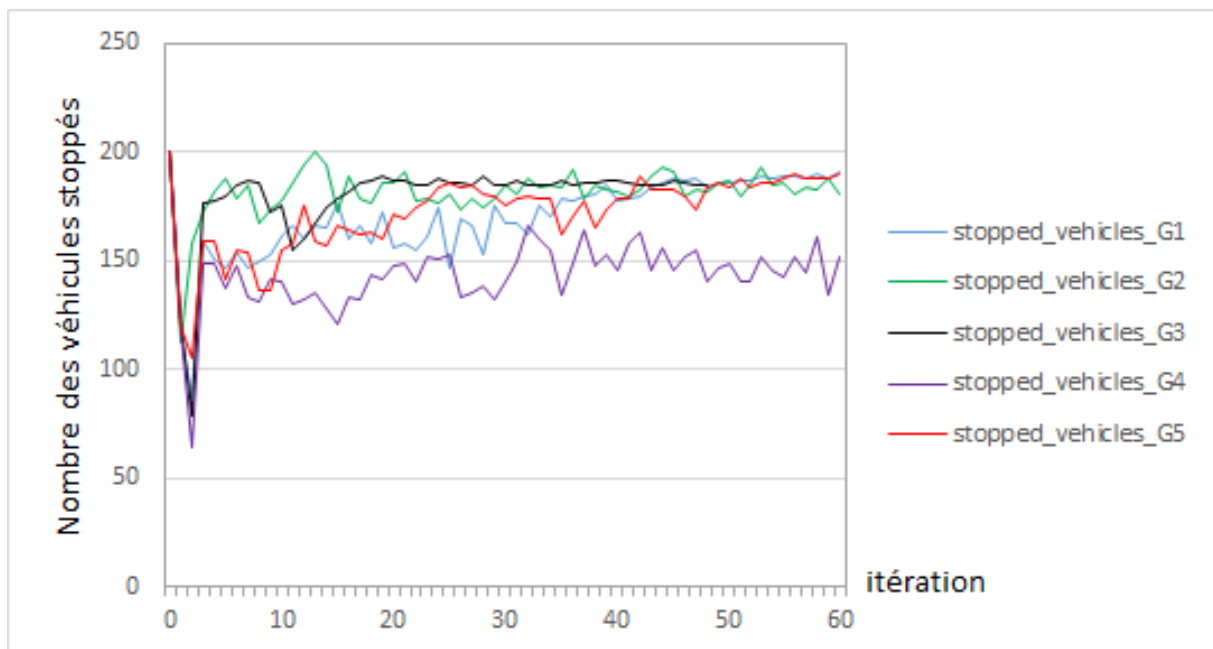


FIGURE 6.22 – Nombre des véhicules stoppés

Dans la figure 6.22, $stopped_vehicule_Gi$ ($i= 1$ à 5) désigne l'évolution à chaque itération du nombre total des véhicules stoppés durant la participation du groupe i .

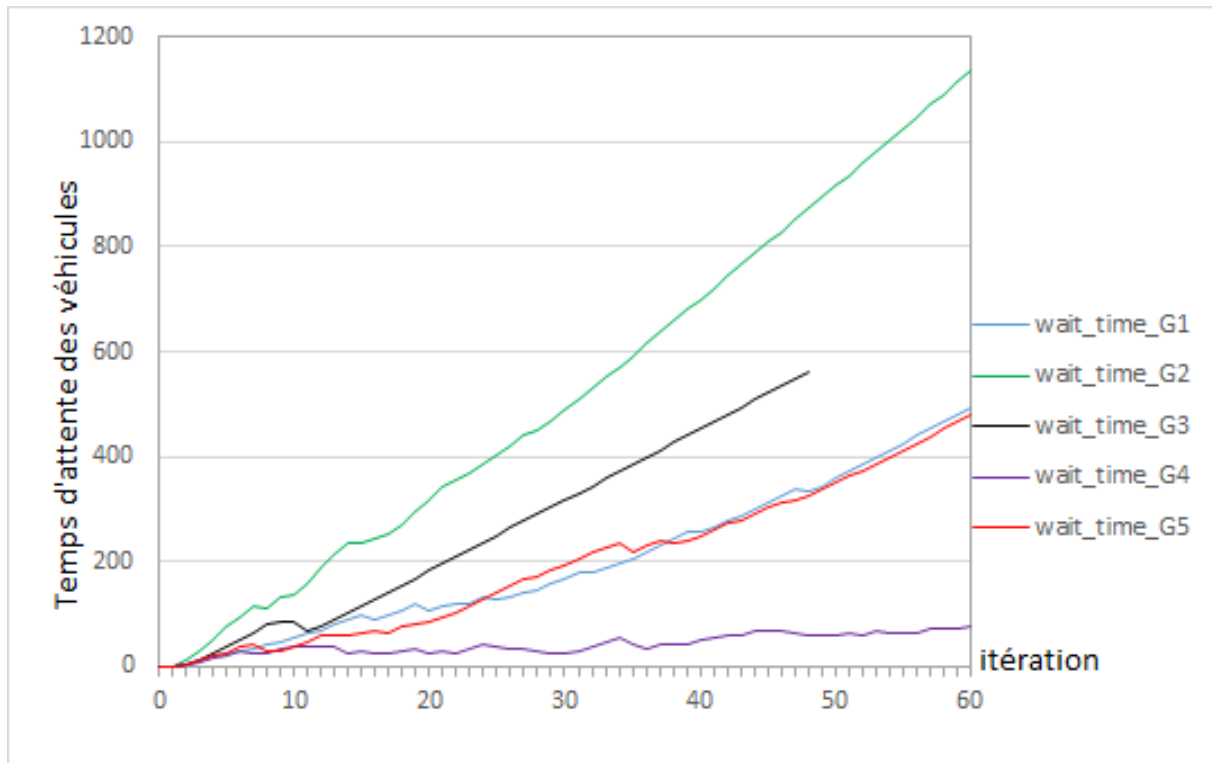


FIGURE 6.23 – Temps d'attente des véhicules

Dans la figure 6.23, $wait_time_G_i$ ($i= 1$ à 5) désigne l'évolution à chaque itération du cumul du temps d'attente des véhicules stoppés durant la participation du groupe i .

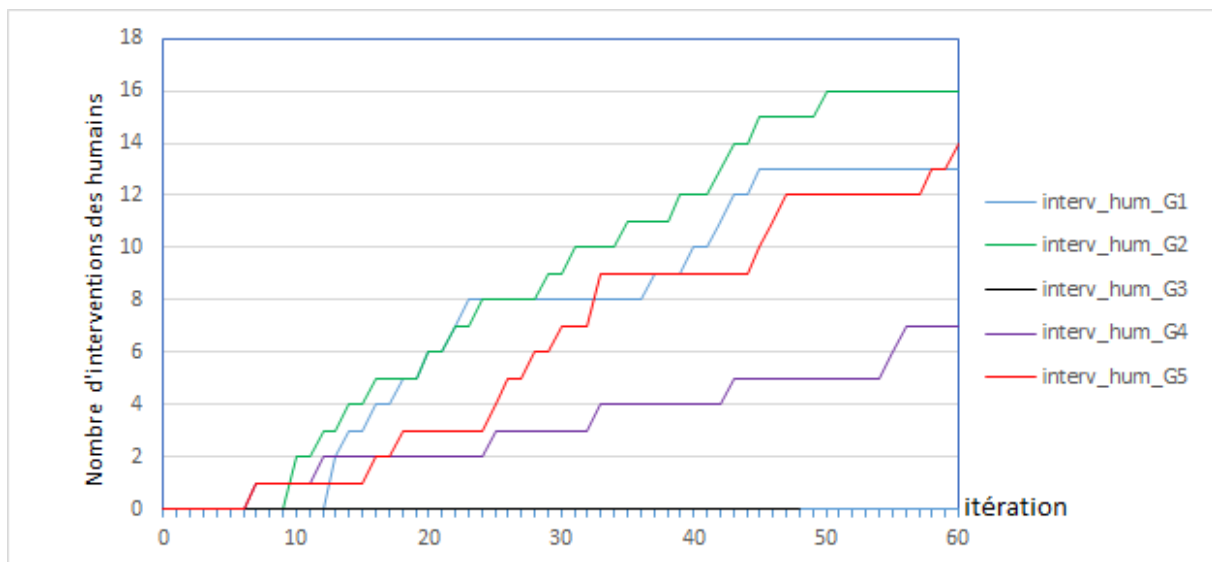


FIGURE 6.24 – Intervention des deux opérateurs humains

Dans la figure 6.24, $interv_hum_G_i$ ($i= 1$ à 5) désigne l'évolution du nombre total d'interventions des deux opérateurs humains pendant la participation du groupe i . Les opérateurs humains impliqués interviennent en fonction de leur habileté, leur niveau d'expérience et leur jugement.

6.4.6 Études utilisateurs

Après l'expérimentation, comme l'indique le protocole adopté, un questionnaire (disponible en annexe 3) est rempli par chaque participant. Le tableau 6.4 résume les réponses de tous les participants à celui-ci.

TABLEAU 6.4 – Résultats qualitatifs et opinion des participants

Participant	Performance	Utilisabilité	Avis sur les assistants	Verbatims
P1	5	4	4	“Personnellement, je n'avais pas de difficulté sur l'utilisation du simulateur. Tout s'est bien passé avec la coopération vis-à-vis de ma zone d'occupation, je suis satisfaite de l'intervention des agents assistants”.
P2	5	4	4	“Le simulateur est facile à utiliser, avec la coopération au niveau du contrôle des feux de trafic. De plus les agents assistants sont intervenus pertinemment au bon moment”.
P3	5	4	4	“A mon avis, je suis satisfait au niveau de la participation sur le contrôle du trafic. L'intervention des agents assistants correspond bien au niveau des profils et de la charge de travail choisie”.
P4	5	4	4	“L'interface utilisateur est facile à utiliser. Pourtant je n'ai pas le temps d'utiliser le contrôle de limitation de vitesse. Pour les assistants, j'ai constaté qu'ils sont intervenus d'une manière performante sans prendre beaucoup de temps”.

P5	5	4	4	“Malgré le fait que nous n’avons pas pu terminer l’expérience normalement, je pense que c’était un bon simulateur de trafic. En termes de contrôle de ma zone d’occupation, je ne suis pas très satisfait de la performance des agents assistants”.
P6	5	4	4	“Le simulateur nous a donné une opportunité de tester notre capacité en termes de coopération avec quelqu’un. Avec les agents assistants, nous voulons encore beaucoup plus de temps pour connaître un peu plus la performance des assistants”.
P7	5	4	4	“J’étais surpris de la capacité des agents assistants en termes de contrôle des feux lorsque nous avons simulé le cas d’un utilisateur débutant. Pas de difficulté sur l’utilisation du simulateur. Avec très peu de travail, j’ai constaté que nous avons obtenu la fluidité maximale au niveau du trafic grâce aux interventions pertinentes des agents assistants”.
P8	5	4	4	“Le simulateur de trafic est facile à utiliser. J’ai constaté que la coopération avec les agents assistants est la meilleure façon d’obtenir la fluidité maximale dans le contrôle des feux de trafic”.

P9	5	4	4	“L’utilisation du simulateur n’a posé aucun problème. Pourtant je n’ai pas bien compris le principe de l’intervention des assistants. Il y avait un moment où j’attendais en vain son intervention. Le plus souvent, je suis dans l’obligation d’intervenir”.
P10	5	4	4	“Au début de l’expérience, j’étais à l’aise pendant l’utilisation du simulateur. Pourtant je ne suis pas très satisfait de l’assistance des agents assistants en termes de gestion des feux de trafic. Je m’attendais à des agents beaucoup plus pertinents pour réduire mon travail”.

Il est très important de noter que le niveau d’expérience de tous les participants peut évoluer en fonction de la fréquence d’utilisation du simulateur. La section suivante explique les résultats obtenus pour les cinq groupes de participants à l’étude de cas du trafic.

6.4.7 Analyse des résultats

Suite aux expériences réalisées, les résultats montrent la faisabilité du modèle d’interaction entre humains et agents utilisant la théorie des jeux. En effet, nous allons analyser groupe par groupe ces résultats vis-à-vis du contrôle du trafic routier à travers les feux de signalisation (notons que deux couleurs seulement, le rouge et le vert, ont été utilisés pour cette simulation ; le jaune n’a pas été utilisé dans le but de simplifier : (1) l’expérimentation pour les participants, (2) la simulation de l’intervention des agents assistants).

Ce cas nous montre aussi l’interaction entre deux agents assistants et deux opérateurs humains dans le contrôle du trafic. Ici, chacun des agents assistants impliqués dans le jeu cherche l’équilibre de Nash pour la prise de décision sur l’ensemble des intersections (y compris les intersections occupées par les opérateurs humains). On a exécuté la simulation avec un nombre d’itérations égal à 60 pour avoir une marge de choix pour les deux êtres humains.

Commençons par les résultats obtenus par les participants du groupe G1. Au départ, comme tous autres groupes, on observe sur la figure 6.10 un pic, pour tous les groupes, au niveau de la vitesse moyenne qui correspond au démarrage de tous les véhicules. Avant l'itération 14, nous avons constaté aussi une situation encore stable du trafic. Entre les itérations 14 et 21 durant lesquelles les assistants ont toujours considéré l'équilibre de Nash, on peut constater que les assistants n'interviennent pas. Durant cette période, les êtres humains ont tous un niveau de charge de travail inférieur et avec un niveau d'expertise élevé. Ceci explique la non intervention des agents assistants qui considèrent que les êtres humains ont la possibilité d'agir et ne doivent pas solliciter l'intervention des assistants. Dans ce cas, si les opérateurs humains n'interviennent pas, le ralentissement du trafic est constaté par la diminution de la vitesse moyenne des véhicules. A partir de l'itération n°21, on constate une stabilité au niveau de la vitesse moyenne du trafic. Toujours en considérant l'équilibre, une optimisation du trafic est observée aussi si les êtres humains ont un niveau de charge élevé avec un niveau d'expertise un peu plus bas : d'où l'importance de l'intervention des deux assistants qui mettent en priorité à leurs tour les intersections les plus chargées.

Les résultats du groupe G2 sont intéressants. En effet il est important de noter que malgré l'inter-blocage total du trafic survenu plus précisément à l'itération 14, ils ont réussi à relancer le trafic grâce à la coopération avec les agents assistants. En ce qui concerne le groupe G3, il s'agit de noter qu'il n'a pas été possible de terminer les 60 itérations. Ce groupe a arrêté la simulation à la 48ème itération à cause d'une panne au niveau du réseau local pendant l'expérience. Malgré cette interruption, ce groupe a réussi à stabiliser le trafic en termes de vitesse moyenne.

Pour le groupe G4, on constate une performance supérieure à tous les autres groupes. En effet, avec un même nombre de véhicules, ce groupe a obtenu la vitesse moyenne maximale, le temps d'attente minimal et un nombre de véhicules stoppés plus réduit. Cette performance est constatée pendant presque l'ensemble des itérations enregistrées (60 itérations). Comme nous l'avons constaté dans les figures 6.20, 6.22, 6.23, 6.24 et 6.21, la réussite du groupe est réalisée grâce à l'intervention systématique de deux agents assistants avec très peu d'interventions des deux participants. Enfin, quant aux résultats obtenus par le groupe 5, on voit que la vitesse moyenne du trafic reflète bien la logique de l'intervention ou non des deux agents assistants. En effet, les deux opérateurs humains ont choisi d'intervenir entre les cycles 25 et 32. On constate ainsi une légère stabilité au niveau de la situation du trafic durant cette période dans laquelle les deux agents assistants n'interviennent pas. Entre les cycles 33 et 40, où les humains n'interviennent pas, les deux agents ont réussi à maintenir la situation du trafic.

Ainsi, les résultats obtenus par chacun des groupes nous montrent que les interventions des agents assistants utilisant la théorie des jeux à travers le calcul de l'équilibre de Nash restent efficaces. La coopération avec les êtres humains augmente l'efficacité en termes de vitesse moyenne du trafic comme le montrent par exemple les résultats obtenus par le groupe 4.

6.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter les trois études réalisées, avec description du protocole et des résultats obtenus pour chacune. Dans la première étude, nous avons obtenu des résultats issus d'une première exécution de notre simulateur impliquant un être humain et un agent logiciel. Rappelons que dans cette première étude, on a considéré un trafic comportant 84 véhicules et 4 carrefours. Dans ce cas, les résultats obtenus montrent la faisabilité et l'efficacité de l'agent assistant lors de son intervention durant quelques itérations. Notons que durant cette première étude, l'opérateur humain a décidé de ne pas intervenir, en se basant sur son propre jugement vis-à-vis de la situation du trafic et de son habileté.

Dans le cadre de la deuxième étude, nous avons utilisé la même application (simulateur identique) mais cette fois-ci avec l'augmentation du nombre de véhicules (qui passe de 84 à 200) et un nombre de carrefours égal à 9. Pour cela, trois personnes ont participé au contrôle du trafic toujours à travers les feux de trafic. Dans cette deuxième étude, on a d'abord essayé de faire participer un être humain et un agent logiciel, puis deux êtres humains et un agent logiciel. Les résultats montrent bien qu'avec la participation de deux êtres humains, on améliore la situation du trafic par rapport au cas d'un seul participant humain. Ainsi, cette étude de faisabilité nous permet aussi de constater que la coopération entre les participants humains (entre eux) et aussi avec l'agent logiciel reste efficace en termes de contrôle du trafic. Toutefois, on constate aussi la limite de la méthode par la recherche de l'équilibre de Nash sur certains cas intermédiaires car nous avons choisi la non-intervention de l'agent logiciel dans le cas où l'on ne trouve pas l'équilibre.

Dans le cadre de la troisième étude, en bénéficiant de la participation de dix étudiants répartis en cinq groupes de deux, nous avons pu enregistrer et analyser les résultats. Les participants sont des étudiants de niveau L1 à M1. En matière d'étude du simulateur de contrôle du trafic avec 200 véhicules et 9 carrefours, cette étude nous a permis de montrer l'efficacité de la coopération entre les êtres humains et les agents logiciels, dans la configuration testée. En effet, on a constaté généralement une situation stable du trafic lorsque les assistants et les agents coopèrent ; rappelons que l'étude du cas avec le contrôle

du trafic impliquant seulement un être humain et un assistant montre bien l'efficacité de l'agent assistant qui agit en fonction de l'équilibre. Les résultats montrent bien la faisabilité de l'approche utilisant la théorie des jeux dans le cadre de l'interaction entre des êtres humains et des agents logiciels impliqués dans la tâche du contrôle coopératif du trafic routier. Pour notre cas, ces acteurs se contentent tous simplement d'agir sur les feux situés à chaque intersection. Cependant, nous avons constaté une dégradation occasionnelle du trafic ou d'une partie du trafic à cause de la non-intervention de certains agents logiciels alors que l'être humain concerné ne maîtrise pas la situation. Ceci résulte du fait que ces agents n'interviennent pas car il n'y a pas d'équilibre ou que l'équilibre trouvé ne contient aucune coopération pour certaines itérations. Nous insistons sur le fait que malgré la dégradation de la situation du trafic, les gains des agents assistants leur permettront de s'occuper d'une autre tâche (non particulièrement spécifiée dans le cadre de cette thèse, les possibilités à ce sujet étant nombreuses, par exemple : gérer un autre secteur critique, ou ouvrir un passage pour un véhicule prioritaire). Ce qui montre, encore une fois, l'avantage du modèle d'interaction humain-machine utilisant la théorie des jeux dans une tâche complexe, dans notre cas la supervision du trafic.

Chapitre 7

Conclusions et Perspectives

7.1 Conclusion

Dans cette thèse, nous avons eu pour objectif de proposer un modèle d'interaction humain-machine en utilisant la théorie des jeux, tout en ayant une visée d'étude de faisabilité de l'approche, dans le domaine de la supervision de trafic routier. Pour cela, dans le chapitre 1, nous avons présenté tout d'abord une étude bibliographique sur l'interaction humain-machine intelligente. Dans ce chapitre, la notion d'interface humain-machine intelligente a été introduite. Elle fait appel à plusieurs catégories ou variantes : il est possible de citer notamment les interfaces humain-machine adaptatives, de même que les interfaces tolérantes aux erreurs humaines, ces dernières étant moins courantes. Ces approches ont fait l'objet de différentes illustrations. Ensuite, la notion de système sensible au contexte, qui s'appuie souvent sur le triplet $\langle \text{utilisateur}, \text{plateforme}, \text{environnement} \rangle$ a été introduite. Ces catégories ou variantes nous ont permis de parcourir différentes facettes de la notion d'interface intelligente, se situant dans un cadre plus général d'interaction humain-machine (remplaçant désormais la dénomination interaction homme-machine qui avait été longtemps utilisée, cf. <https://afihm.org/>). Sans souci d'exhaustivité, mais plutôt de représentativité, un ensemble d'approches contribuant aux interactions intelligentes ont été synthétisées dans un tableau récapitulatif en fin de chapitre, donnant un aperçu de la variété des approches dans ce domaine vaste.

Dans le chapitre 2, nous nous sommes focalisés sur l'interaction humain-agent. Des notions de base sur les agents puis sur les systèmes multi-agents ont été rappelées dans le but d'approfondir leurs implications dans le cadre de l'étude de l'interaction humain-machine intelligente. En ce qui concerne les systèmes multi-agents, nous avons abordé aussi la notion de coordination entre agents. Pour illustrer l'importance de l'étude du système multi-agent en rapport avec notre objectif dans le cadre de la modélisation de l'interac-

tion humain-machine intelligente, nous avons mentionné quelques domaines d'application. Dans ce même chapitre, nous avons présenté aussi quelques approches d'interaction humain-agent, pour ensuite mettre en avant des études des cas portant sur le trafic routier, qui nous intéresse particulièrement dans le cadre de cette thèse. Un élément important dans l'étude bibliographique effectuée est, en liaison directe avec notre proposition, la théorie des jeux. Cet outil mathématique a été présenté dans le chapitre 3, sans entrer dans les détails. Nous nous sommes intéressés aux notions générales : les joueurs, les actions, les fonctions d'utilité. La notion d'équilibre de Nash a été expliquée aussi dans ce chapitre, car élément essentiel de la solution que nous proposons dans la partie contribution. A ce sujet, nous nous sommes intéressés à la notion de jeu sous forme normale, en introduisant la notion d'un jeu répété qui correspond à notre principale contribution dans cette thèse. À titre d'information et d'illustration, le choix a été de citer quelques applications intéressantes s'appuyant sur la théorie des jeux, en dehors d'applications en économie (qui étaient les premières à l'époque). Les applications citées concernent notamment le domaine de l'intelligence artificielle et d'autres domaines en informatique en rapport avec notre objectif : l'utilisation de la théorie des jeux comme support pour l'interaction humain-machine.

Pour ce qui est de la contribution conceptuelle de la thèse, décrite dans le chapitre 4, la théorie des jeux a été utilisée en vue de la modélisation de l'interaction humain-machine intelligente, en particulier l'interaction humain-agent. Cette théorie permet de contribuer à la satisfaction des opérateurs humains, en les apportant des aides dans la réalisation de la tâche, selon plusieurs caractéristiques du contexte. Ce modèle permet aussi d'étudier les gains des agents assistants, qui pourront être exploités pour les rendre disponibles pour d'autres tâches pratiques (s'ils n'interviennent pas pour aider les opérateurs humains). En vue d'une généralisation, nous avons démarré avec un modèle impliquant un opérateur humain et un agent assistant dans le cadre d'une interaction humain-agent. Ceci nous a permis de commencer la formalisation d'un modèle d'interaction humain-agent fondé sur la théorie des jeux. Nous avons étendu cette première proposition pour aller vers celle d'un modèle d'interaction impliquant plusieurs utilisateurs et un agent assistant. La faisabilité de ces deux modèles à travers une étude de cas (décrite dans les chapitres suivants) nous a permis de généraliser l'approche pour l'interaction. Ce modèle d'interaction permet d'impliquer un système multi-agent d'assistance et plusieurs opérateurs humains. Le modèle utilise un jeu répété à plusieurs joueurs, où plusieurs agents assistants et êtres humains interagissent dans un environnement donné, supposé ouvert.

Suite à la présentation de la proposition du modèle utilisant la théorie des jeux, nous avons montré dans le chapitre 5 la faisabilité de l'approche à travers la simulation avec

une plate-forme multi-agent, appelée Netlogo. Cette simulation considère le contrôle d'un trafic routier par les feux de trafic installés à chacune des intersections. Dans un premier temps, nous avons simulé le cas d'un être humain assisté par un agent logiciel avec un trafic contenant 84 véhicules qui tourne en boucle à travers quatre carrefours. Pour cette première étude de faisabilité, nous avons simulé seulement le cas où l'être humain n'intervient pas (c'est l'agent assistant qui gère le trafic). Ensuite, on a simulé le cas où deux êtres humains prennent en charge le contrôle du trafic avec l'assistance d'un agent assistant qui entre en interaction avec eux. Dans ce deuxième cas, nous avons augmenté le nombre de véhicules à 200 avec un trafic contenant 8 carrefours. Cette fois, il y avait une interaction entre les participants humains utilisant l'interface client hubnet et l'agent assistant. Le dernier cas mis en œuvre nous a permis de réaliser la simulation du contrôle du trafic précédent avec deux êtres humains assistés par deux agents logiciels. Chacun des deux humains utilisaient simultanément le client hubnet pour pouvoir contrôler d'une manière coopérative le trafic tout en considérant le travail de deux agents logiciels.

Dans le cadre des études effectuées, les résultats obtenus, décrits dans le chapitre 6, concernant le contrôle du trafic à travers la simulation, nous semblent prometteurs. Ainsi pour la première étude avec un seul humain et un agent assistant, nous avons constaté que l'intervention de l'agent assistant rend le trafic stable (au sens des caractéristiques étudiées, par exemple la vitesse moyenne des véhicules). Notons que cette intervention qui consiste à rechercher le carrefour dans lequel le trafic n'évolue plus, puis d'effectuer un changement des couleurs des feux de trafic pour obtenir une meilleure fluidité du trafic. Nous avons noté globalement une amélioration de la vitesse moyenne du trafic et des temps d'attente des véhicules. Par la suite, la deuxième étude avec deux êtres humains et un agent assistant a également mis en évidence, que la coopération entre les êtres humains et les agents logiciels améliore la situation. Malgré la situation non souhaitable du trafic pendant une courte durée due au fait que l'agent n'intervient pas (car pas d'intervention trouvée dans l'équilibre de Nash), nous considérons le fait que l'agent a la possibilité de s'occuper d'une autre tâche (il est disponible pour celle-ci). Les résultats sur le trafic ainsi que les résultats des questionnaires des participants à l'étude sont satisfaisants. Le modèle d'interaction utilisant la théorie des jeux s'avère efficace dans des contextes où la coordination par communication ne peut pas être possible. Enfin, les résultats obtenus lors de la troisième étude montrent aussi la faisabilité de l'approche pour le modèle d'interaction proposé impliquant plusieurs humains et plusieurs agents logiciels.

En outre, la résolution du jeu proposé a été mise en œuvre pour la prise de décision dans un contexte d'assistance d'un ou plusieurs opérateurs humains. Les études de cas en simulation, portant sur la supervision de trafic, nous montre aussi l'efficacité du ou

des deux agents assistants même en absence du ou des opérateurs humains chargés de la supervision du trafic. Si le ou les assistants n'interviennent pas, une dégradation du trafic peut être constatée. Les premiers résultats prometteurs obtenus avec cinq groupes de deux opérateurs humains (dans la troisième étude), de même que la simplicité de l'approche, nous incitent à continuer l'approfondissement de l'utilisation de la théorie des jeux dans des cadres de résolution collective de tâche complexe. Un avantage de l'utilisation de la théorie des jeux se justifie par le fait, qu'en plus de la possibilité de concevoir un système adaptatif qui est sensible au contexte, on peut s'intéresser également à la disponibilité de l'agent pour s'occuper d'autres tâches, ce qui contribue à une optimisation des ressources.

7.2 Perspectives

Nous envisageons des perspectives à court, moyen et long termes. Concernant les perspectives à court terme, dans la formalisation du modèle, nous avons utilisé l'algorithme de recherche d'équilibre (Algorithme basé sur EMR pour Enumération des Meilleures Réponses [Hamila, 2012]) pour le cas d'un être humain et d'un agent intelligent puis une variante de celui-ci (en fait le même algorithme mais adapté pour le cas de n joueurs, avec $n > 2$) pour les cas où plusieurs agents interagissent avec plusieurs êtres humains. Nous souhaitons étudier la complexité de ces algorithmes car nous avons constaté que cela peut influencer sur le temps de recherche d'équilibre qui peut remettre en cause l'intervention de l'assistant. En plus, dans le cas de plusieurs équilibres trouvés, nous souhaitons également mettre en place un ensemble de critères permettant à chacun des agents assistants de choisir les meilleures actions possibles en réponse avec les choix des êtres humains. Par exemple, s'il y avait dans l'équilibre, l'intervention et la non intervention, l'agent pourrait comparer l'importance de l'intervention dans le cadre de l'assistance par rapport à une autre tâche de l'agent logiciel, afin de pouvoir décider. Dans ce cas il serait utile de mettre en place une autre étude (ou plusieurs) concernant une simulation participative avec la gestion de piétons et de véhicules prioritaires, ainsi que de véhicules de différents types (dont des véhicules autonomes), ainsi que des routes à plusieurs voies (dont certaines pourraient être dynamiques [Wang et al., 2016]).

A moyen terme, comme l'équilibre de Nash en stratégie pure n'existe pas toujours, nous envisageons d'exploiter l'autre possibilité d'utiliser la notion d'équilibre de Nash, par exemple l'équilibre de ε -Nash ou l'équilibre de Nash en stratégie mixte. En stratégie mixte, l'équilibre obtenu permet à l'agent assistant de prendre une bonne décision par rapport à la décision de l'être humain et aux descripteurs de contexte. Ceci est rendu possible grâce au théorème de Nash même si la formalisation utilise la notion de

probabilité sur les actions des participants au jeu considéré. Ceci explique que chacun des agents assistants aura la possibilité de décider intelligemment malgré la difficulté de trouver une solution. En termes de perspectives à long terme, nous souhaitons également considérer une extension de l'ensemble des actions possibles pour les participants aux jeux ; par exemple il serait possible d'ajouter une sollicitation directe d'un agent par un humain, et vice versa. Une autre perspective concerne la mise en place d'une métrique pour mesurer l'efficacité des agents assistants ainsi que le niveau de satisfaction des êtres humains en termes d'assistance. La sensibilité au contexte dans le cadre de l'interaction avec un système multi-agent adaptatif [Badeig et al., 2016] constituera aussi un autre défi en essayant d'introduire une capacité d'apprentissage pour tous les agents. Pour le cas de la supervision du trafic, une autre perspective de simulation consiste à enrichir les règles d'expertise des agents assistants pour qu'ils puissent prendre d'autres aspects du trafic dans le cadre de leurs interventions. Ils pourraient ainsi traiter d'autres informations du trafic (par exemple pour comptabiliser les piétons ou les accidents) et informer les responsables de l'infrastructure. Pour améliorer l'assistance, nous envisageons aussi la modélisation des agents pour qu'ils puissent prendre leurs décisions en considérant les stratégies de meilleures réponses en cas d'absence d'équilibre ; par exemple, l'agent pourrait intervenir volontairement en cas de présence d'une situation critique sans être sollicité par aucun opérateur humain (importance plus ou moins forte, éventuellement évolutive, accordée à certaines caractéristiques du contexte, par rapport aux autres).

En termes de perspectives à long terme, nous souhaitons également réaliser plusieurs études de cas notamment sur des nombreuses applications pouvant impliquer des êtres humains et des agents logiciels en interaction par exemple en simulant des tâches de contrôle du trafic aérien ou de gestion de trafic en général, par exemple de réseau(x) informatique(s) ou en lien avec la sécurité du réseau. Avec l'utilisation de la théorie de jeux comme base du modèle d'interaction, nous envisagerons d'implémenter des algorithmes fondés sur d'autres équilibres, tels que l'optimum de Pareto et le bien-être social [Arrow, 1950; Bergson, 1954]. Nous pouvons aussi envisager une combinaison de la théorie des jeux stochastiques et le MDP (voir [Hamila et al., 2012; Hamila, 2012]) dans le cadre de la modélisation de l'interaction entre humains et agents logiciels. On pourra envisager aussi l'exploitation d'un modèle de jeu pour être combiné avec le mécanisme de coordination (comme dans [Ductor, 2013]) entre les humains et les agents dans le problème d'allocation dynamique de ressources. Pour l'application, nous devons réfléchir à la faisabilité de l'approche dans le cadre de la réalisation de plusieurs simulateurs pour diverses applications complexes impliquant des humains et des agents assistants.

Références

- Abdulla, A. I., Abdulraheem, A. S., Salih, A. A., Sadeeq, M. A., Ahmed, A. J., Ferzor, B. M., Sardar, O. S. & Mohammed, S. I. (2020). Internet of things and smart home security. *Technol. Rep. Kansai Univ*, 62(5), 2465–2476
- Abowd, G. D., Dey, A. K., Brown, P. J., Davies, N., Smith, M. & Steggles, P. (1999). Towards a better understanding of context and context-awareness. In *Proceedings of International symposium on handheld and ubiquitous computing*, (pp. 304–307). Springer
- Agah, A. & Tanie, K. (2000). Intelligent graphical user interface design utilizing multiple fuzzy agents. *Interacting with Computers*, 12, 529–542
- Agotnes, T. & Bulling, N. (2014). Formal methods for coordination multi-agent systems. In *Report from Dagstuhl Seminar 14332 of Distributed Artificial Intelligence*, (pp. 21–44). Sydney, Australia
- Aknine, S., Pinson, S. & Shakun, M. F. (2004). An extended multi-agent negotiation protocol. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 8(1), 5–45
- Al-Sakran, H. O. (2015). Intelligent traffic information system based on integration of internet of things and agent technology. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 6(2), 37–43
- Alegre, U., Augusto, J. C. & Clark, T. (2016). Engineering context-aware systems and applications : A survey. *Journal of Systems and Software*, 117, 55–83
- Almejalli, K., Dahal, K. P. & Hossain, M. A. (2009). An intelligent multi-agent approach for road traffic management systems. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications, CCA 2009 and of the International Symposium on Intelligent Control, ISIC 2009, Saint Petersburg, Russia, July 8-10, 2009*, (pp. 825–830). IEEE

- Amalberti, R. & Deblon, F. (1992). Cognitive modelling of fighter aircraft process control : a step towards an intelligent on-board assistance system. *International Journal of Man-Machine Studies*, 36(5), 639–671
- Arlat, J., Crouzet, Y., Deswarte, Y., Fabre, J.-C., Laprie, J.-C. & Powell, D. (2006). Tolérance aux fautes. In J. Akoka & I. Comyn-Wattiau (Eds.), *Encyclopédie de l'informatique et des systèmes d'information. Les Editions Vuibert*, (pp. 240–270). Vuibert
- Arora, A., Fiorino, H., Pellier, D. & Pesty, S. (2018). Learning Robot Speech Models to Predict Speech Acts in HRI. *Paladyn Journal of Behav. Robotics*, 1(9), 295–306
- Arrow, K. J. (1950). A difficulty in the concept of social welfare. *Journal of political economy*, 58(4), 328–346
- Avizienis, A. (1967). Design of fault-tolerant computers. *Fall Joint Computer*, 31, 733–743
- Avizienis, A., Laprie, J.-C., Randell, B. & Landwehr, C. (2004). Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 1(1), 11–33
- Avouris, N. & Liedekerke, H. V. (1993). User interface design for cooperating agents in industrial process supervision and control applications. *International Journal of Man-Machine Studies*, 38, 873–890
- Azaria, A., Gal, Y., Kraus, S. & Goldman, C. V. (2015). Strategic advice provision in repeated human-agent interactions. *Autonomous Agent and Multiagent system*, 30(1), 4–29
- Baas, M., Bernonville, S., Bricon-Souf, N., Hassler, S., Kolski, C. & Boy, G. G. (2014). Towards a context model for human-centered design of contextual data entry systems in healthcare domain. In *Don Harris (Ed.), Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics - 11th International Conference, EPCE 2014, Held as Part of HCI International 2014*, (pp. 223–233)
- Badeig, F., Adam, E., Mandiau, R. & Garbay, C. (2016). Analyzing multi-agent approaches for the design of advanced interactive and collaborative systems. *Journal of ambient intelligence and smart environments*, 8(3), 325–346
- Balbo, F. & Mandiau, R. (2016). Numéro spécial systèmes de transport intelligents. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 30(3), 269–270

- Barange, M., Saunier, J. & Pauchet, A. (2017). Pedagogical agents as team members : Impact of proactive and pedagogical behavior on the user. In *Proceedings of the 16th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2017)*, (pp. 791–800)
- Baruah, S., Li, H. & Stougie, L. (2010). Towards the design of certifiable mixed-criticality systems. In *2010 16th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, (pp. 13–22). IEEE
- Basconcillo, K. A. C., Benitez, D. J. B., Cantuba, E. A. S., Enriquez, R. E. L., Falcon, C. R. I., Serrano, K. K. D., Guevara, E. C., dela Cruz, A. R. & Vicerra, R. R. P. (2017). Development of a vehicle and pedestrian simulation environment with M.I.S.O fuzzy logic controlled intelligent traffic light system. In *2017 5th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT7)*, (pp. 1–6). IEEE
- Bauer, C. & Dey, A. K. (2016). Considering context in the design of intelligent systems : Current practices and suggestions for improvement. *Journal of Systems and Software*, *112*, 26–47
- Beaudouin-Lafon, M. (2000). Instrumental interaction : an interaction model for designing post-WIMP user interfaces. In T. Turner & G. Szwillus (Eds.), *Proceedings of the CHI 2000 Conference on Human factors in computing systems, The Hague, The Netherlands, April 1-6, 2000*, (pp. 446–453). ACM
- Beer, M., d’Inverno, M., Luck, M., Jennings, N., Preist, C. & Schroeder, M. (1999). Negotiation in multi-agent systems. *The Knowledge Engineering Review*, *14*(3), 285–289
- Benazi, M. (2018). Négociation des offres dans les enchères par les systèmes multiagents. Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Setif (UFAS). Algerie
- Benhamza, K., Ellagoune, S., Seridi, H. & Akdag, H. (2010). Agent-based modeling for traffic simulation. In *International symposium on modeling and implementation of complex systems, MISC*, (pp. 219–227)
- Bergson, A. (1954). On the concept of social welfare. *The Quarterly Journal of Economics*, *68*(2), 233–252
- Betke, M. (2010). Intelligent interfaces to empower people with disabilities. In *Handbook of Ambient Intelligence and Smart Environments*, (pp. 409–432). Springer

- Bissoli, A., Lavino-Junior, D., Sime, M., Encarnaç o, L. & Bastos-Filho, T. (2019). A human-machine interface based on eye tracking for controlling and monitoring a smart home using the internet of things. *Sensors*, 19(4), 859
- Boy, G. & Gruber, T. (1990). Intelligent assistant systems : Support for integrated human-machine systems. In *Proceedings of 1990 AAAI Spring Symposium on Knowledge-Based Human-Computer Communication*, (pp. 1-8)
- Boy, G. A. (1987). Operator assistant systems. *International Journal of Man-Machine Studies*, 27(5-6), 541-554
- Boy, G. A. (1999). Human-computer interaction in aeronautics : a cognitive engineering perspective. *Air and Space Europe*, 1(1), 33-37
- Boy, G. A. (2017). Human-centered design of complex systems : An experience-based approach. *Design Science*, 3, 147-154
- Brainov, S. (1996). Altruistic cooperation between self-interested agents. In *12th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI'96)*, (pp. 519-523). Budapest, Hungary : John Wiley and Sons, Chichester
- Brown, P. J., Bovey, J. D. & Chen, X. (1997). Context-aware applications : from the laboratory to the marketplace. *IEEE personal communications*, 4(5), 58-64
- Brusilovski, P., Kobsa, A. & Nejdl, W. (2007). *The adaptive web : methods and strategies of web personalization*, vol. 4321. Springer Science & Business Media
- Br zillon, P. (2003). Focusing on context in human-centered computing. *IEEE Intelligent Systems*, 18(3), 62-66
- Buisan, G., Sarthou, G., Bit-Monnot, A., Clodic, A. & Alami, R. (2020). Efficient, situated and ontology based referring expression generation for human-robot collaboration. In *Proceedings of RO-MAN 2020*, (pp. 349-356)
- Burguillo-Rial, J. C., Rodriguez-Hernandez, P. S., Costa-Montenegro, E. & Gil-Casti eira, F. J. (2009). History-based self-organizing traffic lights. *Comput. Informatics*, 28(2), 157-168
- Calvary, G., Coutaz, J., Thevenin, D., Limbourg, Q., Bouillon, L. & Vanderdonckt, J. (2003). A unifying reference framework for multi-target user interfaces. *Interacting with computers*, 15(3), 289-308

- Calvary, G., Demeure, A., Coutaz, J. & Dâassi, O. (2004). Adaptation des interfaces homme-machine à leur contexte d'usage plasticité des IHM. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 18(4), 577–606
- Chaib-draa, B. (1996). Interaction between agents in routine, familiar and unfamiliar situations. *International Journal of Intelligent and Cooperative Information Systems*, 1(5), 7–20
- Chaib-draa, B., Moulin, B., Mandiau, R. & Millot, P. (1992). Trends in distributed artificial intelligence. *Artificial Intelligence Review*, 6, 35–66
- Chanas, S. & Zieliński, P. (2002). The computational complexity of the criticality problems in a network with interval activity times. *European Journal of Operational Research*, 136(3), 541–550
- Charles, J.-A., Chanel, C. P. C. & Chauffaut, C. (2018). Human-agent interaction model learning based on crowdsourcing. In *Proceedings of the 6th International Conference on Human-Agent Interaction, HAI '18, December 15–18*, (pp. 20–28)
- Chen, B. & Cheng, H. H. (2010). A review of the applications of agent technology in traffic and transportation systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 11(2), 485–497
- Chu, Y.-Y. & Rouse, W. B. (1979). Adaptive allocation of decisionmaking responsibility between human and computer in multitask situations. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(12), 769–778
- Cohen, P. R. & Levesque, H. J. (1990). Intention is choice with commitment. *Artificial intelligence*, 42(2-3), 213–261
- Cooper, G. E. & Harper, R. P. (1969). *Use of Pilot Rating in the Evaluation of Aircraft Handling Qualities*. NASA TN D-5153
- Correa, J. C. (2016). The behavioral interaction of road users in traffic : An example of the potential of intelligent agent-based simulations in psychology. *Revista Latinoamericana de Psicología*, 48(3), 201–208
- Coutaz, J. & Calvary, G. (2012). HCI and software engineering for user interface plasticity. *Human-Computer Interaction Handbook : Fundamentals, Evolving Technologies, and Emerging Applications* (third edition), CRC Press, (pp. 1195–1220). CRC Press

- Coutaz, J., Crowley, J. & Laugier, C. (1992). Intelligence artificielle et interfaces homme-machine. In *Actes des 4èmes journées sur l'intelligence artificielle, Marseille*, (pp. 169–186)
- Crespo, A. M. F., Weigang, L. & de Barros, A. G. (2000). Reinforcement learning agents to tactical air traffic flow management. *International Journal of Aviation Management*, 1(3), 145–161
- de Albuquerque Siebra, C. & Lino, N. C. Q. (2009). Aspects of planning support for human-agent coalitions. *Journal of the Brazilian Computer Society*, 15(4), 41–55
- Demazeau, Y. (1995). From interactions to collective behaviour in agent-based systems. In *Proceedings of the First European conference on cognitive science ECCS'95*, (pp. 117–132)
- Dey, A. K. (2001). Understanding and using context. *Journal of Personal and Ubiquitous Computing*, 5, 4–7
- Dieterich, H., Malinowski, U., Kühme, T. & Schneider-Hufschmidt, M. (1993). State of the art in adaptive user interfaces. *Human factors in information technology*, 10, 13–13
- Dondrup, C., Papaioannou, I. & Lemon, O. (2019). Petri net machines for human-agent interaction. *CoRR*, abs/1909.06174
- Dong, K., Qin, Z. & Wan, T. (2020). Many-to-one stable matching for prediction in social networks. In *Proceedings of the 33rd International Conference on Industrial, Engineering and other Application of Applied Intelligent System, IEA/AIE 2020*, (pp. 345–356). Springer, Cham
- Doniec, A., Mandiau, R., Piechowiak, S. & Espié, S. (2008a). A behavioral multi-agent model for road traffic simulation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(8), 1443–1454
- Doniec, A., Mandiau, R., Piechowiak, S. & Espié, S. (2008b). Controlling non-normative behaviors by anticipation for autonomous agents. *Web Intelligence and Agent Systems : An International Journal*, 6(1), 29–42
- Ductor, S. (2013). *Mécanismes de coordination pour l'allocation dynamique de ressources dans des systèmes multi-agents large-échelle et ouverts*. Ph.D. thesis, Paris 6
- DuFour, R. & DuFour, R. (2013). *Learning by doing : A handbook for professional learning communities at work TM*. Solution Tree Press

- Dujardin, T., Rouillard, J., Routier, J.-C., Tarby, J.-C. et al. (2011). Gestion intelligente d'un contexte domotique par un système multi-agents. *Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA)*, (pp. 137–146)
- Durfee, E. (1996). Planning in distributed artificial intelligence. In N. Jennings and G. O'Hare (eds.), *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, (pp. 209–248). Wiley
- Duric, Z., Gray, W. D., Heishman, R., Li, F., Rosenfeld, A., Schoelles, M. J., Schunn, C. & Wechsler, H. (2002). Integrating perceptual and cognitive modeling for adaptive and intelligent human-computer interaction. *Proceedings of the IEEE*, 90(7), 1272–1289
- Eckhoff, R. K. (2016). *Explosion Hazards in the Process Industries, Second Edition*. Gulf Professional Publishing
- Edmonds, E. A. (1981). *Adaptive Man-Computer Interfaces*. Academic Press London
- Eshel, Ilan & et al (1998). Altruists, egoists, and hooligans in a local interaction model. *The American Economic Review*, 88(1), 157–179
- Ezzedine, H., Kolski, C. & Péninou, A. (2005). Agent oriented design of human–computer interface. application to supervision of an urban transport network. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 18(3), 255–270
- Ezzedine, H., T., B., Kolski, C. & Tahon, C. (2008). Integration of traffic management and traveller information systems : basic principles and case study in intermodal transport system management. *International Journal of Computers, Communications and Control (IJCCC)*, 3, 281–294
- Farooqui, A. D. & Niazi, M. A. (2016). Game theory models for communication between agents : a review. *Complex Adapt. Syst. Model*, 4, 13
- Fasihfar, Z. & Rokhsati, H. (2017). Study of application of intelligent agents in e-learning systems. *Bulletin de la Societe Royale des Sciences de Liege*, 86, 398–405
- Fels, S. S. & Hinton, G. E. (1990). Building adaptive interfaces with neural networks : The glove-talk pilot study. In D. Diaper, D. J. Gilmore, G. Cockton & B. Shackel (Eds.), *Human-Computer Interaction, INTERACT'90, Proceedings of the IFIP TC13 Third International Conference on Human-Computer Interaction, Cambridge, UK, 27-31 August, 1990*, (pp. 683–688). North-Holland
- Ferber, J. (1995). *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*, vol. 322. InterEditions, Paris

- Ferber, J. (1999). *Multi-agent systems - An introduction to distributed artificial intelligence*. Addison-Wesley-Longman
- Fischer, G. (2001). User modeling in human–computer interaction. *User modeling and user-adapted interaction*, 11(1), 65–86
- Fishwick, P. A. et al. (1997). Computer simulation : growth through extension. *Transactions of the Society for Computer Simulation*, 14(1), 13–24
- Fujii, H., Uchida, H. & Yoshimura, S. (2017). Agent-based simulation framework for mixed traffic of cars, pedestrians and trams. *Transportation research part C : emerging technologies*, 85, 234–248
- Gale, D. & Shapley, L. S. (1962). College admissions and the stability of marriage. *The American Mathematical Monthly*, 69(1), 9–15
- Gardner, H. (2002). On the three faces of intelligence. *Daedalus*, 131(1), 139–142
- Gary, M. O. & Judith, S. O. (2012). *Collaboration Technologies*, (pp. 549–564). CRC Press
- Gelernter, D. & Carriero, N. (1992). Coordination languages and their significance. *Communications of the ACM*, 2(35), 96–107
- Giuffrida, T., Céret, É., Dupuy-Chessa, S. & Poli, J. (2019a). Fuzzy4u : un moteur d’adaptation en logique floue pour l’accessibilité des interfaces utilisateurs. *Journal d’Interaction Personne-Système*, 8(1), 27–59
- Giuffrida, T., Dupuy-Chessa, S., Poli, J. & Céret, É. (2019b). Fuzzy4u : A fuzzy logic system for user interfaces adaptation. In M. Kolp, J. Vanderdonckt, M. Snoeck & Y. Wautelet (Eds.), *13th International Conference on Research Challenges in Information Science, RCIS 2019, Brussels, Belgium, May 29-31, 2019*, (pp. 1–12). IEEE
- Glas, N. & Pelachaud, C. (2015). Definitions of engagement in human-agent interaction. In *2015 International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction, ACII 2015, Xi’an, China, September 21-24, 2015*, (pp. 944–949). IEEE Computer Society
- Glicksberg, I. L. (1952). A further generalization of the kakutani fixed point theorem, with application to nash equilibrium points. *Proceedings of the American Mathematical Society*, 3(1), 170–174

- Gonçalves, T. G., Kolski, C., de Oliveira, K. M., Travassos, G. H. & Grislin-Le Strugeon, E. (2019). A systematic literature review on intelligent user interfaces : preliminary results. In *Adjunct Proceedings of the 31st Conference on l'Interaction Homme-Machine : 30 ans d'interaction au sommet, IHM 2019, 10 au 13 décembre 2019, Grenoble, France*, (pp. 5 :1–5 :8). ACM
- Grislin, E., Adam, E. & Kolski, C. (2001). Agents intelligents en interaction homme-machine dans les systèmes d'information. In Kolski C. (Ed.), *Environnements évolués et évaluation de l'IHM. Interaction Homme-machine pour les SI*, vol. 2, (pp. 209–248). Hermès
- Grudin, J. (2009). AI and HCI : two fields divided by a common focus. *AI Magazine*, 30(4), 48–48
- Gullà, F., Ceccacci, S., Germani, M. & Cavalieri, L. (2015). Design adaptable and adaptive user interfaces : a method to manage the information. In *Ambient Assisted Living*, (pp. 47–58). Springer
- Guériau, M., Armetta, F., Hassas, S., Billot, R. & Faouzi, N.-E. E. (2016). A constructivist approach for a self-adaptive decision-making system : application to road traffic control. In *Proceeding of IEEE 28th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*, (pp. 670–677). IEEE
- Guériau, M., Billot, R., Armetta, F., Hassas, S. & Faouzi, N. E. (2015). Intelligence artificielle et interfaces homme-machine. In *23-ème Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA '15) (2015)*, Cépaduès, (pp. 165–174). IEEE
- Habieb-Mammar, H. & Tarpin-Bernard, F. (2004). CUMAPH : Cognitive user modeling for adaptive presentation of hyper-documents. an experimental study. In *International conference on adaptive hypermedia and adaptive web-based systems*, (pp. 136–145). Springer
- Hall-Ellis, S. D. & Grealy, D. S. (2013). The dreyfus model of skill acquisition : A career development framework for succession planning and management in academic libraries. *College & Research Libraries*, 74(6), 587–603
- Halpin, S. M. (1984). A proposal for an intelligent interface in man-machine systems. In *The 23rd IEEE Conference on Decision and Control*, (pp. 592–595). IEEE

- Hamila, M. A. (2012). Planification multi-agents dans un cadre markovien : les jeux stochastiques à somme générale. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, France
- Hamila, M. A., Le Strugeon, E., Mandiau, R. & Mouaddib, A.-I. (2012). Strategic dominance and dynamic programming for multi-agent planning - application to the multi-robot box-pushing problem. In *Proceedings of ICAART (2) 2012*, (pp. 91–97)
- Hammi, B., Khatoun, R., Zeadally, S., Fayad, A. & Khokhi, L. (2017). IoT technologies for Smart Cities. *IET Networks*, 7(1), 1–13
- Hancock, P. A. & Chignell, M. H. (1989). *Intelligent interfaces : theory, research and design*. Elsevier Science Inc
- Hariri, A., Lepreux, S., Tabary, D. & Kolski, C. (2009). Principes et étude de cas d'adaptation d'ihm dans les si en fonction du contexte d'interaction de l'utilisateur. *Ingénierie des Systèmes d'Information*, 14(3), 141–162
- Hariri, M. A. (2008). Contribution à une méthode de conception et génération d'interface homme-machine plastique. Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, France
- Hart, S. G. (2006). Task Load Index (NASA-TLX) 20 years later. In *Proceedings of In Human Factors and Ergonomics Society 50th Annual Meeting*, (pp. 904– 908). Santa Monica, CA : Human Factors and Ergonomics Society
- Hefley, W. (1990). Architecture for adaptable human-machine interface. In *Proceedings of The second International Conference on "Human aspects of advanced manufacturing and hybrid automation"*, (pp. 12–16). Honolulu, Hawaii, USA
- Hefley, W. E. & Murray, D. (1993). Intelligent user interfaces. In W. D. Gray, W. E. Hefley & D. Murray (Eds.), *Proceedings of the 1st International Workshop on Intelligent User Interfaces, IUI 1993, Orlando, Florida, USA, January 4-7, 1993*, (pp. 3–10). ACM
- Hewett, T. T., Baecker, R., Card, S., Carey, T., Gasen, J., Mantei, M., Perlman, G., Strong, G. & Verplank, W. (1992). *ACM SIGCHI curricula for human-computer interaction*. ACM
- Hirankitti, V. & Krohkaew, J. (2007). An agent approach for intelligent traffic-light control. In *First Asia International Conference on Modelling and Simulation, AMS 2007, Phuket, Thailand, March 27-30, 2007*, (pp. 496–501). IEEE Computer Society

- Holzinger, A., Plass, M., Kickmeier-Rust, M., Holzinger, K., Crişan, G. C., Pinteă, C.-M. & Palade, V. (2019). Interactive machine learning : experimental evidence for the human in the algorithmic loop. *Applied Intelligence*, 49(7), 2401–2414
- Höök, K., Karlgren, J., Wærn, A., Dahlbäck, N., Jansson, C. G., Karlgren, K. & Lemaire, B. (1998). A glass box approach to adaptive hypermedia. In *Adaptive hypertext and hypermedia*, (pp. 143–170). Springer
- Hoy, M. B. (2018). Alexa, siri, cortana, and more : an introduction to voice assistants. *Medical reference services quarterly*, 37(1), 81–88
- Hulbert, T. (1989). Comparison of the NASA-TLX and ISA subjective workload rating techniques—internal report. *Civil Aviation Authority Air Traffic Control Evaluation Unit : Bournemouth, UK*
- Irving, R. W. (1994). Stable marriage and indifference. *Discrete Applied Mathematics*, 48(3), 261–272
- Isern, D. & Moreno, A. (2016). A systematic literature review of agents applied in healthcare. *Journal of Medical Systems*, 40(2), 43 :1–43 :14
- ISO-9241-11 (2018). Ergonomics of human-system interaction, part 11 : Usability : Definitions and concepts
- Ivergard, T. & Hunt, B. (2009). *Handbook of Control Room Design and Ergonomics : A Perspective for the Future*. CRC Press
- Jaafar, A. A., Sharif, K. H., Ghareb, M. I. & Jawawi, D. N. (2019). Internet of thing and smart city : State of the art and future trends. *Advances in Computer Communication and Computational Sciences*, (pp. 3–28)
- Jacko, J. A. (2012). *Human computer interaction handbook : Fundamentals, evolving technologies, and emerging applications*. CRC Press
- Jennings, N., Pople, J. & Mamdani, E. (1996). Designing a reusable co-ordination module for co-operative industrial control applications. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 143(1), 91–102
- Jiang, D. (2016). A Matrix Representation of an n-Person 0-1 Game and Its 0-1 Tail Algorithm to Find (Strictly) Pure Nash Equilibria. *Mathematics and Computer Science*, 1(1), 5–9

- Jofre, A., Szigeti, S., Keller, S. T., Dong, L.-X., Czarnowski, D., Tomé, F. & Diamond, S. (2015). A tangible user interface for interactive data visualization. In *Proceedings of the 25th Annual International Conference on Computer Science and Software Engineering*, (pp. 244–247)
- Jordan, C. (1992). Experimental study of the effect of an instantaneous self assessment workload recorder on task performance. *Report No. DRA/TM (CAD5)/92011. Farnborough : Defence Evaluation and Research Agency*
- Kaiser, M., Klingspor, V. & Friedrich, H. (1997). Human-agent interaction and machine learning. In M. van Someren & G. Widmer (Eds.), *Machine Learning : ECML-97, 9th European Conference on Machine Learning, Prague, Czech Republic, April 23-25, 1997, Proceedings*, vol. 1224 of *Lecture Notes in Computer Science*, (pp. 345–352). Springer
- Khayut, B., Fabri, L. & Abukhana, M. (2014). Intelligent user interface in fuzzy environment. *International Journal of Artificial Intelligence and Applications (IJAIA)*, 5(1), 63–78
- Kirwan, B., Evans, A., Donohoe, L., Kilner, A., Lamoureux, T., Atkinson, T. & MacKendrick, H. (1997). Human factor in ATM system design life cycle. In *FAA Eurocontrol ATM R and D Seminar*, (pp. 1–21). Paris, France
- Klügl, F. & Bazzan, A. L. C. (2019). Route decision behaviour in a commuting scenario : Simple heuristics adaptation and effect of traffic forecast. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 7(1)
- Kolski, C. (1993). *Ingénierie des interfaces homme-machine, conception et évaluation*. Editions Hermès, Paris
- Kolski, C. (2011). *Human-computer interaction in transports*. ISTE Ltd. John Wiley Sons Inc
- Kolski, C., Boy, G., Mélançon, G., Ochs, M. & Vanderdonckt, J. (2020). Cross-fertilisation between human-computer interaction and artificial intelligence. A guided tour of artificial intelligence research, (pp. 1117–1141). Springer Cham
- Kolski, C. & Le Strugeon, E. (1998). A review of intelligent human-machine interfaces in the light of the ARCH model. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 10(3), 193–231

- Kolski, C. & Malvache, N. (2006). Intelligent interfaces based on fuzzy logic : Example with a human-error-tolerant interface approach. *Fuzzy Applications in Industrial Engineering*, 201, 339–366
- Kondakov, A. & Kulik, S. (2020). Intelligent information system for telemedicine. *Procedia Computer Science*, 169, 240–243
- Kranz, M., Holleis, P. & Schmidt, A. (2010). Embedded interaction : Interacting with the internet of things. *IEEE Internet Computing*, 14, 46–53
- Ksontini, F., Mandiau, R., Espié, S. & Guessoum, Z. (2012). Représentation égo-centrée de l’environnement virtuel dans le cadre de la simulation de trafic routier. In P. Chevaillier & B. Mermet (Eds.), *Systèmes Multi-Agents : Ouverture, Autonomie, et Co-évolution - JFSMA 12 - Vingtièmes journées francophones sur les systèmes multi-agents, Honfleur, France, October 17-19, 2012*, (pp. 171–180). Cepadues Editions
- Kubicki, S., Lebrun, Y., Lepreux, S., Adam, E., Kolski, C. & Mandiau, R. (2013a). Simulation in contexts involving an interactive table and tangible objects. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 31, 116–131
- Kubicki, S., Lepreux, S. & Kolski, C. (2013b). Distributed UI on interactive tabletops : Issues and context model. In M. D. Lozano, J. A. Gallud, R. Tesoriero & V. M. R. Penichet (Eds.), *Distributed User Interfaces : Usability and Collaboration*, Human-Computer Interaction Series, (pp. 27–38). Springer
- Kuligowska, K. & Lasek, M. (2005). Intelligent agent in the human-computer-interaction. In B. Kubiak and A. Korowicki (Eds.) : *Information management. Proceedings of the 7th International Conference on Information Management and Human Computer Interaction. Gdańsk*. Warsaw : Faculty of Economics Sciences
- Kumar, S. & Mitra, S. (2006). Self-organizing traffic at a malfunctioning intersection. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 9(4)
URL <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/9/4/3.html>
- Law, T., Chita-Tegmark, M. & Scheutz, M. (2020). The interplay between emotional intelligence, trust, and gender in human–robot interaction. *International Journal of Social Robotics*, (13), 297–309
- Le Strugeon, E., Kolski, C., Mandiau, R. & Tendjaoui, M. (1996). Intelligent agents’ concepts for computer-supported collaborative work systems in complex industrial systems.

- In *Second International Conference on the design of Cooperative Systems COOP'96*, (pp. 12–14). France
- Lebrun, Y., Adam, E., Mandiau, R. & Kolski, C. (2015). A model for managing interactions between tangible and virtual agents on an RFID interactive tabletop : case study in traffic simulation. *Journal of Computer and System Sciences*, 81 (3), 585–598
- Lee, E., Kim, Y.-G., Young, D., Seo, B., & Doo-Kwon. (2018). Self-Adaptive Framework with Game Theoretic Decision Making for Internet of Things. In *Proceedings of 10th international conference of TENCON 2018*, (pp. 2092–2097). IEEE
- Lesser, V., Durfee, E. & Corkill, D. (1987). *Cooperation Through Communication in a distributed Problem-Solving Network*, (pp. 29–58). Pitman Publishing Ltd
- Levin, E., Pieraccini, R. & Eckert, W. (2000). A stochastic model of human-machine interaction for learning dialog strategies. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, 8(1), 11–23
- Lew, M., Bakker, E. M., Sebe, N. & Huang, T. S. (2007). Human-computer intelligent interaction : a survey. In *International Workshop on Human-Computer Interaction*, (pp. 1–5). Springer
- Liang, X. & Yan, Z. (2019). A survey on game theoretical methods in human-machine networks. *Future Generation Computer Systems*, 92, 674–693
- Lieberman, H. (1997). Autonomous interface agents. In S. Pemberton (Ed.), *Human Factors in Computing Systems, CHI '97 Conference Proceedings, Atlanta, Georgia, USA, March 22-27, 1997*, (pp. 67–74). ACM/Addison-Wesley
- Lieberman, H. & Selcker, T. (2000). Out of context : Computer systems that adapt to, and learn from, context. *IBM System Journal*, 39(3,4), 617–632
- Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology*, 140, 389–426
- Lindsay, J. & Givigi, S. (2018). Solving home robotics challenges with game theory and machine learning. In *2018 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, (pp. 1294–1299). IEEE
- Liu, Y., Liu, L. & Chen, W.-P. (2017). Intelligent traffic light control using distributed multi-agent Q-learning. In *IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, (pp. 1–8). Yokohama : IEEE

- Lyall, B. (2015). Workload levels and their impact. *HindSight 21*, (pp. 62–65)
- Maes, P. (1994). Agents that reduce work and information overload. *Communications of the ACM*, 37(7), 30–40
- Magedanz, T. (1995). On the impacts of intelligent agent concepts on future telecommunication environments. In *International Conference on Intelligence in Services and Networks*, (pp. 394–414). Springer
- Mandiau, R. (1993). Contribution à la modélisation des univers multi-agents : génération d'un plan partagé. Mémoire de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, Janvier
- Mandiau, R., Champion, A., Auberlet, J., Espié, S. & Kolski, C. (2008). Behaviour based on decision matrices for a coordination between agents in a urban traffic simulation. *Applied Intelligence*, 28(2), 121–138
- Mandiau, R., Kolski, C., Chaib-Draa, B. & Millot, P. (1991). A new approach for the cooperation between human(s) and assistance system(s) : a system based on intentional states. In *World Congress on Expert Systems*, (pp. 16–19). Orlando, Florida
- Mandiau, R., Le Strugeon, E. & Péninou, A. (2002). *Organisation et applications des SMA*. Hermès Science publications
- Manikanta, C., Raghavendra, G. & Kumar, M. A. (2000). A novel iot based intelligent traffic information system using integration and agent technology. *International Journals of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 8(4), 105–112
- Manshaei, M. H., Zhu, Q., Alpcan, T., Bacsar, T. & Hubaux, J. P. (2013). Game theory meets network security and privacy. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 45(3), 1–39
- Masson, M. & De Keyser, V. (1992). Human error : lesson learned from a field study for the specification of an intelligent error prevention system. *Advances in Industrial Ergonomics and Safety IV, Taylor and Francis, London*, (pp. 1085–1092)
- Mastio, M., Zargayouna, M., Scemama, G. & Rana, O. (2018). Distributed agent-based traffic simulations. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 10(1), 145–156
- Mathieu, P. & Taquet, A. (2000). Une forme de négociation pour les systèmes multi-agents. In *JFIADSMA*, (pp. 133–147)

- Maybury, M. & Wahlster, W. (1998). *Readings in intelligent user interfaces*. Morgan Kaufmann
- Meinadier, J.-P. (1991). *L'interface utilisateur : pour une informatique plus conviviale*. Dunod
- Merwan, B., Julien, P., Laroche, R. & Pietquin, O. (2015). Human-machine dialogue as stochastic game. In *Proceedings of the 16th Annual SIGdial Meeting on Discourse and Dialogue (SIGDIAL 2015)*, (pp. 2–11). Santa Monica, CA
- Millot, P. & Mandiau, R. (1995). Men-machine cooperative organizations : Formal and pragmatic implementation methods. In *J.M. Hoc, P.C. Cacciabue, E. Hollnagel (Eds.), Expertise and Technology : Cognition Computer Cooperation*, Lawrence Erlbaum Associates, London, (pp. 213–228)
- Millot, P., Taborin, V. & Kamoun, A. (1989). Two approaches for man-computer cooperation in supervisory tasks. *IFAC Proceedings Volumes*, 22(12), 39–45
- Mimoun, M. S. B., Poncin, I. & Garnier, M. (2017). Animated conversational agents and e-consumer productivity : The roles of agents and individual characteristics. *Information & Management*, 54(5), 545–559
- Miori, V. & Russo, D. (2014). Domotic evolution towards the IoT. In *2014 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops*, (pp. 809–814). IEEE
- Mueller, H. J. (1996). *Negotiation principles*. Foundations of Distributed Artificial Intelligence, Wiley and Sons
- Müller, J. P. (1999). Architectures and applications of intelligent agents : A survey. *The Knowledge Engineering Review*, 13(4), 353–380
- Murphy, R. R. (2004). Human-robot interaction in rescue robotics. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 34(2), 138–153
- Myers, B., Hudson, S. E. & Pausch, R. (2000). Past, present, and future of user interface software tools. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 7(1), 3–28
- Nagel, D. C. (1988). Human error in aviation operations. In *Human factors in aviation*, (pp. 263–303). Elsevier

- Naiem, A., Reda, M., El-Beltagy, M. & El-Khodary, I. (2010). An agent based approach for modeling traffic flow. In *2010 The 7th International Conference on Informatics and Systems (INFOS)*, (pp. 1–6). IEEE
- Nakano, Y., Murata, K., Enomoto, M., Arimoto, Y., Asa, Y. & Sagawa, H. (2007). Modeling human-agent interaction using bayesian network technique. In K. Satoh, A. Inokuchi, K. Nagao & T. Kawamura (Eds.), *New Frontiers in Artificial Intelligence, JSAI 2007 Conference and Workshops, Miyazaki, Japan, June 18-22, 2007, Revised Selected Papers*, vol. 4914 of *Lecture Notes in Computer Science*, (pp. 5–12). Springer
- Nash, J. F. (1950). Equilibrium points in n-person games. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 36(1), 48–49
- Neisser, U. (1979). The concept of intelligence. *Intelligence*, 3(3), 217–227
- Neumann, J. V. & Morgenstern, O. (1944). *Theory of games and economic behavior*. Princeton : Princeton University Press
- Nguema, M. B. B., Kolski, C., Malvache, N. & Waroux, D. (2000). Design of a human-error-tolerant interface using fuzzy logic. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 13(3), 279–292
- Nguema, M. B. B., Waroux, D. & Malvache, N. (1992). Contributing to the design of a human error tolerant man-machine interface during the control of a simple simulated industrial process. In *Proceedings of 11th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control*, (pp. 1–8)
- Nielsen, J. (1993). *Usability engineering*. Boston : Academic Press
- Nongaillard, A., Mathieu, P. & Jaumard, B. (2008). La négociation du bien-être social utilitaire. In R. Mandiau & P. Chevaillier (Eds.), *Systèmes Multi-Agents, Communautés virtuelles et naturelles - JFSMA 08 - Seizièmes journées francophones sur les systèmes multi-agents, Brest, France, October 15-17, 2008*, (pp. 55–64). Cepaduès Editions
- Norcio, A. & Stanley, J. (1989). Adaptive human-computer interfaces : A literature survey and perspective. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 19, 399–408
- Nuyts, J. (1993). Representation and communication : Searle’s distinction revisited. *International Journal of Pragmatics*, 20, 591–597

- O'Donnell, R. & Eggemeier, F. (1986). Workload assessment methodology. Handbook of Perception and Human Performance. Volume II : Cognitive Processes and Performance, (pp. 42.1–42.49). Wiley and Sons, New York
- Osborne, M. J. (2003). *An Introduction to Game Theory*. Oxford University Press
- Pacaux-Lemoine, M. & Debernard, S. (2002). Common work space for human–machine cooperation in air traffic control. *Control Engineering Practice*, 10(5), 571–576
- Peres, S. M., Boscaroli, C., Bidarra, J. & Fantinato, M. (2011). Human-computer interaction and artificial intelligence : Multidisciplinarity aiming game accessibility. In *Business, Technological, and Social Dimensions of Computer Games : Multidisciplinary Developments*, (pp. 168–184). IGI Global
- Postorino, M. N. & Sarné, G. M. (2016). Agents meet traffic simulation, control and management : A review of selected recent contributions. In *Proceedings of the 17th Workshop from “Objects to Agents”, WOA*, vol. 1664, (pp. 112–117)
- Preuveneers, D. & Ilie-Zudor, E. (2017). The intelligent industry of the future : A survey on emerging trends, research challenges and opportunities in industry 4.0. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, 9(3), 287–298
- Purucker, C., Rüger, F., Schneider, N., Neukum, A. & Färber, B. (2014). Comparing the perception of critical longitudinal distances between dynamic driving simulation, test track and vehicle in the loop. In *Proceedings AHFE 2014*, (pp. 2089–2098)
- Pushkar, O. & Hrabovskyi, Y. (2019). Methodology for developing an intelligent user interface for educational publications in the e-learning system. *Development Management*, 17(3), 23–34
- Rago, F. (2003). Conversational agent model in intelligent user interface. In V. D. Gesù, F. Masulli & A. Petrosino (Eds.), *Fuzzy Logic and Applications, 5th International Workshop, WILF 2003, Naples, Italy, October 9-11, 2003, Revised Selected Papers*, vol. 2955 of *Lecture Notes in Computer Science*, (pp. 46–54). Springer
- Rao, A. S. & Georgeff, M. P. (1991). Modeling rational agents within a BDI-Architecture. In J. F. Allen, R. Fikes & E. Sandewall (Eds.), *Proceedings of the 2nd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR'91)*. Cambridge, MA, USA, April 22-25, 1991, (pp. 473–484). Morgan Kaufmann

- Rao, A. S. & Georgeff, M. P. (1995). BDI agents : From theory to practice. In V. R. Lesser & L. Gasser (Eds.), *Proceedings of the First International Conference on Multiagent Systems, June 12-14, 1995, San Francisco, California, USA*, (pp. 312–319). The MIT Press
- Rasmussen, J. (1986). *Information processing and human-machine interaction, an approach to cognitive engineering*. Elsevier Science Publishing
- Razakatiana, M., Kolski, C., Mandiau, R. & Mahatody, T. (2020a). Game theory-based human-assistant agent interaction model : Feasibility study for a complex task. In *Proceedings of the 8th International Conference on Human Agent Interaction HAI'20*, (pp. 187–195). HAI, Sydney, Australia : ACM
- Razakatiana, M., Kolski, C., Mandiau, R. & Mahatody, T. (2020b). Human-agent Interaction based on Game Theory : Case of a road traffic supervision task. In *IEEE HSI 2020, 13th International Conference on Human System Interaction*, (pp. 88–93). IEEE, Tokyo, Japan : IEEE. (*Best paper award in Human-Machine and Computer Interaction*)
- Ren, F. & Bao, Y. (2020). A review on human-computer interaction and intelligent robots. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 19(1), 5–47
- Revelli, C. (1998). *Intelligence stratégique sur Internet*. Dunod, 1998
- Rey, G. & Coutaz, J. (2003). Le contexteur : une abstraction logicielle pour la réalisation de systèmes interactifs sensibles au contexte. In *Proceedings of Interaction Homme Machine (IHM2002)*, (pp. 105–112)
- Riahi, I. (2016). *Vers une approche de spécification et de génération d'interfaces sensibles au contexte : Application au domaine médical*. Ph.D. thesis. Thèse de doctorat, École Nationale des Sciences de l'Informatique, Tunisia
- Riahi, I., Moussa, F. & Riahi, M. (2013). Petri nets context modeling for the pervasive human-computer interfaces. In P. Brézillon, P. Blackburn & R. Dapoigny (Eds.), *Modeling and Using Context - 8th International and Interdisciplinary Conference, CONTEXT 2013, Annecy, France, October 28 -31, 2013, Proceedings*, vol. 8175 of *Lecture Notes in Computer Science*, (pp. 316–329). Springer
- Rohrbach, R. & Schmid, U. (2008). *Intelligent user interface : modelling the user*. Artificial Intelligence 1 : CPSC 502

- Roscoe, S. N. & Williams, A. C. (1980). *Aviation psychology*. Iowa State University Press, Ames, IA
- Rosenfeld, A. & Richardson, A. (2019). Explainability in human-agent systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 33(6), 673–705
- Rouse, W., Geddes, N. & Curry, R. (1988). An architecture for intelligent interface : Outline of an approach to supporting operators of complex system. *Journal of Human-Computer interaction*, 3(2), 87–122
- Rouse, W. & Morris, N. (1985). Conceptual design of human error tolerant interface for complex engineering systems. In *Proceedings 2nd IFAC/IFIP/IFORS/IEA Conference on Analysis Design and Evaluation of Man Machine Systems*, (pp. 1–9). IFAC/IFIP/IFORS/IEA
- Rouse, W. & Rouse, S. (1983). Analysis and classification of human error. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 13, 539–549
- Rouse, W. B. (1977). Human-computer interaction in multitask situations. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 7(5), 384–392
- Rouse, W. B. & Morris, N. M. (1987). Conceptual design of a human error tolerant interface for complex engineering systems. *Automatica*, 23(2), 231–235
- Russell, S. J. & Norvig, P. (2003). *Artificial intelligence - a modern approach, 2nd Edition*. Prentice Hall series in artificial intelligence. Prentice Hall
- Salber, D., Dey, A. K. & Abowd, G. D. (1999). The context toolkit : Aiding the development of context-enabled applications. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, (pp. 434–441)
- Sankar, S. & Chandra, S. V. (2020). A multi-agent ant colony optimization algorithm for effective vehicular traffic management. In *International Conference on Swarm Intelligence*, (pp. 640–647). Springer
- Schilit, B., Adams, N. & Want, R. (1994). Context-aware computing applications. In *Proceedings of the IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (WMCSA '94)*, (pp. 85–90). IEEE
- Schilit, B. N. & Theimer, M. M. (1994). Disseminating active map information to mobile hosts. *IEEE network*, 8(5), 22–32

- Seffah, A. & Javahery, H. (2004). *Multiple user interfaces : cross-platform applications and context-aware interfaces*. Wiley
- Senay, H. (1992). Fuzzy command grammars for intelligent interface design. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 22(5), 1124–1131
- Shoham, Y. & Leyton-Brown, K. (2008). *Multiagent systems : Algorithmic, game-theoretic, and logical foundations*. Cambridge University Press
- Soegaard, M. & Dam, R. F. (2014). *The Encyclopedia of Human-Computer Interaction, 2nd Ed.* The Interaction Design Foundation
- Soh, L. K., Khandake, N. & Jiang, H. (2008). I-MINDS : A multiagent system for intelligent computer-supported collaborative learning and classroom management. *International Journal of Artificial Intelligence in Education*, 18(2), 119–151
- Stephanidis, C. (Ed.) (2009). *The Universal Access Handbook*. CRC Press
- Sun, L. & Yafeng, Y. (2017). Discovering themes and trends in transportation research using topic modeling. *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*, 77, 49–66
- Taillandier, P., Grignard, A. & et al, N. M. (2019). Participatory modeling and simulation with the gama platform. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 22(2), 1–3
- Taktak, H. & Moussa, F. (2017). A service-oriented application creation process in ubiquitous environments : Travel assistant mobile application. *Int. J. Pervasive Comput. Commun*, 13(3), 300–330
- Tendjaoui, M. (1992). Contribution à la conception d’interface intelligente pour le contrôle de procédés industriels : Application au module décisionnel d’imagerie. Mémoire de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, France
- Tendjaoui, M., Kolski, C. & Millot, P. (1991). An approach towards the design of intelligent man-machine interfaces used in process control. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 8(4), 345–361
- Tennenholtz, M. (2002). Game theory and artificial intelligence. In *Foundations and applications of multi-agent systems*, (pp. 49–58). Springer
- Terán, J., Aguilar-Castro, J. & Cerrada, M. (2013). Mathematical models of coordination mechanisms in multi-agent systems. *CLEI Electron. J*, 16(2)

- Thevenin, D. (2001). Adaptation en interaction homme-machine : le cas de la plasticité. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, France
- Thevenin, D., Calvary, G. & Coutaz, J. (1999). La plasticité en interaction homme-machine. In *Actes IHM99, Actes de 11ème Conférence Francophone Interaction Homme-Machine (Montpellier, 22-26 novembre)*, (pp. 152–155)
- Thevenin, D. & Coutaz, J. (1999). Plasticity of user interfaces : Framework and research agenda. In M. A. Sasse & C. W. Johnson (Eds.), *Human-Computer Interaction INTERACT'99 : IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction, Edinburgh, UK, 30th August-3rd September 1999*, (pp. 110–117). IOS Press
- Tirole, J. (2013). Rationalité, psychologie et économie. *Revue française d'économie*, 28(2), 9–33
- Trinh, L. T., Sano, K., Jayasinghe, A. & Tran, T. V. (2018). Two-player game-theory-based analysis of motorcycle driver's behavior at a signalized intersection. *Asian Transport Studies*, 5(2), 272–291
- Troy, T. F. (1991). The “correct” definition of intelligence. *International Journal of Intelligence and Counter Intelligence*, 5(4), 433–454
- Vacherand-Revel, J., Bobillier Chaumon, M.-E., Carvallo, S. & Tarpin-Bernard, F. (2005). Adapter ou uniformiser les interactions personnes-systèmes ? *RIHM (Revue d'Interaction Homme-Machine)*, 6(2), 91–129
- Vale, Z. A., Faria, L., Ramos, C., Fernandez, M. & Marques, A. (1996). Towards more intelligent and adaptive user interfaces for control center applications. In *Proceedings of International Conference on Intelligent System Application to Power Systems*, (pp. 2–6). IEEE
- Van Dam, A. (1997). Post-WIMP user interfaces. *Communications of the ACM*, 40(2), 63–67
- Vanderdonckt, J., Grolaux, D., Roy, P. V., Limbourg, Q. & Benoît (2005). Design space for context-sensitive user interfaces. In *Proceedings of the ISCA 14th International Conference on Intelligence and Adaptive System Engineering (HUC99), Karlsruhe*, (pp. 207–214)
- Vaudry, C. & Crampes, M. (2001). AMEBICA : une interface adaptative pour la supervision industrielle. In *Proceedings of JIM 2001, Interaction Homme-Machine et Assistance*, (pp. 1–8)

- Viano, G., Parodi, A., Alty, J., Khalil, C., Angulo, I., Biglino, D., Crampes, M., Vaudry, C., Daurensan, V. & Lachaud, P. (2000). Adaptive user interface for process control based on multi-agent approach. In *Proceedings of the working conference on Advanced visual interfaces*, (pp. 201–204)
- Victor, L. J. & Montero, F. (2005). A multi-agent system architecture for adaptation of user interface. In *Proceedings of International Central and Eastern European Conference on Multi-Agent Systems CEEMAS 2005 : Multi-Agent Systems and Applications IV*, (pp. 583–586)
- Villaren, T. (2012). Modèles et mécanismes d'adaptation de l'interaction homme-machine aux changements de contexte. Thèse de doctorat, Télécom Bretagne, Université de Bretagne-Sud, France
- Völkel, S. T., Schneegass, C., Eiband, M. & Buschek, D. (2020). What is "intelligent" in intelligent user interfaces ? : a meta-analysis of 25 years of IUI. In F. Paternò, N. Oliver, C. Conati, L. D. Spano & N. Tintarev (Eds.), *IUI '20 : 25th International Conference on Intelligent User Interfaces, Cagliari, Italy, March 17-20, 2020*, (pp. 477–487). ACM
- Wang, C., David, B., Chalon, R. & Yin, C. (2016). Dynamic road lane management study : A smart city application. *Transportation research part E : logistics and transportation review*, 89, 272–287
- Weiss, G. (1999). *Multiagent systems : a modern approach to distributed artificial intelligence*. MIT Press
- Wiggins Iii, R. H. (2004). Personal digital assistants. *Journal of Digital Imaging*, 17(1), 5–17
- Wilensky, U. & Rand, W. (2015). *An introduction to agent-based modeling : Modeling natural, social, and engineered complex systems with NetLogo*. MIT Press
- Wilensky, U. & Stroup, W. (2002). *NetLogo HubNet Gridlock AlternateHubNet*. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston
- Woodly, R. S., Gosnell, M., Gallimore, J. J. & Prabhala, S. (2007). Agents with personality : human operator assistants. In *Proceedings of the 2007 summer computer simulation conference*, (pp. 1139–1146). Citeseer
- Wooldridge, M. (2009). *An introduction to multiagent systems, 2nd Edition*. John Wiley & Sons

- Wooldridge, M. J. (2002). *Introduction to multiagent systems*. Wiley
- Wooldridge, M. J. & Jennings, N. R. (1995). Intelligent agents : Theory and practice. *The knowledge engineering review*, 10(2), 115–152
- Wu, W., Liu, Y., Xu, Y., Wei, Q. & Zhang, Y. (2017). Traffic control models based on cellular automata for at-grade intersections in autonomous vehicle environment. *J. Sensors*, 2017, 9436054 :1–9436054 :6
- Xiao, L., Xiao, N., Li, M., Liu, Z., Wang, F., Li, Y. & Hou, K. (2019). Intelligent architecture and hybrid model of ground and launch system for advanced launch site. In *2019 IEEE Aerospace Conference*, (pp. 1–12). IEEE
- Xu, W. (2019). Toward human-centered AI : A perspective from human-computer interaction. *Interactions*, 26(4), 42–46
- Xu, W. (2020). From automation to autonomy and autonomous vehicles : challenges and opportunities for human-computer interaction. *Interactions*, 28(1), 48–53
- Xu, X. & Yu, H. (2014). A game theory approach to fair and efficient resource allocation in cloud computing. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, 1–14
- Yuan, A. J., Cao, L. M. & Wang, X. P. (2005). A game-theory-based multi-agent interaction model. *Computer Engineering*, 31(6), 50–51
- Zijlstra, F. (1993). *Subjective Rating Scale Mental Effort, Dutch*. Ph.D. thesis. Doctoral thesis, Delft University, The Netherlands

Annexes

Annexe 1 : Publications	page 162
Annexe 2 : Certification	page 163
Annexe 3 : Questionnaire utilisé pour l'évaluation après l'expérimentation	page 164
Annexe 4 : Captures d'écrans	page 165
Annexe 5 : Abréviations utilisées dans la thèse	page 168
Annexe 6 : Glossaire	page 169
Annexe 7 : Méthodes d'estimation subjective de la charge de travail	page 171
Annexe 8 : Échelle d'évaluation de Likert	page 173

A.1 Publications

TABLEAU A.1.1 – Publications et travaux de recherche

Type de publication	Référence
Article à soumettre dans un journal	Martial Razakatiana, Christophe Kolski, René Mandiau and Thomas Mahatody. 2021. Participatory simulation using a human-agent interaction model based on game theory : Application to road traffic control. .
Acte de Conférence internationale avec comité de sélection	Martial Razakatiana, Christophe Kolski, René Mandiau and Thomas Mahatody. 2020. Game Theory-based Human-Assistant Agent Interaction Model : Feasibility Study for a Complex Task. In Proceedings of the 8th International Conference on Human-Agent Interaction (HAI'20), November 10–13, 2020, Virtual Event, Australia. ACM, New York, NY, USA. pp : 187–195
Acte de Conférence internationale avec comité de sélection	Martial Razakatiana, Christophe Kolski, René Mandiau and Thomas Mahatody. 2020. Human-agent Interaction based on Game Theory : Case of a road traffic supervision task. In Proceedings of IEEE HSI 2020, 13th International Conference on Human System Interaction (<i>Best paper award in area of Human machine and Computer interaction</i>), Tokyo, Japan, June 6–8 2020. pp : 88–93
Poster dans des doctoriales	Martial Razakatiana, Christophe Kolski, René Mandiau and Thomas Mahatody. 2019. Agent intelligent pour la gestion du trafic routier : Cas d'un trafic avec feux de circulation à l'intersection. (Poster). Manifestation scientifique pour les doctorants : Doctoriales à Majunga (Madagascar), Communication 26 CSFR, ARES, 11–15 Novembre 2019.

A.2 Certification



A.3 Questionnaire utilisé pour l'évaluation après l'expérimentation

Nom :	Prénom :
1. Comment estimez-vous la coopération dans le groupe (avec les assistants et l'autre participant) en matière de contrôle des feux de trafic en général ?	
5 : Absolument satisfait(e)	
4 : Plutôt satisfait(e)	
3 : Ni satisfait(e) ni insatisfait(e)	
2 : Plutôt insatisfait(e)	
1 : Absolument insatisfait(e)	
2. Comment estimez-vous la facilité d'utilisation du simulateur, vis-à-vis de ses fonctionnalités ?	
5 : Absolument facile	
4 : Plutôt facile	
3 : Ni facile ni difficile	
2 : Pas facile	
1 : Difficile	
3. Comment estimez-vous la performance des agents assistants en matière d'intervention ?	
5 : Très performant	
4 : Plutôt performant	
3 : Performance moyenne	
2 : Non performant	
1 : Pas du tout performant	
Commentaire libre :	

FIGURE A.3.1 – Questionnaire à remplir par chaque participant après l'expérimentation

A.4 Captures d'écrans

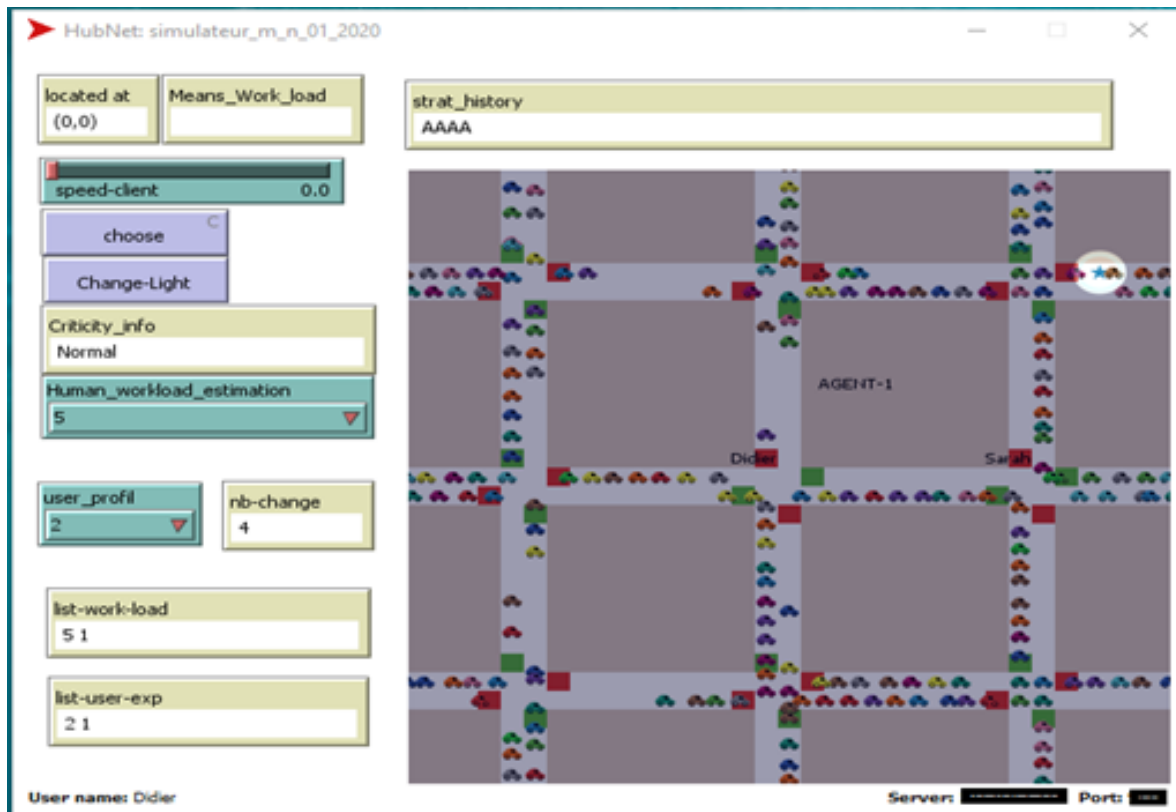


FIGURE A.4.1 – Capture d'interface client pour l'étude de cas impliquant deux humains et un agent logiciel.

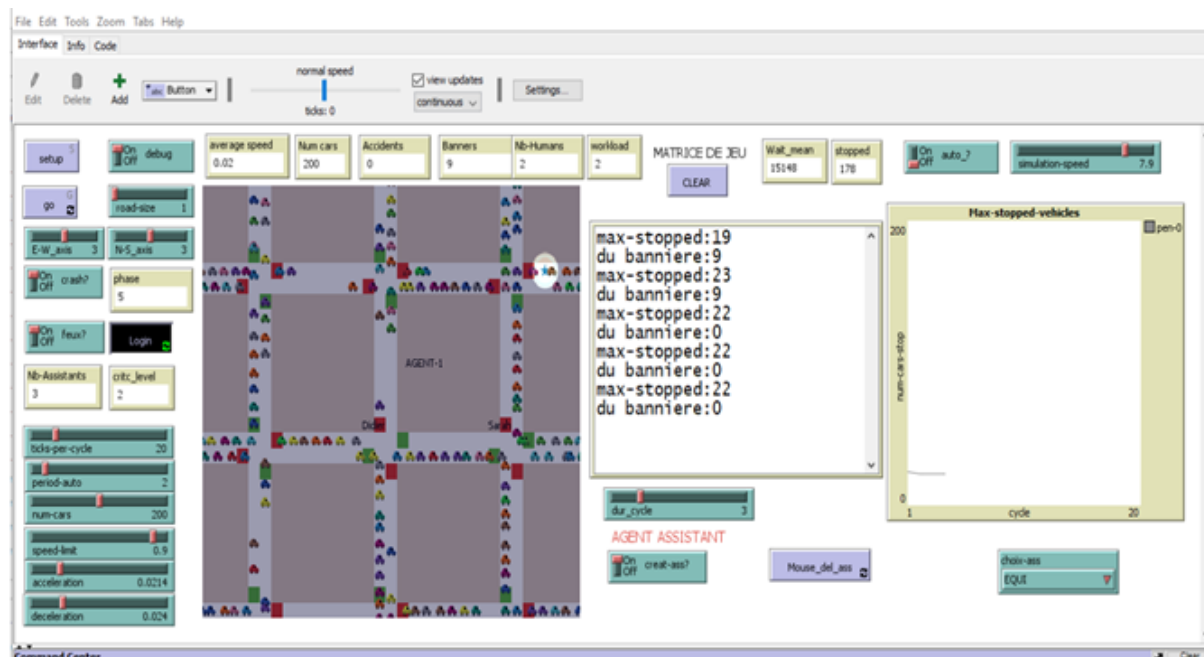


FIGURE A.4.2 – Capture d’interface serveur pour l’étude de cas impliquant deux humains et un agent logiciel.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data:

cycle	num-cars-stop	Moy_wait-ti	Somme_cha	Somme_pro	vitesse_moy	Max-stop-in	Nbre_interv	Nbre_change_Ass
0	200	0	0	0	0	0	0	0
1	119	0.595	2	2	0.009	19	0	0
2	64	2.075	2	2	0.13	21	0	0
3	149	7.59	2	2	0.056	21	0	1
4	149	15.34	2	2	0.039	19	0	3
5	137	19.86	2	2	0.037	22	0	5
6	148	28.555	2	2	0.032	21	0	7
7	133	26.33	2	2	0.04	18	1	9
8	131	26.6	2	2	0.044	18	1	11
9	141	34	2	2	0.043	18	1	13
10	140	36.425	2	2	0.047	19	1	15
11	130	36.345	2	2	0.051	21	1	17
12	132	37.57	2	2	0.056	21	2	19
13	135	37.2	2	2	0.047	20	2	21
14	128	25.615	2	2	0.051	22	2	23
15	121	29.14	2	2	0.065	19	2	25
16	133	26.805	2	2	0.052	22	2	27
17	132	25.575	2	2	0.05	19	2	29
18	143	28.96	2	2	0.04	21	2	31
19	141	32.74	2	2	0.047	24	2	33
20	148	25.105	2	2	0.042	21	2	35
21	149	28.06	2	2	0.043	21	2	37
22	140	27.565	2	2	0.045	21	2	39

FIGURE A.4.3 – Fichier contenant les informations du trafic durant l’expérience

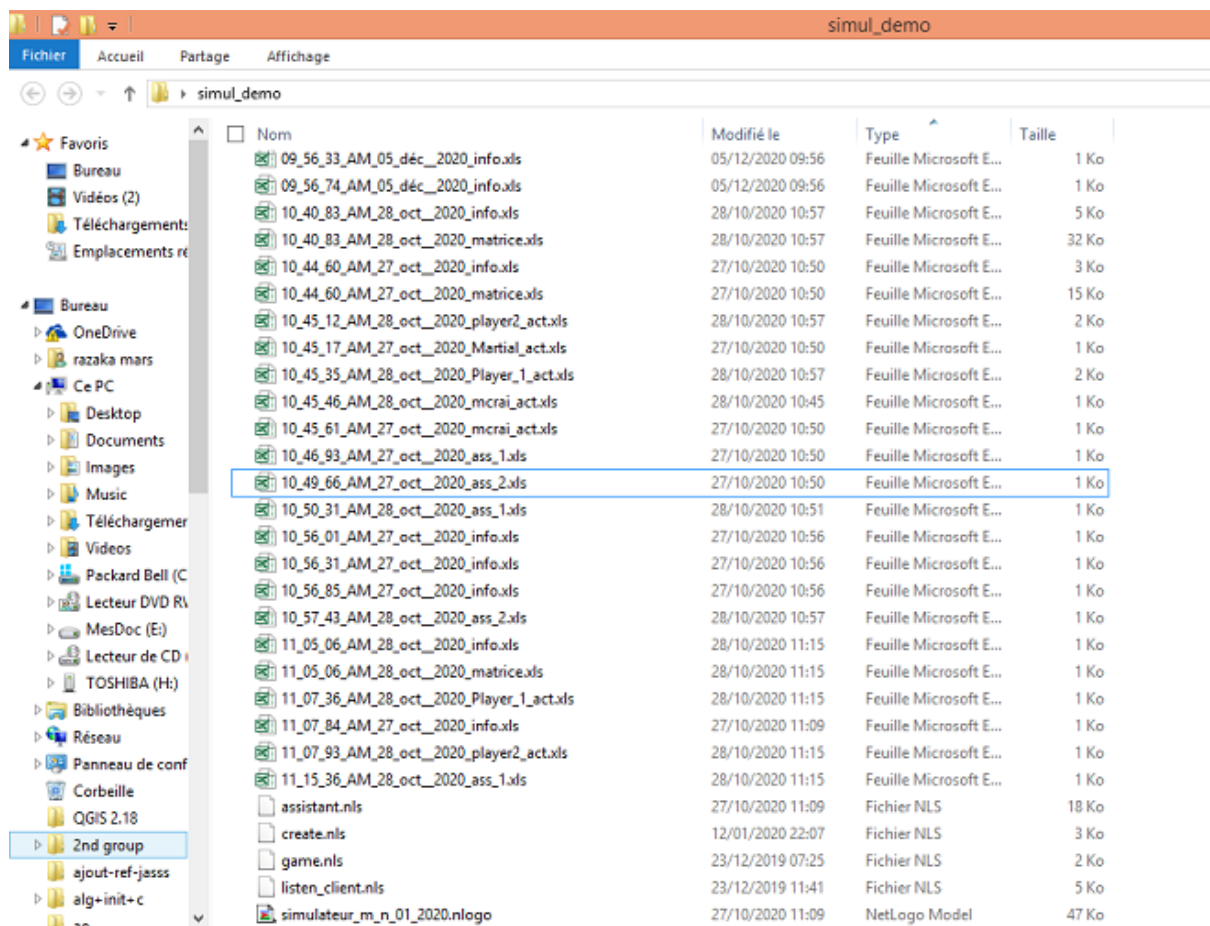


FIGURE A.4.4 – Fichiers excel générés lors d’une expérience

A.5 Abréviations utilisées dans la thèse

ACM : Association for Computer Machinery

AMEBICA : Auto adaptive Multimedia Environment Based on Intelligent Collaborating Agents

BDI : Belief Desire Intention

EIAH : Environnement Informatique pour l'apprentissage Humain

GUI : Graphic User Interface

HAI : Human-Agent interaction

HCI : Human-Computer Interaction

HETI : Human Error Tolerant Interface

IHM : Interaction Humain-Machine (remplaçant désormais Interaction homme-machine)

IoT : Internet of Things

IUI : Intelligent User Interface

MDP : Markov Decision Process

NASA : National Aeronautics and Space Administration

PDA : Personal Digital Assistant

RdP : Réseaux de Petri

RFID : Radio Frequence IDentification

SMA : Système multi-agent

TLX : Task Load indeX

A.6 Glossaire

Agent : Unité (ou entité) autonome capable de représentation, d'action et de communication. Dans le domaine de l'intelligence artificielle, l'agent est un robot ou un programme informatique doté de la capacité de percevoir son environnement, généralement via des capteurs, et d'agir en retour en fonction de cette perception et de règles.

Agent conversationnel ou chatbot : Interface humain-machine qui gère l'interaction entre des humains et un agent via un dialogue. Les chatbots reposent sur des échanges en langage naturel. Le système interprète les formulations de l'utilisateur et y apporte des réponses, elles aussi en langage naturel.

Apprentissage automatique (ou machine learning) : Branche de l'intelligence artificielle portant sur des processus d'apprentissage permettant à une machine d'évoluer, sans que ses algorithmes ne soient modifiés. Il existe plusieurs types de machine learning : statistique, supervisé (c'est-à-dire dont les règles d'apprentissage sont définies à partir d'une base d'exemples), non-supervisé.

Arbre de décision : Représentation graphique, sous forme d'arbre ou d'arborescence, des règles entrant dans le processus de prise de décision.

Base de connaissances : Ensemble des informations relatives à un sujet donné. Une base de connaissances comporte l'ensemble du savoir que l'expert d'un domaine doit maîtriser pour pouvoir exercer son expertise.

Bayésien : Méthode de calcul de probabilité qui repose sur le théorème du mathématicien britannique Thomas Bayes. En intelligence artificielle, l'inférence bayésienne est un raisonnement permettant de déduire la probabilité de survenance ou non d'un événement.

Équilibre de Nash : Profil stratégique final équilibré dans lequel aucun des joueurs n'a intérêt à changer unilatéralement son choix.

Ergonomie : C'est l'ensemble des connaissances servant à la conception de systèmes, machines ou outils pouvant être utilisés par tous avec le maximum de confort, de sécurité et d'efficacité. Le IV-ième congrès international d'ergonomie de la SELF (1969) définit l'ergonomie comme l'étude scientifique de la relation entre l'humain et ses moyens, méthodes et milieux de travail.

IHM : voir interaction homme-machine.

Interface Homme-Machine : Partie du système avec laquelle l'utilisateur est directement en contact. Cette partie est donc composée de deux sous parties, les entrées (clavier, souris, micro, etc.) et les sorties (écran, son, etc.).

Interaction Humain-Machine : Terme utilisé désormais pour l'interaction homme-

machine, depuis la conférence IHM organisée par l'AFIHM du 13 au 16 avril 2021.

Intelligence Artificielle : Elle est définie par l'un de ses créateurs, Marvin Lee Minsky, comme "la construction de programmes informatiques qui s'adonnent à des tâches qui sont, pour l'instant, accomplies de façon plus satisfaisante par des êtres humains car elles demandent des processus mentaux de haut niveau tels que : l'apprentissage perceptuel, l'organisation de la mémoire et le raisonnement critique".

Intelligence Artificielle Distribuée (IAD) : Branche de l'intelligence artificielle dont le but est de créer des systèmes décentralisés, multi-agents, capables de coopérer et de se coordonner.

Logique floue : Raisonnement logique incluant toutes les possibilités intermédiaires entre les valeurs vrai ou faux. En d'autres termes, elle permet de considérer les valeurs entre les valeurs toujours et jamais.

Modélisation : Élaboration des modèles à partir d'informations afin de simuler des systèmes complexes. Ceux-ci peuvent renvoyer à des situations ou des objets.

Opérateur : voir utilisateur.

Perception : Capacité d'un système à recevoir des stimuli liés à un objet ou un événement présent dans son environnement.

Règles : Format de représentation des connaissances exploitable par un ordinateur dans une base de connaissances. Utilisées dans les systèmes experts, les règles sont représentées sous la forme du couple si (prémises) alors (conclusion).

Réseaux de neurones : Les réseaux de neurones utilisent un programme composé d'algorithmes reliés à la manière du cerveau humain. Les réseaux neuronaux imitent ainsi le fonctionnement du cerveau humain : chaque fonction du programme est reliée aux autres, l'information est répartie sur l'ensemble du réseau.

Robotique : Branche de l'IA portant sur la conception et la fabrication de robots. Ces machines peuvent être des humanoïdes, ou des automates comme dans l'industrie par exemple.

Utilisateur : Personne qui utilise le logiciel au cours de son activité journalière. Les testeurs du logiciel en cours de développement ne peuvent donc pas être considérés comme des utilisateurs.

A.7 Méthodes d'estimation subjective de la charge de travail

A.7.1 Méthode de Cooper Harper

L'estimation de la charge de travail par la méthode de Cooper Harper [Cooper & Harper, 1969] a été initialement développée par George Cooper de la NASA et Bob Harper de Calpan Corporation. Cette méthode a été conçue particulièrement dans l'objectif d'étudier le niveau de la charge de travail de pilotes. Cette méthode d'estimation (par opinion exprimée par la personne concernée) est simple à mettre en œuvre. Il s'agit d'un arbre de décision comprenant des mots-clés, ceux-ci étant nuancés afin de faciliter le cheminement du choix par le sujet vers un nœud terminal de l'arbre. Les nœuds sont numérotés de 1 à 10, où la valeur 1 représente une charge très faible et la valeur 10 une charge de travail très élevée.

A.7.2 Méthode SWAT (Subjective Workload Assessment Technique)

En vue d'une description plus enrichie en termes d'étude portant sur la charge de travail, la méthode SWAT propose l'évaluation la charge de travail suivant trois aspects [O'Donnel & Eggemeier, 1986] : La charge temporelle de l'opérateur humain qui correspond au temps pendant lequel il est occupé par l'exécution d'une tâche. Sa charge cognitive qui correspond à l'effort intellectuel pour l'exécution de la tâche. La tension nerveuse durant l'exécution d'une tâche, par exemple ses inquiétudes, la peur ou bien le souci de ne pas pouvoir accomplir avec succès une tâche spécifique vis-à-vis de la situation. Ainsi, avec l'échelle classique de trois niveaux (faible, moyen, élevé) de base de chaque descripteur, l'opérateur humain a donc plusieurs états possibles en termes de niveau de charge de travail.

A.7.3 Méthode NASA-TLX

La méthode TLX (Task Load Index) a été développée aussi au sein de la NASA [Hart, 2006]. Elle reprend les trois descripteurs de la méthode SWAT : l'exigence mentale, l'exigence temporelle et le stress, auxquels viennent s'ajouter trois autres descripteurs : l'exigence physique, la performance et l'effort. Le rôle de chacun des descripteurs est le

suivant : L'exigence mentale : caractérise le niveau d'exigence des activités de perception et mentales ou les difficultés dues aux activités de recherche et de traitement de l'information et de prise de décision. L'exigence physique : correspond au niveau de capacité physique de l'opérateur. L'exigence temporelle : caractérise la pression temporelle selon le délai imparti pour exécuter les tâches, La performance : Par rapport à ses objectifs, l'opérateur doit évaluer sa propre performance à l'aide de son propre jugement et rendre compte aussi son niveau de satisfaction par rapport à l'objectif initial. L'effort : c'est l'évaluation globale de son effort dans le cadre de la réalisation de l'étude expérimentale. Cet effort doit rendre compte des aspects physiques et mentaux de son travail. Le stress : ceci caractérise les sentiments d'insécurité, d'anxiété ou de découragement de l'opérateur, à cause de contraintes ou de pressions psychologiques ou morales.

A.7.4 Méthode Rating Scale Mental Effort

La méthode Rating Scale Mental Effort est une méthode d'évaluation de la charge de travail à échelle mono-dimensionnelle développée par [Zijlstra, 1993]. Il est basé sur l'évaluation du taux d'effort de l'opérateur humain représenté par une croix sur une ligne continue. Cette ligne mesurant 150 mm est marquée à intervalles réguliers de 10mm. Afin de guider la réponse pour évaluer le niveau de la charge de travail, 9 indicateurs descriptifs sont positionnés le long de l'échelle. La valeur de la charge de travail est obtenue en mesurant la distance de la croix et l'origine.

A.7.5 Méthode Instantaneous Self Assessment

Cette méthode ISA (Instantaneous Self-Assessment) a été développée par les services de l'aviation civile anglaise [Hulbert, 1989] pour évaluer le niveau de la charge de travail de l'opérateur de contrôle pour une tâche de supervision et de contrôle de trafic aérien. Pour cela, les contrôleurs aériens doivent connaître la valeur estimative de leur charge de travail à l'aide d'un signal lumineux en appuyant sur une des cinq touches correspondantes aux niveaux de perception de charge de travail différents :

- 1 - sous-chargé,
- 2 - décontracté,
- 3 - confortable,
- 4 - élevé,
- 5 - excessif.

A.8 Échelle d'évaluation de Likert

L'échelle de Likert [Likert, 1932] est une méthode permettant de mesurer les attitudes des gens après une épreuve par exemple. Pour cela, le sujet doit répondre à une série de questionnaires. Ainsi, les personnes interrogées expriment leur degré d'accord ou de désaccord sur une échelle sous forme d'une valeur numérique. Cette échelle utilise un certain nombre de points de Likert, qui sont des énoncés auxquels le répondant exprime son accord ou son désaccord. Généralement, on utilise une échelle de cinq points ou de sept points, par exemple :

- Pas du tout d'accord (1),
- Pas d'accord (2),
- Neutre (3),
- D'accord (4),
- Entièrement d'accord (5).

Dans un système interactif utilisant une interface humain-machine, l'utilisateur peut répondre en choisissant un bouton radio correspondant à son opinion par rapport à une déclaration. Pour raison de simplification, l'échelle permet de mesurer l'accord ou le désaccord de quelqu'un par rapport à la déclaration et vous donne une mesure de l'accord ou du désaccord. Il existe une variété d'échelles possibles (1 à 7, 1 à 9, 0 à 4). La valeur maximale est considérée comme la valeur indiquant un accord total, la valeur minimale quant à elle correspond à un désaccord total sur une déclaration. La valeur au milieu indique la neutralité, hésitation ou une difficulté de prendre une décision de la part de l'individu. Pour élaborer une échelle de Likert simplifiée, on doit :

- déterminer l'objet qu'on veut évaluer : quel concept allez-vous mesurer (voir ce que l'attitude des gens sont envers cette notion).
- demander à un groupe de personnes (ou une personne) à écrire des déclarations différentes sur ce concept, reflétant des différentes opinions ou attitudes sur le sujet en question.
- Accorder une valeur aux déclarations : la prochaine étape est de demander au groupe d'indiquer pour chaque déclaration sur votre échelle de cinq points (ou sept points, soit 10 points) dans quelle mesure elle indique une attitude favorable ou défavorable à la déclaration.