

17/004.413

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université de 8 Mai 1945 – Guelma -

Faculté des Mathématiques, d'Informatique et des Sciences de la matière

Département d'Informatique



Mémoire de Fin d'études Master

Filière : Informatique

12 / 801

Option : Ingénierie des Medias

Thème :

**COORDINATION MULTI-AGENTS
FONDÉE SUR DES JEUX**

Encadré Par :

Mme. Zedadra Ouarda

Présenté par :

Lounis Nabil

Oughidni hicham

Juin 2012



Remerciements

Avant tout, merci mon DIEU de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener ce travail à terme.

Ensuite, il n'aurait pas pu être achevé sans le soutien, les conseils et l'aide de certaines personnes auxquelles je tiens ici à exprimer mes sincères remerciements ;

On tient à remercier en premier lieu Mme ZEDADRA OUARDA pour son encadrement avec patience. Son encouragement et ses remarques pertinentes nous ont permis de mieux structurer ce travail et de mieux le décrire. L'aboutissement de celui-ci doit beaucoup à sa contribution.

On remercie également les membres du jury de nous faire l'honneur d'examiner et de juger ce mémoire de fin d'étude ;

Enfin, on remercie tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, en particulier toutes nos amis pour leur soutien moral.

Lounis Nabil & Oughidni Hicham

Résumé

Les SMA constituent actuellement une approche prometteuse pour l'analyse, la conception et la réalisation des systèmes complexes. Néanmoins, bien qu'ils offrent de nombreux avantages potentiels, ils doivent aussi relever beaucoup de défis. La conception d'un modèle de simulation multi-agents est un défi en elle-même, et spécialement lorsque le modèle à concevoir doit simuler le phénomène de trafic routier.

En fait, les réseaux urbains présentent non seulement des intersections à fusion de flux, mais aussi des intersections à croisement de flux qui ont la particularité de posséder plusieurs zones de conflits se situant dans un espace routier souvent restreint. Cette complexité des réseaux urbains gêne la conception d'outils logiciels permettant la simulation et l'étude du trafic routier en milieu urbain.

La problématique générale qui oriente notre travail concerne la conception d'un mécanisme de coordination multi-agents fondé sur la théorie des jeux; pouvant résoudre les conflits qui peuvent se produire entre deux véhicules dans un carrefour en X (à croisement de flux).

Mots clés : systèmes multi-agents; coordination; simulation; théorie des jeux; équilibre de Nash; trafic urbain.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE	Page 06
-----------------------------	---------

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART SUR LES SYSTEM MULTI - AGENTS

INTRODUCTION	Page 09
I. AGENT	Page 09
I.1. Introduction	Page 09
I.2. Essai de définition	Page 10
I.3. Architectures d'agents	Page 11
I.3.1. Les agents cognitifs	Page 11
I.3.2. Les Agents réactifs	Page 13
I.3.3. Les agents hybrides	Page 13
I.4. Conclusion	Page 13
II. SYSTÈMES MULTI-AGENTS	Page 14
II.1. Introduction.....	Page 14
II.2. Définition d'un SMA	Page 15
II.3. Les principaux axes des SMA	Page 16
II.3.1. L'Environnement	Page 16
II.3.2. L'Interaction	Page 16
II.3.2.1. Coopération entre agents	Page 17
II.3.2.2. Coordination entre agents	Page 18
II.3.2.3. Négociation entre agents	Page 19
II.3.2.4. Communication entre agents	Page 19
II.3.3. L'organisation des agents	Page 19
II.3.3.1. Les niveaux d'organisation	Page 20
II.3.3.2. Auto-organisation dans les SMA	Page 21
a. L'auto-organisation avec des compétences réflexes	Page 21
b. Auto-Organisation par contrôle des interactions	Page 21
c. Le W- Learning	Page 21
d. Auto-organisation et réflexivité	Page 21
II.4. Domaines D'application des SMA	Page 22
CONCLUSION	Page 22

CHAPITRE II : COORDINATION DANS LES SMA ET LE TRAFIC ROUTIER

INTRODUCTION	Page 23
I. ÉTUDE DE LA COORDINATION	Page 23
I.1. Introduction	Page 23
I.2. Mécanismes de coordination	Page 23
I.2.1. Classification des mécanismes de coordination selon les dépendances à gérer	Page 23
I.2.1.1. Gestion des ressources communes	Page 23
I.2.1.2. Gestion des dépendances producteur / consommateur..	Page 24
I.2.1.3. Gestion des dépendances tâche / sous-tâche	Page 24
I.2.1.4. Gestion de la simultanéité	Page 24
I.2.2. Problèmes soulevés par la coordination	Page 24
I.2.2.1. Problème de cohérence	Page 24
I.2.2.2. Dilemme social	Page 25
I.3. Conclusion	Page 25
II. LES MÉCANISMES DE COORDINATION MULTI-AGENT	Page 25
II.1. Introduction	Page 25
II.2. Mise en œuvre des mécanismes de coordination	Page 25
II.2.1. Structuration organisationnelle	Page 26
II.2.2. Allocation	Page 27
II.2.3. Planification	Page 27
II.2.4. Négociation	Page 28
II.2.5. Coordination réactive	Page 29
II.3. Conclusion	Page 29
III. MÉCANISMES DE COORDINATION DU TRAFIC AUX CARREFOURS	Page 29
III.1. Introduction	Page 29
III.2. Trafic routier : Présentation et définition	Page 30
III.3. Caractéristiques	Page 31
III.4. Les modèles de simulation de trafic	Page 32
III.4.1. Les modèles basés sur les théories du trafic	Page 33
III.4.1.1. Les modèles de simulation macroscopiques	Page 33
III.4.1.2. Les modèles de simulation microscopiques	Page 34
III.4.2. Les modèles comportementaux	Page 36
III.5. Conclusion	Page 36
CONCLUSION	Page 37

CHAPITRE III : THÉORIE DE JEUX

INTRODUCTION	Page 38
I. ANALYSE DES MÉCANISMES DE COORDINATION	Page 38
I.1. Caractéristique du mécanisme à concevoir	Page 38
I.2. Analyse des mécanismes multi-agents	Page 39
I.2.1. Structuration organisationnelle	Page 39
I.2.2. Allocation	Page 40
I.2.3. Planification.....	Page 40
I.2.4. Négociation.....	Page 40
I.2.5. Coordination réactive.....	Page 40
I.3. Analyse des mécanismes de coordination aux carrefours.....	Page 41
I.3.1. Modèles macroscopiques	Page 41
I.3.2. Modèles microscopiques	Page 41
I.3.3. Modèles comportementaux	Page 43
I.4. Conclusion.....	Page 43
II. LA THÉORIE DES JEUX.....	Page 43
II.1. Introduction.....	Page 43
II.2. Historique.....	Page 44
II.3. Typologie.....	Page 45
II.3.1. Jeux coopératifs et jeux non coopératifs.....	Page 45
II.3.2. Jeux simultanés et jeux séquentiels.....	Page 45
II.3.3. Jeux finis.....	Page 45
II.3.4. Jeux à somme nulle et jeux à somme positive.....	Page 45
II.3.5. Jeux répétés.....	Page 46
II.3.6. Information.....	Page 46
II.3.7. Mémoire.....	Page 47
II.3.8. Jeux déterminés.....	Page 47
II.4. Représentations des jeux.....	Page 47
II.4.1. Forme normale.....	Page 48
II.4.1.1. <i>Matrice des gains</i>	Page 48
II.4.2. Forme extensive.....	Page 4
II.5. Concepts de solutions.....	Page 49
II.5.1. L'équilibre en stratégies dominantes.....	Page 49
II.5.2. L'équilibre par élimination itérée des stratégies dominées ...	Page 50
II.5.3. L'équilibre de Nash.....	Page 50
II.5.4. L'équilibre de Nash parfait en sous-jeux.....	Page 51

II.5.5. La solution du minimax	Page 52
II.5.6. L'équilibre corrélé	Page 52
II.6. Conclusion	Page 53
CONCLUSION	Page 53

CHAPITRE IV : CONCEPTION ET IMPLÉMENTATION

INTRODUCTION	Page 54
I. PRÉSENTATION DU PROBLÈME	Page 55
I.1. Nature des conflits	Page 55
I.2. Objectif de l'application	Page 56
II. CONCEPTION	Page 57
II.1. Modélisation du problème	Page 58
II.2. Calcul des matrices de payement	Page 59
II.3. discrétisation de l'environnement	Page 60
II.4. Implémentation des agents	Page 61
II.4.1. Comportement des agents	Page 61
II.4.2. Algorithme principal	Page 62
II.5. Mécanisme de coordination	Page 62
II.6. Architecture de l'application	Page 63
III. Environnement de développement	Page 64
III.1.1. Environnement matériel	Page 64
III.1.2. Environnement logiciel	Page 64
III.1.2.1. Le langage de programmation	Page 64
III.1.2.2. La plate-forme multi agents	Page 65
III.1.2.3. Éditeur du code	Page 65
IV. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION	Page 66
IV.1. Interface du simulateur	Page 66
IV.2. Mode de simulation automatique	Page 69
IV.3. Mode de simulation manuelle	Page 70
CONCLUSION	Page 71
CONCLUSION ET PERSPECTIVE	Page 72

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I :

- **Figure 1.1** : Représentation d'un agent Page 11
- **Figure 1.2** : Diagramme d'une architecture BDI Page 12
- **Figure 1.3** : Architecture réactive Page 13
- **Figure 1.4** : Représentation imagée d'un SMA Page 15
- **Figure 1.5** : les niveaux d'organisation Page 20

CHAPITRE II :

- **Figure 2.1** : Principaux mécanismes de coordination multi-agent Page 26
- **Figure 2.2** : Exemples de structures organisationnelles Page 26
- **Figure 2.3** : les deux manières d'allocation Page 27
- **Figure 2.4** : Système de planification multi-agent Page 28
- **Figure 2.5** : Exemple de protocole de négociation entre deux agents Page 28

CHAPITRE III :

- **Figure 3.1** : exemple de forme extensive d'un jeu Page 49

CHAPITRE IV :

- **Figure 4.1** : Les quatre situations de conflit entre deux véhicules Page 57
- **Figure 4.2** : matrices des paiements des quatre situations (modèle général)..... Page 58
- **Figure 4.3** : matrices des paiements calculées pour les quatre situations Page 59
- **Figure 4.4** : représentation du carrefour par une matrice carrée Page 60
- **Figure 4.5** : organigramme du déroulement de l'application Page 63
- **Figure 4.6** : défilement entre les fenêtres de l'application Page 66
- **Figure 4.7** : fenêtre principale de simulation Page 67
- **Figure 4.8** : résultat de l'exécution du simulateur en mode automatique Page 68
- **Figure 4.9** : résultat de l'exécution du simulateur en mode manuel Page 69

LISTE DES TABLEAUX

- **Tableau 2.1** : classification des modèles de simulation du trafic routier Page 48
- **Tableau 3.1** : Exemple de matrice des gains Page 32

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les applications d'aujourd'hui deviennent de plus en plus complexes, dynamiques et imprévisibles compte tenu du grand nombre et de la diversité des acteurs en jeu. Il est sans doute remarquable qu'au cours de ces dernières années, l'informatique c'est largement répandu dans la plus part des domaines de la science (architecture, médecine, industrie auto, etc.), et a reconnue une évolution largement profonde. Les ordinateurs sont devenu plus performants, dotés d'une certaine intelligence, et répandant mieux aux besoins industriels. Pareillement, le développement des réseaux et l'arrivée d'internet qui est devenu un mode de vie pour tout le monde, ont entraîné l'évolution de l'informatique de la centralisation vers la distribution, ce qui a donné naissance à l'intelligence artificielle distribuée « *IAD* ».

Avant de s'approfondir dans ce concept (*IAD*), il serait préférable de le bien définir et de chercher les circonstances de son apparition. Malheureusement, il n'est pas si facile de le faire tant que l'on n'arrive pas à définir l'intelligence artificielle (*IA*) et la notion d'intelligence elle-même. Cependant, dans un souci d'avancer, on pourrait définir l'intelligence comme « *le fait de posséder la conscience de soi par rapport au monde qui nous entoure avec une certaine logique, d'appliquer cette dernière, d'en déduire des réponses qui feront avancer de nouveau cette logique* » [Ruiz, 04]. Ainsi, on pourrait accepter la définition de l'intelligence artificielle donnée par **Marvin Lee Minsky** comme suit : « *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* ». [Minsky, 86]. On y trouve donc le côté artificiel atteint par l'usage de matériels informatiques, et le côté intelligence associé à son but d'imiter le comportement humain.

Dans les années 90, l'Intelligence Artificielle qui été incapable de résoudre tous les problèmes naturels à cause de la limite de conception centralisatrice a eu une deuxième chance de vivre plus longtemps grâce aux réseaux et aux machines multiprocesseurs, qui ont donné naissance à un nouveau concept qui est : « *l'intelligence artificielle distribuée* ».

Cette dernière a été définie par *Gerhard Weiss* en 1999 comme suit : « *L'IAD est l'étude, la conception et la réalisation de systèmes multi-agents, c'est-à-dire des systèmes dans lesquels les agents intelligents qui interagissent, poursuivent un exemple de buts ou réalisent un ensemble d'actions* » [Weiss, 99]. Cependant le terme Intelligence Artificielle distribuée est souvent considéré comme un synonyme pour le champ d'études des systèmes multi-agents.

Plus formellement le domaine des SMA peut être vu comme le confluent de plusieurs disciplines de recherche : l'*intelligence artificielle* pour les aspects décisionnels de l'agent, l'*intelligence artificielle distribuée* et les systèmes *distribués en générale* pour les interactions entre agents et la distribution de la résolution et de l'exécution. Et enfin du *génie logiciel* pour l'approche de modélisation orienté-agent et la création de composants logiciels autonomes. Les SMA s'inspirent également d'études issues d'autres disciplines connexes notamment la sociologie, la psychologie sociale, les sciences cognitives et bien d'autres.

Ces fondations interdisciplinaires expliquent la richesse des SMA par rapport aux approches antérieures et font de ceux-ci des systèmes idéaux pour représenter des problèmes complexes. Cette approche repose sur un ensemble de concepts tels que la communication, l'organisation, la coopération, la coordination entre des entités plus ou moins intelligentes et autonomes, ce qui fait de lui une approche très riche et très puissante en termes de modélisation. Grâce à l'outil de simulation multi-agents, les chercheurs ont pu résoudre une gamme importante de problèmes complexes, telle que : le problème du voyageur de commerce, l'optimisation des réseaux informatique...etc. et ont pu porter des études significatives sur plusieurs phénomènes sociaux, économiques, biologiques et bien d'autres.

L'un des problèmes sociaux les plus courants, et qui influe beaucoup sur la vie quotidienne est celui du déplacement. Les routes ont été conçues tout au long de l'histoire pour répondre particulièrement à la demande commerciale, mais depuis quelques dizaines d'années cette demande est complétée par celles liées aux déplacements domicile-travail et aux migrations de population lors des congés de fin de semaine et lors des vacances.

L'augmentation permanente des encombrements, l'exigence générale d'une plus grande sécurité ainsi que la montée des préoccupations environnementales a imposé la volonté de réduire les coûts humains et économiques induits par le trafic routier, ce qui a nécessité la mise en œuvre de stratégies permettant de mieux le gérer. Cela passe par l'optimisation de l'utilisation des infrastructures existantes, tant en terme de capacité qu'en terme de sécurité. Cette optimisation est rendue possible par une meilleure compréhension des mécanismes qui

régissent le trafic, et ce notamment grâce à la simulation. L'emploi des modèles de simulation de trafic a commencé quand *D.L.Gerlough* a publié sa dissertation « Simulation of freeway traffic on a general purpose discrete variable computer » à l'université de Californie à Los Angeles en 1955 [*Pursula, 99*]. Depuis, la simulation par ordinateur est devenu un outil largement utilisé en ingénierie du **trafic**.

Malgré le nombre important d'outils logiciels de simulation du trafic qui ont été développés par différents pôles de recherche et selon différentes méthodes, le but initial d'optimiser l'utilisation de l'infrastructure routière n'est pas totalement réalisé. Bien que la majorité des situations de conflit aux carrefours soit facilement résolue, il en reste quelques unes bien plus complexes et difficiles à résoudre même par des conducteurs humains.

Le but de ce mémoire est d'étudier toutes ces situations de conflit au carrefour (résolues ou non), ainsi que les mécanismes et modèles utilisés auparavant pour montrer leurs points forts et leurs limites, ensuite proposer un nouveau mécanisme distribué de coordination multi-agents basé sur la théorie des jeux, où chaque mobile modélise une situation du trafic au carrefour par un jeu et gère les conflits avec les autres mobiles en résolvant ce jeu.

Dans le premier chapitre, nous présentons de manière générale le domaine des systèmes multi-agents en tant que contexte de recherche pour notre problématique, nous rappelons les concepts marquant ce paradigme tels que les agents et les systèmes d'agents. Le deuxième chapitre exposera une étude présentative des mécanismes de coordination appliqués dans le domaine des SMA ou conçus pour gérer le trafic routier. Ces mécanismes seront critiqués dans le troisième chapitre pour en déduire leurs points forts et leurs limites, ce qui nous aidera à proposer un mécanisme plus robuste et plus fiable. Le quatrième chapitre sera réservé pour la conception et l'implémentation du mécanisme proposé. Enfin ce mémoire se termine par une conclusion récapitulative, qui tracera également les perspectives potentielles que nous envisageons d'entreprendre dans les travaux futurs.

CHAPITRE I - GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES MULTI-AGENTS

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons présenter un état de l'art sur les systèmes multi-agents commençant par définir les agents et cité les aspects importants pour ces entités, ensuite, notre analyse se focalisera sur les systèmes multi-agents, les concepts relatifs (l'environnement, l'interaction, la coopération, la communication, ... etc.), et les domaines d'application.

I. AGENT

I.1. Introduction

En essayant de définir les agents et les systèmes multi-agents, les scientifiques ont rencontré beaucoup de problèmes, et comme résultat il y a eu un nombre important d'ouvrages. Le fait que ces systèmes sont émergés des humains et de la société humaine rend la situation comparable à celle rencontrée quand les scientifiques ont tenté de définir la notion de l'intelligence artificielle. Depuis plusieurs années les scientifiques se sont proposés de créer des programmes capables de mimer le comportement humain intelligent, maintenant nous rencontrons la provocation de simuler le comportement collectif des gens dans leur environnement, comment ils réagissent, comment ils résoudent des problèmes de plus en plus complexes par la distribution des tâches ou comment ils élargissent leurs performances par la coopération ou la compétition.

Toutefois, il n'y a pas une définition acceptée en unanimité pour la notion d'agent. Dans ce qui suit, on présente quelques définitions plus importantes.

- *"Un agent est une entité qui fonctionne continuellement et de manière autonome dans un environnement où d'autres processus se déroulent et d'autres agents existent."* [Shoham, 93],
- *"Les agents intelligents sont des entités logiciels qui réalisent des opérations à la place d'un utilisateur ou d'un autre programme, avec une sorte d'indépendance ou d'autonomie, et pour faire cela, ils utilisent une sorte de connaissance ou de représentation des buts ou des désires de l'utilisateur."* [PUoB, 02];

- *"Un agent est un système informatique, situé dans un environnement, et qui agit d'une façon autonome pour atteindre les objectifs (buts) pour lesquels il a été conçu"* [Wooldridge & Jennings, 95].
- *"Un agent est une entité qui perçoit son environnement et agit sur celui-ci"* [Russell, 97]

En comparant les définitions ci-dessus on peut distinguer deux tendances différentes, la première considère que l'agent peut être défini indépendamment, tant que la deuxième voit l'agent comme entité agissant dans une société d'autres agents, donc le paradigme des SMA. Les deux tendances ont déjà porté des résultats. Mais comme l'agent ne peut exister comme une entité pour lui seul, et doit rencontrer d'autres agents dans son environnement on va considérer la dimension sociale de l'agent comme une caractéristique essentielle.

I.2. Essai de définition

Le terme d'*agent* tel que nous l'employons dans ce mémoire possède une signification essentiellement informatique et n'a de lien direct qu'avec le sens premier du mot : « *un agent est celui qui agit.* » [Hachette, 03].

Par ailleurs, et comme nous l'avons mentionné précédemment, il n'y a pas de définition universelle du terme "agent" mais on peut prendre la définition "classique" de **Jaques Ferber** comme point de départ. Cette définition est citée dans son fameux livre « *Les systèmes multi-agents Vers une intelligence collective* » comme suit : "Un agent est une entité physique ou virtuelle qui :

- Est capable d'agir dans un environnement ;
- Peut communiquer directement ou non avec les autres agents ;
- Peut être menée par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuel sous de fonction de satisfaction/survie qu'elle essaie d'optimiser) ;
- Possède des ressources propres ;
- Capable de percevoir son environnement (mais de manière limitée) ;
- N'a qu'une représentation partielle de son environnement,
- Possède des compétences et peut offrir des ressources ;
- Peut être capable de se reproduire ;
- Et dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences qu'elle possède tout en dépendant de ses perceptions, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit. " [Ferber, 95]

Une autre définition donnée par Demazeau et Müller en 1991 est noté comme suite:

« Un agent est une entité réelle ou virtuelle, dont le comportement est autonome, évoluant dans un environnement, qu'il est capable de percevoir, sur lequel il est capable d'agir et d'interagir avec les autres agents ». [Demazeau & Müller, 91]

Les deux définitions ont en commun que l'agent est caractérisé par les propriétés suivantes :

Autonomie : les agents encapsulent leur état interne (inaccessible pour les autres agents) et prennent des décisions basées sur cet état interne.

Réactivité : les agents sont situés dans un environnement (monde physique, internet, ...) et sont capable de percevoir cet environnement. De plus ils peuvent évoluer en fonction de changements qui interviennent dans cet environnement.

Pro-activité: le comportement des agents n'est pas une simple réponse aux changements de leur environnement. En fait, ils poursuivent leur(s) propre(s) but(s).

Habilité sociale : les agents interagissent avec d'autres agents et peuvent parfois mettre en œuvre des processus de coopération ou négociation pour accomplir un but.

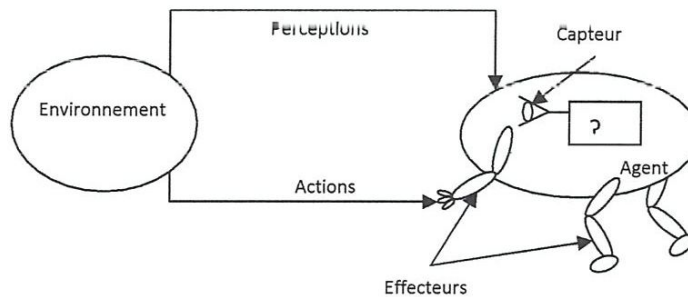


Figure 1.1 : Représentation d'un agent [Russell, 95]

I.3. Architectures d'agents

On peut dire que l'architecture d'un agent est une description de son organisation interne : les données et les connaissances de l'agent, les opérations qui peuvent être effectuées sur ses composantes et le flux de contrôle des opérations. Ainsi il y'a trois types d'agent.

I.3.1. Les agents cognitifs

Les agents cognitifs sont ceux qui vont essentiellement agir sur et par leurs connaissances. Lorsqu'ils sont naturels, les agents cognitifs sont confondus avec les individus ou les groupes humains en situation rationnelle. Ils sont obligatoirement individuellement différenciés et peuvent se spécialiser ou non dans la résolution d'une tâche ou d'un problème. [Prince, 98]

Les architectures BDI sont l'exemple le plus représentatif d'architecture permettant de bâtir un agent cognitif. D'autres architectures que BDI pour les agents cognitifs ont été conçues et utilisées dans diverses applications mais, jusqu'à présent, l'architecture BDI est celle qui est préférée dans la communauté de recherche agents intelligents et systèmes multi-agents. BDI est un acronyme qui signifie, en anglais, « Belief, Desire, Intentions ». Ce qui se traduit en français par croyances, désirs et intentions. Les agents se basent donc sur ces trois aspects pour choisir leurs actions. [Prince, 98]

Dans ce cadre, Wooldridge propose une architecture ayant sept composantes, telles que présentées sur la *figure 1.2* :

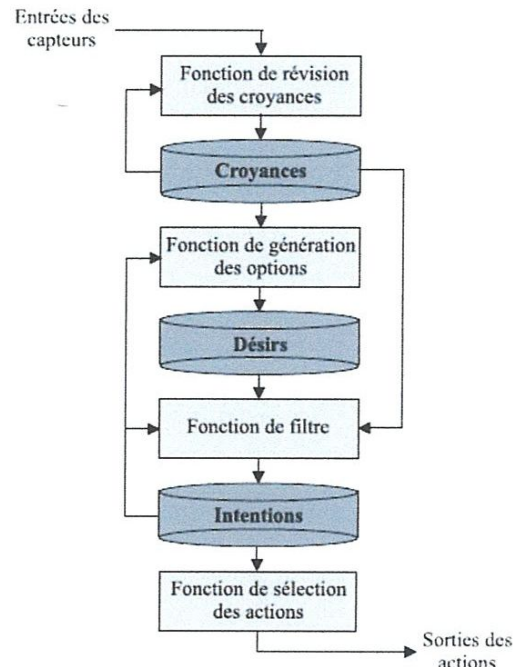


Figure 1.2 : Diagramme d'une architecture BDI [Wooldridge, 99].

- Un ensemble de croyances courantes, représentant les informations que l'agent possède à propos de son environnement courant ;
- Une fonction de révision des croyances, qui prend les entrées des capteurs et les croyances actuelles de l'agent et qui détermine un nouvel ensemble de croyances ;
- Une fonction de génération des options, qui détermine les options disponibles pour l'agent (i.e. ses désirs), en se basant sur les croyances courantes de l'agent à propos de son environnement et sur ses intentions courantes ;
- Un ensemble de désirs, représentant les options disponibles à l'agent ;
- Une fonction de filtre, qui représente le processus de délibération de l'agent et qui détermine les intentions de l'agent en se basant sur ses croyances, ses désirs et ses intentions courantes ;
- Un ensemble d'intentions courantes, représentant le centre d'attention actuel de l'agent, c'est-à-dire les buts envers lesquels il s'est engagé et envers lesquels il a engagé des ressources ;
- Une fonction de sélection des actions, qui détermine l'action à effectuer en se basant sur les intentions courantes de l'agent.

I.3.2. Les Agents réactifs

Les agents réactifs au contraire ne sont pas « intelligents » pris individuellement. Ils ne peuvent que réagir à des stimuli simples provenant de leur environnement, et leur comportement est alors simplement dicté par leur relation à leur entourage sans que ces agents ne disposent d'une représentation des autres agents ou de leur environnement. Cependant, du fait de leur nombre, ces agents peuvent résoudre des problèmes qualifiés de complexes. La *figure 1.3* montre une telle architecture. [Kabachi, 01]

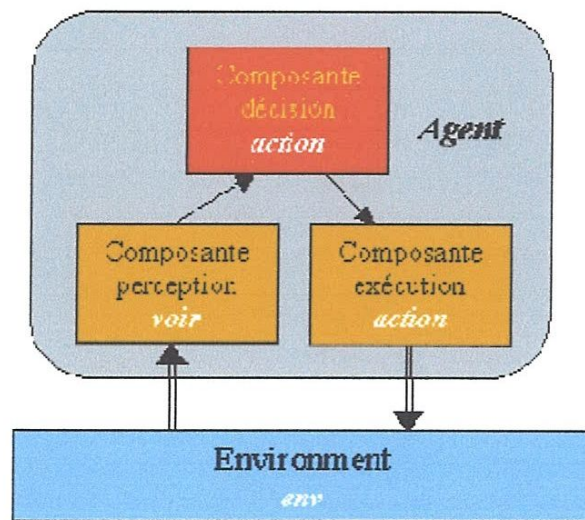


Figure 1.3 : Architecture réactive [Russell, 95].

I.3.3. Les agents hybrides

Chacune des approches *réactive* et *cognitive* est plus ou moins appropriée selon le type de problème. Pour la plupart des problèmes, il est souhaitable de concevoir des systèmes *hétérogènes* comprenant les deux types d'agents, ou d'avoir des agents conciliants à la fois des aspects *réactifs* et des aspects *cognitifs* : on parlera dans ce cas d'agent *hybride* [Wooldridge & Jennings, 95]. Différentes approches ont été proposées pour combiner les deux comportements [Kourakos, 00] [Ferguson, 92]. La principale différence entre les architectures hybrides est le pivot entre *réactif* et *cognitif*.

I.4. Conclusion

Quelque soit le type d'agent il restera incapable de résoudre des problèmes complexes, qui demandent une certaine (interaction, coopération, communication...) entre plusieurs agents, et c'est ici que les systèmes multi-agents interviennent pour résoudre ce problème.

II. SYSTÈMES MULTI-AGENTS

II.1. Introduction

Il est important de mentionner que les SMA mettent en œuvre un ensemble de concepts et de techniques permettant à des logiciels hétérogènes, ou à des parties de logiciels (nommés agents) de coopérer suivant des modes complexes d'interaction. D'après *Ferber*, le développement de la technologie des SMA s'est fait motivé par quatre raisons principales :

- **La première raison** : est la limite de l'intelligence artificielle classique sur le plan de la structuration et de l'organisation des connaissances. La difficulté qu'il y a à traduire un ensemble d'expertises sous une forme unifiée a amené les chercheurs à développer ce que l'on a d'abord appelé des systèmes multi-experts ; c.à.d. des systèmes mettant en jeu plusieurs bases de connaissances plus ou moins coordonnées.
- **la deuxième raison** : trouve son origine dans la nécessité de trouver des techniques de modélisation et de simulation performantes. Une approche dans laquelle les individus sont directement représentés sous forme d'entités informatiques semble une voie prometteuse et a contribué à l'essor du domaine.
- **la troisième raison** : provient de la robotique. le développement de la miniaturisation en électronique permet de concevoir des robots qui disposent d'une certaine autonomie quant à la gestion de leur énergie et à leur capacité de décision ils ont pu montrer qu'un ensemble de petits robots ne disposant que de capacités élémentaires de décision et d'intelligence pouvait facilement rivaliser avec les performances d'un seul robot « intelligent » , nécessairement plus lourd et plus difficile à gérer. Le problème alors revient à faire coopérer ces entités de manière à ce qu'elles assurent les fonctions désirées.
- **La quatrième et dernière raison** : est issue du développement de l'informatique et des systèmes distribués. Avec la généralisation des réseaux et des ordinateurs parallèles, il devient de plus en plus important de pouvoir faire coopérer plusieurs composants logiciels au sein d'environnements hétérogènes et distribués. *[Ferber, 95].*

II.2. Définition d'un SMA

Un System multi-agents est un système mettant en œuvre des programmes informatiques capables d'avoir un comportement propre (les agents) au sein d'un environnement global commun. [Ferber, 95].

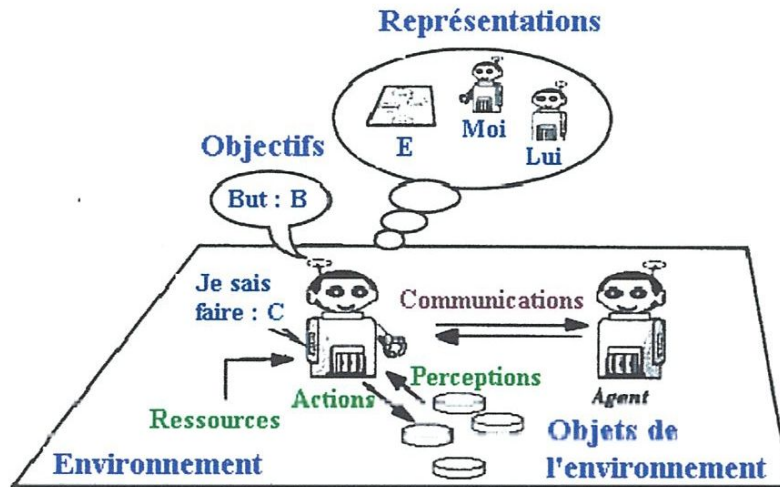


Figure 1.4 : Représentation imagée d'un SMA [Ferber, 95]

En 1991 *Demazeau et Müller* proposent une autre définition (plus large) des SMA qu'ils ont appelé « modèle voyelle **AEIO** », et cette définition est comme suite .

- Un ensemble **B** d'entités plongées dans un environnement **E** (**E** est caractérisé par l'ensemble des états de l'environnement **S**)
- Un ensemble **A** d'agents avec $A \subseteq B$
- Un système d'action (opérations) permettant à des agents d'agir dans **E** (une opération est une fonction de $S \Rightarrow S$).
- Un système de communication entre Agents (envoi de messages, diffusion de signaux,... (**I** comme interaction))
- Une organisation **O** structurant l'ensemble des agents et définissant les fonctions remplies par les agents (notion de rôle et éventuellement de groupes).

Dans cette définition Demazeau a met l'accent sur deux autres axes caractérisant les SMA : Interactions et organisations. Il découpe les SMA en quatre axes, que nous développerons tout au long de ce chapitre.

SMA = Agent + Environnement + Interaction + Organisation (AEIO).

[Demazeau & Müller, 91]

II.3. Les principaux axes des SMA

Selon le modèle voyelle « AEIO » de Demazeau et Müller les SMA sont composés essentiellement de quatre dimensions, l'agent (qu'on a détaillé précédemment), l'environnement, l'interaction et l'organisation, qui seront développés dans ce qui suit.

II.3.1. L'Environnement

L'environnement peut être considéré comme la représentation du monde dans lequel les agents se situent. L'environnement est modifiable par les agents, soit de façon globale, soit en faisant la distinction entre objets passifs « soumis aux actions des agents » et entités actives « les agents ». [Pesty, 97]

II.3.2. L'Interaction

On peut dire qu'il existe une interaction lorsque la dynamique propre d'un agent est perturbée par les influences des autres. Chaque agent est ainsi lié à un ensemble d'autres agents que l'on appelle ses accointances.

Jaques Ferber a défini ce concept comme suit : « Une interaction est une mise en relation dynamique de deux ou plusieurs agents par le biais d'un ensemble d'actions réciproques » [Ferber, 95]. Les interactions entre agents peuvent varier selon les situations dans lesquelles se trouvent ces agents : coexistence, compétition ou coopération.

- S'ils ne font que **coexister**, alors chaque agent ne considère les autres agents que comme des composantes de l'environnement. Il n'y a aucune communication directe entre les agents.
- S'ils sont en **compétition**, alors le but de chaque agent est de maximiser sa propre satisfaction. La compétition entre agents peut avoir plusieurs sources : Les buts des agents peuvent être incompatibles ou les ressources peuvent être insuffisantes.
- S'ils sont en **coopération**, alors le but des agents n'est plus seulement de maximiser leurs propres satisfactions mais aussi de contribuer à la réussite du groupe. Les agents travaillent ensemble à la résolution d'un problème commun.

II.3.2.1. Coopération entre agents :

Les protocoles de coopération consistent à décomposer un problème en tâches puis à les distribuer. Le système doit choisir parmi les décompositions possibles et doit considérer les ressources et les possibilités de chacun des agents. *[Durfee & Montgomery, 90]*

La décomposition peut être effectuée par le concepteur, par les agents en utilisant une planification hiérarchique ou être directement liée à la nature du problème. Une fois la décomposition réalisée, il faut distribuer les tâches selon les critères suivants :

- Éviter le sur-chargement des ressources critiques.
- Assigner les tâches aux agents ayant des capacités correspondantes.
- Laisser un agent avec un grand champ d'observation assigner les tâches des autres agents.
- Donner des responsabilités qui se chevauchent aux agents dans un souci de cohérence.
- Assigner des tâches interdépendantes à des agents proches spatialement ou sémantiquement pour limiter les coûts de communication et de synchronisation.
- Réassigner des tâches pour accomplir les plus urgentes.

En 1991, *Durfee* proposent quatre buts génériques de coopération entre agents:

- Augmenter la vitesse de résolution des tâches par leur parallélisations ;
- Augmenter le nombre ou la portée des tâches réalisables par le partage de ressources ;
- Augmenter la probabilité d'achever des tâches par leur duplication et si possible par l'utilisation de méthodes différentes pour les réaliser ;
- Diminuer l'interférence entre tâches en évitant les interactions négatives.

[Durfee et al, 91]

Trois formes de coopération peuvent être distinguées:

- ✦ **La coopération confrontation** : selon laquelle une tâche est exécutée par plusieurs agents de spécialités différentes œuvrant de manière concurrente sur le même ensemble de données, le résultat étant obtenu par "fusion";
- ✦ **La coopération augmentative**: selon laquelle une tâche est répartie sur une collection d'agents similaires, œuvrant de manière concurrente sur des sous-ensembles disjoints de données, la solution étant obtenue sous la forme d'un ensemble de solutions locales;
- ✦ **La coopération intégrative** : selon laquelle une tâche est décomposée en sous-tâches accomplies par des agents de spécialités différentes et œuvrant de manière coordonnée, la solution étant obtenue au terme de leur exécution. *[Hoc, 96]*

II.3.2.2. Coordination entre agents :

Il y a interaction entre les agents soit parce qu'ils coopèrent, soit parce qu'ils sont en compétition. Dans les deux cas, une coordination peut être nécessaire pour améliorer le fonctionnement global du système. Dans des environnements à ressources limitées, l'utilisation de la coordination se traduit par un comportement individuel visant à servir ses propres intérêts tout en essayant de satisfaire le but global du système. Les actions des agents doivent être coordonnées pour plusieurs raisons:

- Il y a des **dépendances** entre les actions des agents ;
- Aucun agent n'a suffisamment de compétence, de ressources et d'information pour atteindre tout seul le but du système complet ;

Il faut éviter les redondances dans la résolution de problèmes ; *[Nicolle, 02]*

La **coordination** est la propriété d'un système d'agents accomplissant une activité en environnement partagé. L'objectif est d'avoir un système plus **cohérent** qui est capable de se comporter comme un tout, et sans contrôle explicite global. Le degré de coordination peut être envisagé comme la quantité d'activités supplémentaires nécessaire pour éviter les « **deadlocks** » ou en français « **l'inter-blocage** », les activités redondantes, ... etc.

Cette coordination peut être réalisée par deux modes de planification : *[Quinqueton, 03]*

Planification centralisée : qui exhibe les propriétés suivantes :

- ✓ existence d'un organe centralisateur qui réalise les plans et gère les conflits
- ✓ peut s'exprimer de manière récursive ;
- ✓ connaissance des compétences et contraintes des autres agents + capacité à décomposer ;
- ✓ facilite le maintien de la cohérence, demeure proche d'un problème classique de planification.

Planification distribuée : dans laquelle :

- ✓ pas d'organe centralisateur, chaque agent produit des plans partiels qui peuvent être coordonnés par un coordonnateur ;
- ✓ capacité à communiquer les buts, actions & contraintes individuelles ;
- ✓ forte charge de communication, forte complexité ;
- ✓ problème non complètement résolu.

II.3.2.3. Négociation entre agents

Comme nous avons vus précédemment, en interagissant dans un environnement partagé, les agents doivent coordonner leurs actions et avoir des mécanismes pour la résolution des conflits. Le mécanisme favori pour le faire est **la négociation**. Inspiré du modèle des humains, la négociation est devenue une composante de base de l'interaction dans les systèmes multi-agents, surtout parce que les agents sont autonomes ; il n'y a pas de solution imposée à l'avance et les agents doivent arriver à trouver des solutions dynamiquement, pendant qu'ils résolvent les problèmes. *[PUoB, 02]*

II.3.2.4. Communication entre agents

Les communications, dans les systèmes multi-agents comme chez les humains, sont à la base des interactions et de l'organisation sociale. Sans communication, l'agent n'est qu'un individu isolé, refermé sur sa boucle perception-délibération-action. C'est parce que les agents communiquent qu'ils peuvent coopérer, coordonner leurs actions, réaliser des tâches en commun et devenir ainsi de véritables êtres sociaux. Dans les SMA deux stratégies principales ont été utilisées pour supporter la communication entre agents:

Communication par transfert de messages : Dans cette approche, les agents échangent de messages entre eux directement (pas de mémoire partagée).

Communication par l'utilisation d'un tableau noir : Un tableau noir est utilisé pour spécifier une mémoire partagée par divers systèmes. Dans un SMA utilisant un tableau noir, les agents peuvent écrire des messages, insérer des résultats partiels de leurs calculs et obtenir de l'information dans et à partir de ce tableau. *[Brakni, 10]*

II.3.3. L'organisation des agents

Les interactions entre agents sont à l'origine des multiples problématiques liées aux systèmes multi-agents. Or, l'état de l'organisation d'une société est la conséquence des interactions entre les agents. Réciproquement, le comportement des agents est contraint par l'ensemble des structures organisatrices de la société. Une organisation est un schéma de prise de décision et de communication appliqué à un ensemble d'acteurs qui réalisent un ensemble de tâches afin de satisfaire des buts tout en assurant un état global cohérent. Ce schéma peut être défini par le concepteur ou dynamiquement par les acteurs. *[Malone, 87]*

Dans un système multi-agents, l'organisation est une notion à dimension multiple, elle est implicite ou explicite, statique ou dynamique, prédéfinie ou émergente, ascendante ou descendante [Mandiau, 01]. Une organisation peut s'instancier suivant plusieurs modèles : groupe, hiérarchie, de marché, etc. [Smith 80, Castelfranchi 92, Jennings 93, Demazeau 93, Le Strugeon 95].

Il est également possible d'avoir une vision récursive d'une organisation, une organisation pouvant faire partie d'une organisation plus importante. [Adam 00, Mandiau 03].

II.3.3.1. Les niveaux d'organisation

La notion de *niveau d'organisation* permet de comprendre l'*emboîtement* d'un niveau dans un autre. Dans les SMA, on pourra considérer qu'une organisation est une agrégation d'éléments de niveau inférieur, et un composant d'organisations de niveau supérieur (figure 1.5). Les agents de niveau n sont regroupés en organisations qui au niveau $n+1$ peuvent être considérées comme des entités individuelles. Inversement, des entités individuelles de niveau $n+1$ peuvent être vues comme des organisations de niveau n . Le processus peut se répéter sur un nombre quelconque de niveaux.

Les agents sont donc avant tout des entités individuelles alors que les systèmes multi-agents sont essentiellement des entités collectives. Néanmoins, un agent composé lui-même d'un ensemble d'agents sera considéré à un certain niveau comme une organisation individuelle et, au niveau inférieur, comme une organisation collective.

Mais le problème ici porte sur la capacité de groupes d'agents à s'auto-organiser pour produire des réponses fonctionnelles collectives.

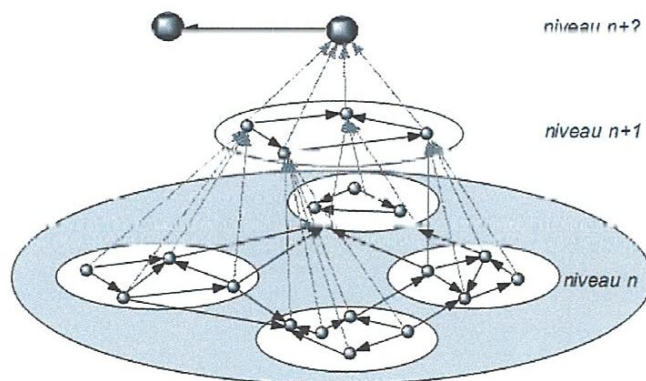


Figure 1.5 : les niveaux d'organisation [Ferber, 95]

II.3.3.2. Auto-organisation dans les SMA

L'auto-organisation, au niveau étymologique, est composée de la racine grecque autos qui signifie lui-même et du terme organisation (déjà expliqué précédemment). Dans une première approche, on peut donc définir l'auto-organisation comme la faculté pour un système de s'organiser lui-même. Nous allons illustrer ce principe de base, au travers différentes techniques pour l'auto-organisation des systèmes multi-agents. Pour cela, nous exprimons le fonctionnement de ces techniques en terme de quand, comment modifier l'organisation, en précisant les effets de ces modifications sur les comportements des agents. *[Champion, 03]*

a. L'auto-organisation avec des compétences réflexes

Dans Manta *[Drogoul, 93]*, chaque agent dispose au départ d'un même corpus d'activités réflexes. Et peut être modifié par l'agent en fonction de sa perception de l'environnement. Ce qui entraînent, une spécialisation du comportement des agents.

b. Auto-Organisation par contrôle des interactions

Pour les agents réactifs, on peut aussi envisager l'auto-organisation comme un mécanisme d'ajustement des schémas d'interaction. Dans PACO et ses prolongements *[Demazeau, 93]*, les agents disposent ainsi de filtres qui déterminent respectivement l'accès au social et l'accès à l'environnement.

c. Le W- Learning

Ce mécanisme permet aux agents d'apprendre au cours du fonctionnement du système les actions à déclencher en fonction de la situation perçue de l'environnement.

d. Auto-organisation et réflexivité

Une autre façon de réorganiser une communauté d'agents nécessite que l'agent ayant l'initiative d'une tâche ait la faculté de jouer un double rôle selon le cas :

- Choisir et imposer la meilleure organisation, pour un ensemble d'agents d'un niveau organisationnel inférieur,
- Faire émerger une organisation après contact et négociation avec des agents du même niveau organisationnel. Ces agents doivent se réunir pour se partager le travail commun.

Ainsi une organisation génère d'autres organisations de façon réflexive et les liens de coopération entre les agents (organisations individuelles) sont remplacés par des liens de coopération entre organisations collectives (création des coalitions). Ces structures sont donc les résultats de décisions collectives. Les agents « s'organisent pour s'organiser », Dans ce cas on peut parler d'auto-organisation et de réflexivité.

II.4. Domaines D'application des SMA

Les SMA ont des applications dans de nombreux domaines, tel que :

- ✓ *résolution de problèmes* : concerne toutes les situations dans les quelles les agents logiciels accomplissent des tâches utiles aux humains.
- ✓ *conception de logiciels capables* d'évoluer par interactions, adaptation d'agents autonomes fonctionnant dans un univers distribué (logiciels fonctionnant dans un environnement distribué) ex. : internet.
- ✓ *robotique distribuée* : l'utilisation d'agents concrets qui se déplacent dans un environnement réel.
- ✓ *La simulation multi-agents* : analyser les propriétés de modèle théorique du monde environnant, ex : la chimie, la biologie, éthologie.

CONCLUSION

Dans ce chapitre on a survolé le concept de système multi-agents, en présentant ces aspects et caractéristiques considéré comme pertinents. Cette introduction au domaine des systèmes multi-agents et à leur simulation a essayé de rendre compte de la complexité de ces systèmes. Cette complexité, soutenue par la large palette des applications existantes et à venir, implique que des mécanismes de coordination appropriés doivent être mis en œuvre, pour assurer le bon fonctionnement de ces systèmes, Le deuxième chapitre de ce mémoire est consacrée à présenter ces mécanismes, les classifier et détailler leurs apports et limites.

CHAPITRE II – COORDINATION MULTI-AGENTS ET COORDINATION DU TRAFIC ROUTIER

INTRODUCTION

Après avoir exposé, dans le chapitre précédent, les SMA et les concepts relatifs à ce domaine, ce chapitre se focalisera sur les différents mécanismes de coordination. On débutera par présenter la coordination dans son sens général, ensuite, et plus précisément, dans le domaine des systèmes multi-agents. Enfin, on présentera les mécanismes de coordination du trafic au carrefour.

I. ÉTUDE DE LA COORDINATION

I.1. Introduction

Comme cela a été exposé dans le premier chapitre, la coordination est la gestion des dépendances entre activités, et du fait qu'elle est réalisée dans le cadre d'une organisation, elle est ainsi vue comme une réponse aux problèmes causés par les dépendances.

I.2. Mécanismes de coordination

I.2.1. Classification des mécanismes de coordination selon les dépendances à gérer

Suite aux travaux initiaux de Thompson, de nombreuses tentatives ont été effectuées afin de décrire les mécanismes de coordination qui gèrent les interdépendances. La catégorisation des différents types de dépendances a permis d'aboutir à une classification des mécanismes de gestion des dépendances [Ossowski, 98]. Les mécanismes de coordination identifiés peuvent ainsi être organisés en quatre groupes principaux, successivement décrits.

I.2.1.1. Gestion des ressources communes

Lorsque plusieurs activités en besoin d'accéder à une ressource commune, le système aura besoin d'un mécanisme d'allocation de ressources pour résoudre ce conflit. Ce mécanisme est probablement le plus largement étudié et plusieurs méthodes peuvent être employées : FIFO; ordre de priorité; enchères...etc.

I.2.1.2. Gestion des dépendances producteur / consommateur

Cette dépendance se présente lorsqu'une activité produit quelque chose qui est utilisé par une autre activité. Elle peut être gérée par un mécanisme de notification lorsque l'activité du producteur doit être terminée avant celle du consommateur, ou bien par un mécanisme de communication lorsque le résultat du producteur doit être transféré au consommateur.

I.2.1.3. Gestion des dépendances tâche / sous-tâche

Cette dépendance se présente lorsque le problème à résoudre est qualifié de complexe, et qu'il doit être décomposé en sous problème et distribué sur plusieurs agents, elle peut être gérée par des mécanismes incluant la sélection des buts et la décomposition des buts.

I.2.1.4. Gestion de la simultanéité

Celle là se montre lorsque deux activités sont mutuellement exclusives. Elle peut être gérée par un mécanisme de *synchronisation* qui peut être assemblée à une méthode de *planification*.

I.2.2. Problèmes soulevés par la coordination

Toutes les études apportées sur la coordination et plus spécialement celles vues précédemment n'ont pas abouti à définir clairement la coordination et les conditions réelles dans lesquelles elle intervient. Ainsi, si tous les agents impliqués dans la résolution d'un problème avaient une connaissance complète de l'environnement et des autres agents, la coordination devrait être facile. Malheureusement, ceci se révèle particulièrement faux dans la réalité et entraîne des problèmes qu'il faut également essayer de gérer.

I.2.2.1. Problème de cohérence

Un des problèmes est l'incertitude des acteurs de la coordination à propos de l'état et des actions des autres. Cette incertitude est généralement due à l'insuffisance de communication qui rend difficile l'entente sur certaines actions à entreprendre. Chacun des acteurs doit savoir, en fonction de ses attentes et des croyances qu'il a des états et des intentions des autres, ce que les autres vont faire. Car, au final, le résultat des uns ou des autres est le résultat de tous. Il s'agit ici du problème appelé problème de cohérence. [Fenster 95, Ossowski 98]

I.2.2.2. Dilemme social

Une autre difficulté est due au manque de confiance entre les différents acteurs de la coordination. La poursuite d'intérêts propres aux individus dans un groupe mène souvent à un résultat collectif non-optimal pour tous. S'il existait des raisons de croire que les autres choisissent une option socialement satisfaisante, il serait possible d'atteindre un certain niveau de coordination mutuellement bénéfique. Pourtant, comme ces raisons semblent souvent ne pas exister, il apparaît rationnel à chacun de continuer à ne pas croire les autres. Il s'agit ici de ce qui est appelé un dilemme social. *[Champion, 03]*

I.3. Conclusion

Après cette étude préliminaire de la coordination, des mécanismes de gestion des dépendances et les problèmes qu'ils soulèvent, on remarque que la coordination est un domaine d'étude plus large que l'on croyait. En ce qui nous concerne, le point essentiel est d'étudier les mécanismes de coordination employés dans le domaine des Systèmes Multi-Agents et celui du trafic routier en situation de carrefour.

II. Les mécanismes de coordination multi-agents

II.1. Introduction

Le choix du mécanisme de coordination à mettre en œuvre varie selon le domaine d'utilisation du système, du nombre d'agents qui le composent et leurs tâches à réaliser, de l'environnement et ses caractéristiques (stabilité, prédictibilité, ... etc.). Ce mécanisme a pour but de gérer les dépendances qui existent entre les activités des agents qui sont souvent incomplètement spécifiées.

II.2. Mise en œuvre des mécanismes de coordination

Pour coordonner les activités des agents dans un SMA, il faut déterminer l'existence de situations d'interaction, les identifier et les gérer, mais le problème est comment mettre en œuvre une coordination au niveau du système. On doit opter une solution parmi les plusieurs possibilités d'implémentation des mécanismes de coordination, qui peuvent être réalisés au sein de l'agent, entre les agents, au travers de l'environnement, ... etc. Toutes ces possibilités de mise en œuvre de mécanismes de coordination sont envisageables et peuvent être combinées pour donner naissance à d'autres. Les mécanismes multi-agents les plus courants et occupant une place privilégiée dans la littérature sont présentés par la « *Figure 2.1* ».

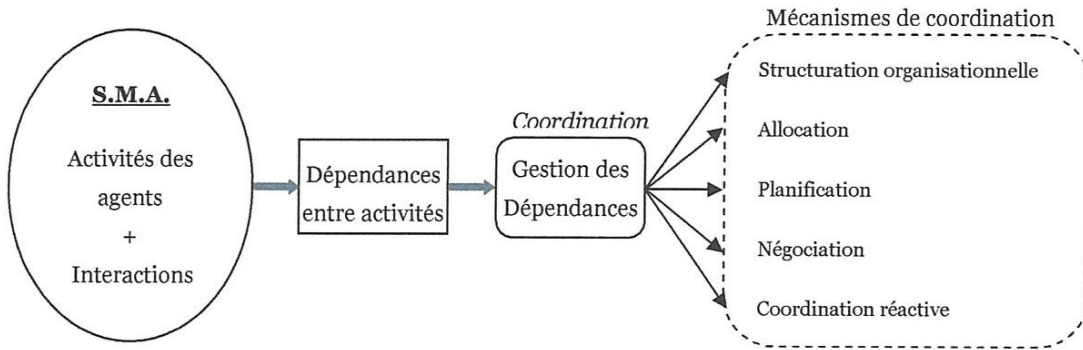


Figure 2.1 : Principaux mécanismes de coordination multi-agents. [Champion, 03]

II.2.1. Structuration organisationnelle

Les organisations d'agent peuvent être classifiées selon plusieurs critères, ce qui implique l'existence de nombreuses classes d'organisation. Tandis que pour leurs structuration on trouve que trois configurations :

- Organisation hiérarchique : cette structure est inspiré des entreprises humaines imposant un certain ordre hiérarchique, dans ce type d'organisation chaque tâche est contrôlée par un agent gestionnaire qui coordonne son processus de réalisation [Durfee, 89].
- Organisation latérale : à l' opposé, dans une organisation *latérale*, il n'existe pas de gestionnaire unique et chaque tâche est réalisée de manière coopérative.
- Organisation informelle : La configuration intermédiaire et la plus courante d'organisation est la structure informelle dans laquelle cohabitent une certaine hiérarchie induite par des relations d'autorité et des contacts horizontaux directs entre les agents (Figure 2.2).

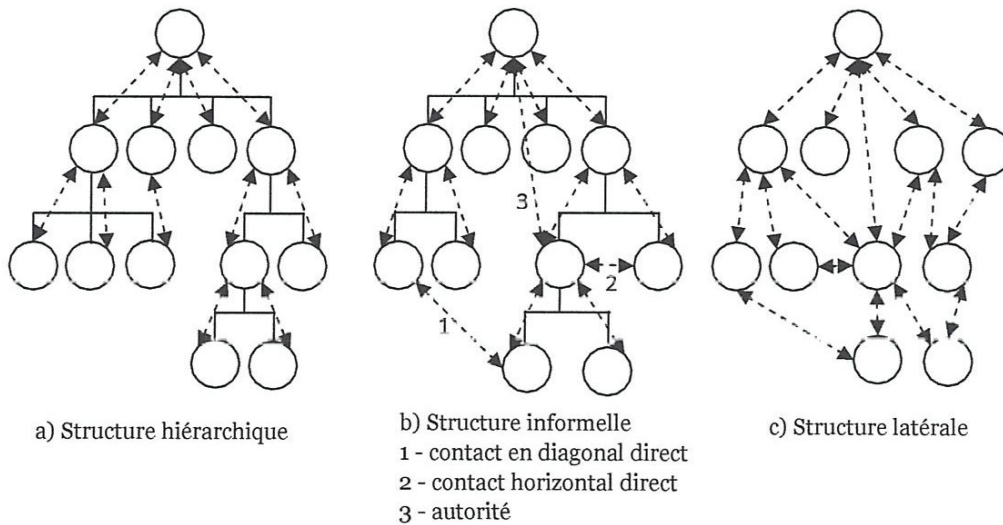


Figure 2.2 : Exemples de structures organisationnelles. [Ossowski, 98]

Bien entendu, il est généralement admis qu'aucune structure organisationnelle n'est appropriée à toutes les circonstances [Decker, 95]. Ainsi, lorsqu'une situation évolue, l'organisation devrait se remettre en cause pour déterminer s'il est bénéfique pour elle de se restructurer [Chaib-Draa 92, Castelfranchi 94, Le Strugeon 95].

II.2.2. Allocation

La résolution de problèmes s'effectue généralement en quatre phases répondant à la question suivante : qui doit faire quoi et comment, en fonction des buts, des compétences des agents et des contraintes contextuelles ? Concernant l'allocation de tâches, celle-ci peut s'effectuer de deux manières [Boissier, 00]: centralisée où un seul agent décompose le problème en sous-problèmes et les répartit entre les autres agents, ou distribuée où chaque agent est capable de décomposer son problème en sous-problèmes et de répartir les tâches associées.

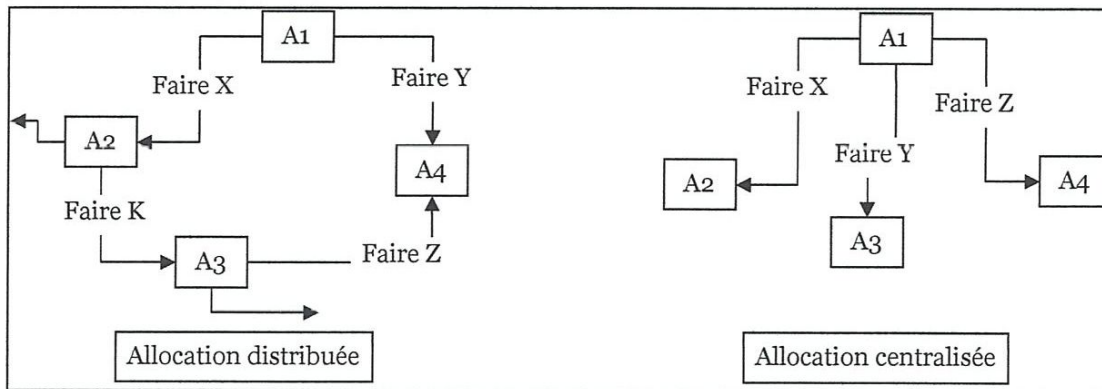


Figure 2.3 : les deux manières d'allocation. [Boissier, 00]

II.2.3. Planification

La planification multi-agents tente de coordonner les actions de *plusieurs agents* de manière à ce qu'un but commun soit atteint [Hendler, 90]. La planification, lorsqu'elle est appliquée à la coordination, consiste à développer un plan explicite qui prend en compte les actions et les interactions des agents dans la réalisation de buts. Elle définit notamment la synchronisation des actions et la gestion des accès concurrents aux ressources. La planification peut être centralisée ou distribuée et peut se décomposer en trois étapes : la construction de plans, la coordination de plans et l'exécution de plans. Un système de planification est alors composé d'un ensemble d'agents pouvant planifier, synchroniser ou exécuter des plans, un même agent pouvant accomplir une seule ou plusieurs de ces tâches (Figure 2.4).

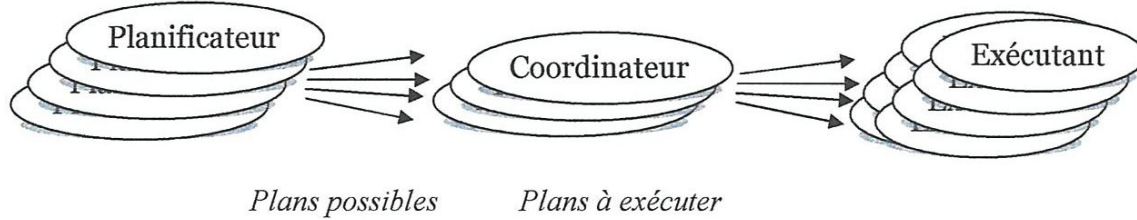


Figure 2.4 : exemple d'un système de planification multi-agents. [Champion, 03]

II.2.4. Négociation

La négociation permet de résoudre les conflits qui peuvent altérer la coopération des agents. Elle a donc une influence sur l'indice de coopération se rapportant à la non-persistance des conflits et a ainsi un impact sur la coopération générale d'un système. Par contre, l'acte de négociation ne semble pas constituer un acte de coopération; il ne répond pas au critère énoncé par J.R. Galliers [Galliers, 88] dans sa définition de la coopération sur le libre choix de l'agent. La négociation peut, en outre, entraîner la non opérationnalité d'un agent (la négociation d'une résiliation) et donc conduire à une forme bien étrange de coopération !

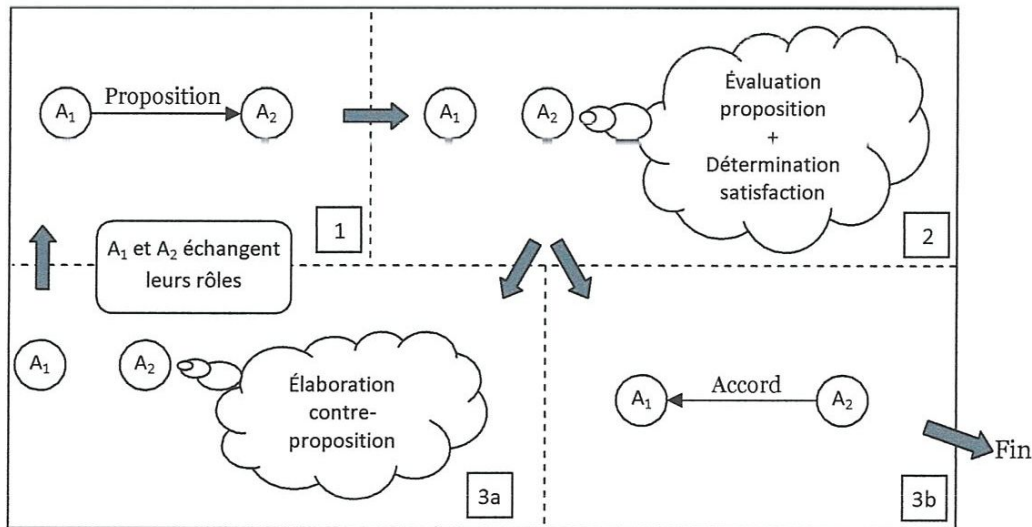


Figure 2.5 : Exemple de protocole de négociation entre deux agents. [Müller, 96]

II.2.5. Coordination réactive

Comme son nom l'indique, ce mécanisme s'intéresse à la coordination des agents non intelligents (réactifs), ceux-ci étant très simples dans leurs structures internes, et ne possédant que des représentations limitées de leurs environnement, nécessitent des mécanismes de coordination répondant à leurs besoins en respectant le but global du système.

Les buts des agents sont soit dépendants comme dans le cas de fourmilière où les actions des uns améliorent celles des autres et augmentent la performance du système, ou bien indépendants comme pour notre cas (situation de carrefour), où le seul problème que les agents peuvent rencontrer est le conflit d'accès à la ressource commune (le carrefour), ils n'ont alors qu'à accomplir leurs tâches tout en s'évitant.

II.3. Conclusion

Les mécanismes de coordinations que nous venons de présenter sont le fruit d'une longue recherche sur le domaine des systèmes multi-agents, ils sont utilisés dans de nombreuses applications à base d'agents et plus particulièrement dans les outils de simulations multi-agents. Nous prenons ces mécanismes comme point de départ pour la résolution de la problématique abordée dans ce mémoire, et pour apporter d'autres éléments de réponse à la problématique, il serait nécessaire de se tourner vers les mécanismes de coordinations déjà utilisés dans les outils de simulation de trafic.

III. MÉCANISMES DE COORDINATION DU TRAFIC AUX CARREFOURS

III.1. Introduction

Après avoir présenté un aperçu des mécanismes de coordination multi-agent, nous exposons maintenant un éventail des mécanismes de coordination mis en œuvre dans le domaine de la simulation de trafic pour les situations de carrefours. Nous commençant, tout d'abord par une petite présentation du trafic routier : sa définition, ses caractéristiques et ses problèmes. Puis nous terminerons par exposer les mécanismes de coordination développés pour les modèles de simulation mathématique et multi-agents de trafic.

III.2. Trafic routier : Présentation et définition

Le trafic routier consiste en un déplacement de véhicules sur une infrastructure « le réseau routier ». Ce réseau a été développé pour répondre aux demandes de déplacement. Que se soit commerciale ou non, depuis quelques dizaines d'années, cette demande est devenue quotidiennement présente et a été complétée par celle liée aux déplacements touristique et beaucoup plus au déplacement domicile- travail qui est devenue de plus en plus importante.

La fin des années cinquante a notamment été marquée par l'apparition des problèmes de congestion dans la plupart des villes, suite à une croissance rapide du trafic urbain automobile, augmentant le volume du trafic véhiculaire avec un taux nettement supérieur à celui de l'augmentation des capacités des routes. Face à cet accroissement constant du trafic, le développement de nouvelles infrastructures n'est plus une solution envisageable. Les nuisances associées à l'explosion du trafic (pollution, perte de temps, etc.) et l'augmentation du nombre d'accidents ne sont plus acceptées par les populations citadines. *[Hadouaj, 01]*

Une spécificité du trafic automobile est essentiellement liée à la conception de l'infrastructure qui est conçue, selon une demande projetée, pour répondre à un optimum collectif mais que chaque individu réalise son déplacement en cherchant à atteindre son optimum individuel, ce qui est souvent antagoniste avec l'optimum collectif. Les deux définitions ci-dessous montrent bien le double aspect individuel et collectif du trafic, l'aspect individuel étant représenté par le fait que le trafic est formé par différents véhicules et l'aspect collectif par le fait que le trafic est interprété comme un fluide (un flux de véhicules) *[Espié, 02]*.

Définition 1 : Trafic routier *[Hachette, 03]*

(Anglicisme) Circulation de nombreux véhicules sur un itinéraire, un réseau.

Définition 2 : Circulation *[Hachette, 03]*

Mouvement d'un fluide qui circule.

Cette particularité fait du trafic automobile un phénomène difficile à comprendre, à analyser et à optimiser, et même si les modèles de simulation constituent des outils essentiels pour son analyse et sa compréhension, ce phénomène possède un certain nombre de caractéristiques qui le rendent également difficile à modéliser.

III.3. Caractéristiques

✚ Distribution

Le trafic routier peut être défini comme étant le résultat des déplacements des véhicules sur le réseau routier. Ce phénomène résulte en fait de l'interaction de chaque usager de la route avec son environnement, constitué par l'infrastructure routière et les autres usagers, ainsi qu'avec la réglementation. Le trafic routier est donc un phénomène naturellement distribué au sein duquel les interactions entre les différents participants constituent le cœur du fonctionnement.

✚ Complexité

La complexité d'un système est définie comme étant l'imprévisibilité potentielle (non calculable à priori) des comportements de ce système, liée en particulier à la dynamique qui affecte le fonctionnement de ses composants, et qui suscite des phénomènes d'émergence certes intelligibles, mais pas toujours prévisibles [*Fleurance, 12*]. Le phénomène du trafic routier est un phénomène complexe car un de ses composants essentiels (le conducteur) a parfois un comportement imprévisible et qu'il se trouve potentiellement en interaction avec plusieurs autres usagers.

✚ Dynamique

Les phénomènes du trafic sont fortement dynamiques. En effet, le nombre de participants inclus dans le système varie largement dans le temps. Un grand nombre de participants actifs, présents dans le système en même temps, se traduit par un grand nombre d'interactions simultanées. Des observations montrent qu'en cas de trafic dense, une petite perturbation peut être amplifiée et se transformer en congestion. Un certain nombre de recherches montrent que le trafic est caractérisé par un comportement chaotique [*Forbes & al., 58*], [*Edie & Foot, 60*].

✚ Hétérogénéité

Le système du trafic routier fait intervenir des participants variés. On peut citer notamment : les conducteurs, le législateur et le concepteur de l'infrastructure. Les conducteurs sont hétérogènes (débutants et expérimentés), et utilisent des véhicules aux caractéristiques variées (poids lourds et véhicules légers, par exemple). Les conditions météorologiques sont un facteur supplémentaire d'hétérogénéité des comportements.

III.4. Les modèles de simulation de trafic

Maintenant, nous allons exposer les modèles de simulation du trafic routier, mais avant cela, il paraît nécessaire de définir ce qu'est la simulation en premier lieu. Selon le dictionnaire Hachette de la langue française la simulation est définie comme suit :

- Représentation mathématique et/ou informatique d'un certain nombre d'éléments pouvant intervenir sur un système afin de l'étudier.
- Reproduction expérimentale des conditions réelles dans lesquelles devra se produire une opération complexe. **[Hachette, 03]**

La simulation est aujourd'hui un outil efficace employé pour l'analyse, la reproduction et la prévision d'une large variété de problèmes, difficiles à étudier par d'autres moyens trop chers (expérimentation) ou dangereux si l'homme fait parti du système étudié. Le fait qu'elle permet d'effectuer des études sur un système isolé, cet outil est devenu d'emploi courant. Ainsi, c'est dans ce contexte favorable que l'intérêt porté aux modèles de simulation de trafic s'est accru. Que ce soient les organismes d'études sur les transports, les universités et les centres de recherche, de nombreux pôles de recherche sont aujourd'hui actifs.

Les modèles de simulation sont souvent classés en deux grandes familles : **[Hadouaj, 01]**

1. Les modèles macroscopiques, qui s'inspirent des théories de l'écoulement des fluides et qui représentent le trafic sous forme de flux.
2. Les modèles microscopiques qui représentent plus finement le trafic, en traitant les véhicules individuellement.

Moyen d'études Granularité	Théorie de trafic	Études de psychologie de la conduite
Modèles macroscopiques	Tous les modèles macroscopiques	
Modèles microscopiques	Modèles basés sur la loi de poursuite, modèles classiques, modèles basés sur les automates cellulaires	Modèles comportementaux

Tableau 2.1 : classification des modèles de simulation du trafic routier

III.4.1. Les modèles basés sur les théories du trafic

III.4.1.1. Les modèles de simulation macroscopiques

Les modèles de simulation macroscopiques représentent le trafic d'une manière non détaillée. Ces modèles décrivent le trafic comme étant un flux sans avoir à distinguer entre ces composants (véhicules, infrastructure routière,... etc.). Ces modèles sont basés sur la théorie des fluides et représente un flux de trafic de manière globale en mettant en jeu son débit, sa densité et sa vitesse moyenne. [Hadouaj, 01] Les actions qu'entreprend chaque véhicule de manière individuelle sont représentées implicitement. Ceci a donné naissance à des modèles avec un nombre d'équations limité et relativement facile à gérer. On cite notamment deux types de modèles dans le cadre desquels s'inscrivent la plupart des modèles macroscopiques:

✚ Le modèle proposé par Lighthill et Whitham (modèle LW)

Le modèle LW repose sur l'hypothèse que la vitesse moyenne du trafic prévue à un emplacement x et au moment t peut être décrite comme étant une fonction de la densité de trafic. De même le débit est une fonction de la densité du trafic. Ce modèle reproduit un nombre remarquable de phénomènes réels de trafic comme les vitesses croissantes avec densités décroissantes ou la formation d'ondes de choc [Lighthill & Whitham, 55]. Cependant le modèle LW inclut un certain nombre de simplifications assez grossières et ne peut reproduire certains phénomènes dynamiques réels observés sur autoroute. En effet, l'hypothèse selon laquelle la vitesse moyenne est calculée signifie qu'après l'enlèvement d'un barrage routier, les véhicules sont censés avoir une accélération infinie pour augmenter instantanément leur vitesse de zéro à la vitesse libre [Papageorgiou, 98]. Cette absence de réalisme rend ce modèle inadéquat pour certaines utilisations telle que la conception optimale et le test en simulation de stratégies de contrôle d'accès et autres mesures de contrôles.

✚ Le modèle de Payne

Le modèle de Payne est une extension du modèle LW, il essaye d'améliorer son niveau de précision. Le modèle de Payne dérive de considérations sur la circulation en file, qui prennent en compte le temps de réaction du conducteur, ce qui conduit à une équation dynamique de la vitesse moyenne, au lieu de l'équation statique utilisée dans les modèles LW. Cela peut permettre de décrire l'écoulement du trafic de façon plus réaliste, en réduisant ou en évitant les défauts du modèle LW. [Payne, 71]

III.4.1.2. Les modèles de simulation microscopiques

Les modèles de simulation microscopiques représentent le trafic de manière plus fine. Les variables qu'ils manipulent sont inhérentes au véhicule: vitesse, accélération, distance de sécurité. Ils décrivent aussi bien le comportement de chaque entité du système que les interactions entre ces entités. Le flux de trafic qu'ils reproduisent résulte de l'interaction des comportements modélisés. [Hadouaj, 01]. Dans ce qui suit, Nous mettons en évidence certains d'entre eux et plus spécialement ceux basés sur les théories de trafic.

✚ Modèles basés sur la loi de poursuite

Les modèles basés sur la loi de poursuite représentaient la première génération des modèles microscopiques, en se basant sur le concept de « distance de sécurité », ces modèles définissent le mouvement d'un véhicule par rapport à un ou plusieurs véhicules qui le précèdent, ce qui élimine le comportement de dépassement. [Pipes, 53].

Un deuxième type de modèles est basé sur le concept de *stimuli-réponse*. Ici, on considère qu'il existe une relation linéaire entre la réponse (un freinage ou une accélération) et le stimulus (la distance par rapport à la voiture précédente ou la vitesse relative à cette voiture), sous la forme : réponse = sensibilité * stimulus. Ce type a été critiqués pour deux raisons, d'une part, le conducteur suiveur réagit à de très petites variations de vitesses. D'autre part, le modèle suppose que la réponse est nulle quand la différence de vitesse disparaît. Ceci ne peut être vrai, si la distance, séparant les deux véhicules consécutifs, est trop petite ou trop large.

[Chandler & al., 58]

Pour contourner ce problème, un autre type de modèles appelés modèles *psycho-spacing* a été conçu. Au lieu d'imposer directement une relation mathématique, ces modèles se basent sur des considérations psychologiques de perception pour montrer que le conducteur ne réagit pas à tous stimuli qu'il perçoit. Par exemple : si l'espacement entre deux véhicules est large, le conducteur suiveur n'est pas influencé par la différence des vitesses, aussi si cet espacement est petit, quelques combinaisons des vitesses relatives et de la distance ne conduisent pas à une réponse du véhicule suiveur.

[Todosiev & Barbosa, 64]

✚ Modèles classiques

Avec l'évolution matérielle des ordinateurs, des modèles de simulation microscopiques plus complexes ont vu le jour. Le comportement du conducteur est désormais décrit par un grand ensemble de règles de production du type *si-alors*. A chaque nouveau pas de simulation, la position, la vitesse et l'accélération de chaque véhicule sont calculées en fonction du comportement du conducteur ainsi que des caractéristiques du véhicule. La plupart de ces modèles modélisent à la fois un comportement de poursuite et un comportement de changement de voie. Un changement de voie de chaque véhicule du flux est défini par le biais d'une description détaillée des différentes étapes du processus de décision du conducteur. Nous pouvons trouver plusieurs outils dans cette catégorie de modèles, mais le plus marquant d'entre eux reste le logiciel CASIMIR [Cohen, 90].

✚ Modèles basés sur les automates cellulaires

Les automates cellulaires présentent un outil très important pour modéliser et de simuler le trafic routier, car ils sont extrêmement rapides et présentent un comportement dynamique et complexe suffisamment pour reproduire des phénomènes non stables. Les simulateurs de trafic routier basés sur les automates cellulaires sont venus récemment s'ajouter aux modèles de simulation microscopiques [Nagel, 96]. Ces modèles discrétisent l'espace routier un ensemble de cellules ayant une taille identique. Chaque cellule est soit occupée par un véhicule, soit vide. Chaque véhicule possède une vitesse entière comprise entre 0 et V_{max} , qui représente le nombre de cellules avec lequel le véhicule avance à chaque mise à jour. L'état de la cellule sera défini égal à -1, si la cellule est vide, et à la vitesse v , si elle contient un véhicule. Le nombre de cellules vides devant le véhicule est dénoté Δx .

A partir d'une configuration arbitraire, une mise à jour du système consiste à suivre les quatre étapes suivantes, appliquées simultanément à tous les véhicules :

- Accélération : si $v < V_{max}$ et s'il y a assez d'espace devant le véhicule ($v < \Delta x$),
- Décélération : si le véhicule précédent est trop près ($v > \Delta x$), alors la vitesse est réduite à Δx ;
- Comportement aléatoire : avec la probabilité $p \in [0 ; 1]$ fixée, la vitesse du véhicule (si elle est positive) est réduite de 1 ;
- Mouvement : enfin, le véhicule est avancé de v cellules.

L'application des automates cellulaires à la dynamique du **trafic routier** a provoqué une intense activité de recherche principalement aux États-Unis, mais aussi en Allemagne et dans certains groupes de recherche français et suisses. Cependant, la vérification de ces modèles, par rapport aux autoroutes et aux réseaux urbains a montré des résultats peu réalistes au niveau macroscopique [*Nagel & al., 99*], [*Esser & al., 99*].

III.4.2. Les modèles comportementaux

Les modèles comportementaux sont peu nombreux et s'inscrivent dans le cadre des modèles microscopiques. Leur objectif est de reproduire un comportement de conducteur relativement réaliste. Pour cela ces modèles s'appuient sur des études en psychologie de la conduite qui constituent le moyen unique d'appréhender les décisions du conducteur et d'expliquer son comportement. Notons également que, dans le cadre de ces modèles il faut non seulement modéliser le comportement réaliste du conducteur (microscopique), mais aussi obtenir un phénomène au niveau global (macroscopique) qui obéit aux lois d'écoulement de trafic. Dans cette catégorie nous retrouvons le fameux modèle ARCHISIM et bien d'autres. [*Hadouaj, 01*]

III.5. Conclusion

Dans cette partie, on a introduit le trafic routier par ces généralités, en commençant par sa définition et sa structure, en suite ses caractéristiques et ses problèmes. Et enfin, on a présenté les différents modèles de simulation de trafic, en les classant sous différentes catégories selon le moyen d'étude utilisé : théorie des trafics ou psychologie de conduite, et le niveau de granularité concernant les détails de comportement : macroscopique ou microscopique.

CONCLUSION

Ce chapitre, a exposé la problématique de la coordination dans plusieurs domaines. En premier lieu, une étude globale de la coordination a été effectuée, ensuite les principaux mécanismes de coordination multi-agents ont été présentés. Enfin, nous avons présenté les différents mécanismes utilisés pour coordonner le trafic aux carrefours. Cette étude a engendré comme conclusion que dans une simulation de trafic routier, la coordination n'a lieu que dans les situations de carrefour, où les mobiles doivent gérer les conflits d'accès à la ressource commune : « l'espace routier associé aux carrefours » par un mécanisme – forcément - d'allocation de ressources.

Les mécanismes d'allocation de ressources peuvent être implémentés de plusieurs manières. Mais pour conserver une certaine unité et une certaine logique, il semble intéressant de se tourner vers un mécanisme économique d'allocation. Une théorie éprouvée a pour objectif la gestion des conflits à l'aide de gains et de coûts : la théorie des jeux. Cette théorie mathématique est déjà utilisée par nombre de mécanismes de coordination multi-agent, notamment des mécanismes par négociation, et peut être à même de servir de cadre à un mécanisme d'allocation. Le chapitre suivant introduit la théorie des jeux et le cadre dans lequel elle peut intervenir dans la conception d'un mécanisme de coordination multi-agent.

CHAPITRE III – LA THÉORIE DES JEUX

INTRODUCTION

Le premier chapitre de ce mémoire a exposé un état de l'art sur les systèmes multi-agents, le deuxième a été consacré pour apporter une étude présentative de la problématique de coordination en général, en dévoilant les mécanismes déjà utilisés dans le domaine des SMA et de la simulation du trafic. Ce chapitre sera destiné à la conception d'un mécanisme de coordination répondant à notre problématique. Mais avant cela il paraît nécessaire d'analyser les mécanismes présentés dans le chapitre précédent, donc notre travail sera – ici – divisé en deux parties, la première comprendra une analyse critique des mécanismes de coordination existants et vus précédemment, dans la perspective de coordonner les actions des mobiles simulés aux carrefours. La deuxième partie sera consacrée à présenter la théorie des jeux comme cadre pour la coordination multi-agents.

I. ANALYSE DES MÉCANISMES DE COORDINATION

I.1. Caractéristique du mécanisme à concevoir

Qu'ils soient issus de la théorie multi-agents ou spécifiques au domaine de la simulation de trafic routier. Cette analyse est destinée à déterminer les mécanismes qui seraient susceptibles d'être mis en œuvre pour coordonner le trafic simulé aux carrefours. En se basant sur les caractéristiques du trafic routier, présentées précédemment (Chapitre 02 – III.3.), on peut dire que le mécanisme de coordination à implémenter doit :

- **Être distribué** : Chaque agent doit seul, de manière autonome, coordonner ses actions avec les autres. Et ne doit pas faire de différence entre un mobile autonome simulé et un véhicule conduit par un sujet humain.
- **Être générique** : Le comportement non normatif des conducteurs leur permet de répondre à tout type de situation. De même un mécanisme de coordination non normatif doit pouvoir potentiellement répondre à toutes les situations.

- **Gérer l'espace routier** : Le mécanisme de coordination doit permettre une utilisation fine de l'espace, notamment celui situé à l'intérieur d'un carrefour.
- **Être temps réel** : Le fait que nos travaux trouvent une application dans la simulation de conduite qui a des besoins de plus en plus importants et en particulier sur le nombre de véhicules à simuler impose un mécanisme de coordination le plus rapide possible et optimal au niveau du temps de calcul.
- **Être ouvert** : Une chose est certaine, le nombre de véhicules se croisant dans un carrefour est constamment changeant, on peut donc voir le carrefour comme lieu d'un système ouvert. Ceci implique que le mécanisme de coordination à mettre en œuvre doit être adaptatif et de souple face aux nombreux changements possibles.
- **Être le plus possible réalistes** : le phénomène à produire doit être le plus réaliste possible. Par conséquent, nous nous fixons comme démarche de favoriser les mécanismes fondés sur des hypothèses réalistes pour la coordination des mobiles.

Il est maintenant possible d'effectuer une analyse des divers mécanismes précédemment présentés, en fonction des caractéristiques du mécanisme venant d'être exposées.

I.2. Analyse des mécanismes multi-agents

Les mécanismes de coordination multi-agents présentés dans la deuxième partie du chapitre précédant sont maintenant repris et analysés.

I.2.1. Structuration organisationnelle

La structuration organisationnelle est une méthode qui convient parfaitement bien au trafic routier, qui est régi par un règlement : le code de la route. Celui ci fournit un cadre pour les interactions à travers la définition des relations d'autorité et des règles de priorité, ce qui introduit aux mobiles une hiérarchie relativement souple et dynamique. Il est, de ce fait, possible de mettre en œuvre un mécanisme de coordination par règlement en implémentant les règles de conduite imposées par le code de la route. Toutefois, ce type de mécanisme met en place une coordination limitée (c'est-à-dire qu'il ne prend en compte que les cas les moins complexes) mais permet d'éliminer (au moins partiellement) un nombre important de conflits possibles. Ce mécanisme est donc nécessaire mais n'est absolument pas suffisant.

I.2.2. Allocation

La gestion de trafic routier aux carrefours est un problème d'allocation de ressources puisque plusieurs véhicules peuvent accéder à la même zone du carrefour et causer ainsi des coalitions. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre un mécanisme de coordination par allocation de ressources. Ce mécanisme doit être distribué et en s'appuyant sur une structure organisationnelle de type latérale, il peut assurer une grande fiabilité et extensibilité. Ce type de mécanisme présente donc les caractéristiques du mécanisme souhaité : il est distribué et prend en compte les systèmes ouverts. Le seul problème restant est celui lié à la cohérence, les agents pouvant avoir beaucoup de mal à se synchroniser et, surtout, à détenir des informations cohérentes les uns par rapport aux autres.

I.2.3. Planification

Vu la contrainte forte, relative au temps réel et au fait que les mobiles présents à un carrefour changent constamment, la planification multi-agents semble beaucoup trop lourde à mettre en place et à gérer.

I.2.4. Négociation

D'après les conditions qu'on a définies précédemment, le protocole de négociation est impossible à définir. Car, tout d'abord, avec un mécanisme fondé sur la négociation, il peut s'agir d'un processus extrêmement long ce qui ne satisfait pas la contrainte du temps réel. Ensuite, il n'est pas possible d'affirmer que les conducteurs négocient, d'une part, la conduite est généralement une tâche de nature compétitive et, d'autre part, les différentes parties concernées ne verbalisent pas de demandes.

I.2.5. Coordination réactive

La conduite est non seulement une activité cognitive mais également réactive. Les mobiles sont d'ailleurs des agents à architecture hybride: ils peuvent ainsi anticiper les situations tout en étant capables de réagir rapidement afin d'éviter une éventuelle collision.

Les mobiles utilisent donc un mécanisme de coordination réactive très simple pour gérer ce type de situations urgentes qui peuvent notamment survenir à un carrefour. Par contre, un mécanisme de coordination réactive ne peut être d'une véritable utilité pour coordonner les actions de mobiles éloignés de plus de quelques mètres, il ne peut donc être perçu dans ce cas.

I.3. Analyse des mécanismes de coordination au carrefour

I.3.1. Modèles macroscopiques

En général, les équations des modèles macroscopiques d'écoulement de trafic reflètent soit des améliorations et des similitudes de la notion intuitive de comptage des véhicules (par exemple la définition des variables de flux telle que la vitesse moyenne), soit des approximations plus ou moins grossières des relations empiriques (par exemple la relation entre vitesse et densité). Par conséquent, les théories de trafic ne peuvent avoir qu'un pouvoir descriptif suffisant, où le caractère suffisant dépend des utilisations spécifiques de ces théories [Papageorgiou, 98]. Dès lors, le champ d'application d'un modèle macroscopique est réduit. Il se limite uniquement à quelques applications bien déterminées.

En outre, ces modèles s'avèrent ne pas être très adaptés à l'analyse des caractéristiques microscopiques du flux. En effet, leur simplicité entraîne une perte importante d'information. Certaines caractéristiques du trafic, décrites dans le chapitre précédent (chapitre 02 - III.3), sont peu ou pas du tout prises en compte par ces modèles. Par exemple, la majorité de ces modèles ne distingue pas entre poids lourds, véhicules légers et bus et considèrent le trafic routier comme étant une entité globale, masquant du même coup la complexité de ce phénomène. Cette description non détaillée du flux les rend inapplicables à la modélisation des interactions et la dynamique au niveau microscopique du comportement des conducteurs.

I.3.2. Modèles microscopiques

Le fait que le comportement du conducteur humain soit complexe le rend difficile à observer. Pour le modéliser, les modèles de simulation microscopiques font intervenir un grand nombre de paramètres et sont par conséquent difficiles à valider et à calibrer.

En outre, dans un modèle de simulation microscopique, chaque véhicule est décrit individuellement, par conséquent ces modèles nécessitent un temps de calcul assez long et surtout quand le nombre de véhicules simulés devient important. Dès lors, la simulation de grand réseau par le biais de ces modèles n'est pas très pratique. Cependant, avec l'évolution continue de la technologie des ordinateurs, cet argument prendra une moindre importance.

De plus, dans cette catégorie de modèles, la modélisation du comportement du conducteur est basée sur une reproduction des lois microscopiques de trafic (par exemple la loi de poursuite), ce qui donne une approximation de ce comportement. Une modélisation pareille est forcément pauvre et repose sur une simplification de la réalité. Par conséquent, le comportement du conducteur modélisé ne reflète pas la complexité par laquelle est caractérisé le comportement du conducteur réel. Dans ce qui suit, on présente quelques exemples de ces modèles :

✚ Dans CASIMIR, la description du comportement du conducteur se limite à la définition de son comportement dans une file. Chaque véhicule se déplace en appliquant une loi de poursuite. Notons que cette loi n'est pas toujours appliquée dans la réalité. *[Cohen, 89]*

✚ Dans SEVERE, le déroulement de la simulation sur un tronçon se fait globalement comme suit: en parcourant un tronçon, les véhicules se déplacent soit librement, soit en file suivant une loi de poursuite, soit en changeant de voie. Le modèle est basé sur les hypothèses simplificatrices suivantes:

- Un changement de voie ne peut avoir lieu que si toutes les contraintes de sécurité sont vérifiées.
- Dans le cas de carrefour, un véhicule ne décide d'entrer sur le carrefour que s'il n'existe pas de mouvements antagonistes prioritaires et qu'il y a une place dans une file interne associée au tronçon de sortie du carrefour.
- Tous les conflits générés au moment de la traversée d'un carrefour ou au moment d'un changement de voie sont gérés par un système centralisé. Le véhicule n'a aucune représentation de la géométrie de la route ou des notions du trafic. *[Aron, 87]*

✚ Dans HUTSIM, le mécanisme de décision du véhicule est simplifié. Il concerne uniquement la détermination de la vitesse en fonction de l'état du trafic. Le véhicule a pour objectif d'atteindre sa destination et de rouler à sa vitesse préférentielle, définie au moment de sa création. Il interagit avec les autres éléments de la simulation tels que les feux, les panneaux de limitation de vitesse, les piétons et les autres véhicules. Ces éléments peuvent temporairement obliger le véhicule à diminuer sa vitesse ou à s'arrêter jusqu'à ce que la situation change. cette modélisation est donc basée sur des règles logiques. *[Kosonen, 95]*

Rappelons que le comportement du conducteur constitue un élément clé pour l'appréhension du phénomène du trafic routier. Naturellement, les modèles de ce type sont limités quant à l'explication et à la compréhension qu'ils fournissent du phénomène du trafic.

I.3.3. Modèles comportementaux

Certains automaticiens annoncent des simulations comportementales avec des comportements robotique ayant pour objectif de concevoir des robots capables de conduire un véhicule d'une manière automatique. Ainsi, ces modèles définissent un comportement normatif et stéréotypé, différent du comportement humain. Par conséquent, les situations de trafic produites par ces modèles sont éloignées de la réalité et ne peuvent servir à expliquer le phénomène du trafic.

I.4. Conclusion

Dans cette partie, on a recouru à une analyse critique de tous les mécanismes de coordination présentés dans le chapitre précédent. Cette analyse fait ressortir qu'aucun mécanisme existant ne peut être repris intégralement. Il faut, par conséquent, se tourner vers la conception et le développement d'un mécanisme original. Toutefois, quelques éléments issus de l'analyse qui a été menée sont à considérer et à intégrer dans notre modèle.

II. LA THÉORIE DES JEUX

II.1. Introduction

Pour coordonner leurs actions, les mobiles doivent gérer les conflits qui apparaissent entre eux. Ces conflits sont des conflits d'accès à une ressource : l'espace routier associé aux carrefours. Le mécanisme doit donc être un mécanisme d'allocation de ressources car plusieurs mobiles peuvent simultanément avoir accès à un endroit précis d'un carrefour.

Les mécanismes d'allocation de ressources peuvent être implémentés de plusieurs manières. Mais pour conserver une certaine unité et une certaine logique, il semble intéressant de se tourner vers un mécanisme économique d'allocation. Une théorie éprouvée a pour objectif la gestion des conflits à l'aide des gains et des coûts : la théorie des jeux. Cette théorie mathématique est déjà utilisée par un grand nombre de mécanismes de coordination multi-agents, notamment ceux basé sur la négociation, elle peut même servir de cadre pour un mécanisme d'allocation. Cette partie montre que les jeux peuvent être un cadre pour la coordination du trafic routier aux carrefours. Elle introduit tout d'abord la théorie des jeux par son historique et ses principes. Ensuite, un rapide état de l'art concernant les types de jeux, leurs représentations et les concepts de solution.

II.2. Historique

L'approche mathématique moderne de l'étude des conflits d'intérêts, nommée théorie des jeux, est souvent attribuée à *John Von Neumann*. Son article « *Zur Theorie der Gesellschaftspiele* » publié en 1928 est considéré comme étant à la base de toute cette théorie, même si les notions étudiées avaient déjà été présentées par un mathématicien français, *Emile Borel* dans une série d'articles. C'est pourtant bien *Von Neumann* qui, grâce à sa démonstration du théorème du min-max, a donné la respectabilité mathématique à cette théorie. De façon à pouvoir la répandre au-delà du monde des mathématiciens, il a persévéré en signant avec l'économiste *Oskar Morgenstern*, l'ouvrage [*Neumann, 47*] qui aujourd'hui encore sert de base, sinon de référence.

Bien que les débuts de cet ouvrage aient été difficiles, du fait de la révolution dans les sciences économiques que les auteurs prétendaient apporter, la théorie des jeux est aujourd'hui très répandue et utilisée, non seulement en économie, mais également par toute une classe d'autres sciences dans lesquelles l'étude de situations conflictuelles est pertinente : informatique, sociologie, biologie, etc.

En informatique, et plus précisément en intelligence artificielle, les situations de conflits sont très fréquentes et l'apport de la théorie des jeux a été capital. On peut noter, par exemple, que pendant longtemps, les chercheurs ont essayé de construire des programmes capables de jouer aux échecs et, dans la mesure du possible, de bien jouer. Jusqu'à aujourd'hui, la majorité de ces algorithmes est fondée sur l'application du théorème du min-max. Les bases d'un grand nombre d'algorithmes d'IA sont ainsi issues de la théorie des jeux. [*Champion, 03*]

Depuis la naissance de la discipline et jusqu'à aujourd'hui, la théorie n'a cessé d'évoluer. Le but initial de ses fondateurs était de donner un sens à la notion de rationalité (définie dans la partie suivante du texte), notamment en ce qui concerne les interactions entre individus. C'est dans cet esprit que, dès le début, de nombreuses améliorations ont été apportées à la théorie des jeux. On peut notamment citer la théorie de l'utilité [*Barbera, 99*], la généralisation à des jeux à plus de deux joueurs, l'introduction d'un joueur représentant la Nature pour prendre en compte les éléments extérieurs, ou encore les jeux répétés [*Auman 95, Carlsson 98*] permettant d'étudier la stabilité et l'efficacité des stratégies.

II.3. Typologie

La théorie des jeux est un ensemble d'outils pour analyser les situations dans lesquelles ce qu'il est optimal de faire pour un agent dépend des anticipations qu'il forme sur ce qu'un ou plusieurs autres agents vont faire. L'objectif de la théorie des jeux est de modéliser ces situations, de déterminer une stratégie optimale pour chacun des agents, de prédire l'équilibre du jeu et de trouver comment aboutir à une situation optimale. La théorie des jeux classe les jeux en catégories en fonction de leurs approches de résolution. Ceux les plus ordinaires sont :

II.3.1. Jeux coopératifs et jeux non coopératifs

Un jeu coopératif est un principe de jeu dans lequel tous les joueurs gagnent ou perdent ensemble. Les actions des joueurs doivent donc être menées conjointement ou en concertation pour atteindre un objectif commun. Au lieu de jouer équipe contre équipe (comme dans un match de football par exemple) ou les uns contre les autres (jeux vidéo), les joueurs tentent de réaliser un objectif ou de résoudre une énigme ensemble. *[Bernard, 95]*

II.3.2. Jeux simultanés et jeux séquentiels

Dans un jeu simultané, les joueurs décident en même temps de leur stratégie. Au contraire, dans un jeu séquentiel, on peut spécifier l'ordre des décisions de sorte qu'un joueur peut décider de sa stratégie conditionnellement à ce qu'ont joué les autres joueurs précédemment. Par exemple, le dilemme du prisonnier, le jeu Pierre-feuille-ciseaux et le jeu du duopole de Cournot sont des jeux simultanés. Le jeu du mille-pattes est un jeu séquentiel. *[Nash, 51]*

II.3.3. Jeux finis

On dit qu'un jeu est fini lorsque l'ensemble des stratégies de chacun des joueurs est fini. Le dilemme du prisonnier est un jeu fini car chacun des joueurs n'a que deux stratégies possibles. En revanche, le jeu du duopole de Cournot n'est pas un jeu fini, car chaque entreprise choisit la quantité de bien qu'elle produit dans l'ensemble des réels positifs. *[Nash, 51]*

II.3.4. Jeux à somme nulle et jeux à somme positive

On appelle jeu à somme nulle ou jeu strictement compétitifs, les jeux à deux joueurs dans lesquels l'intérêt de l'un des deux joueurs est strictement opposé à l'intérêt de l'autre joueur. Si les préférences des joueurs sont représentées par une fonction de gain ou une fonction d'utilité, alors la somme des deux fonctions est toujours égale à 0.

La théorie des jeux à somme nulle a été essentiellement développée par Morgenstern et Von Neumann 1944. Les échecs ou le poker sont des jeux à somme nulle car les gains de l'un sont très exactement les pertes de l'autre. Le jeu Pierre Feuille Ciseau est un exemple de jeu à somme nulle.

[Morgenstern & Neumann, 44]

II.3.5. Jeux répétés

La répétition d'un jeu, avec connaissance des résultats intermédiaires, change souvent fondamentalement son déroulement, par exemple, il peut être utile de prendre ponctuellement le risque de perdre pour tester les autres joueurs, et mettre en place des stratégies de communication par les coups joués. Il se développe également des phénomènes de réputation qui vont influencer les choix stratégiques des autres joueurs. Dans le dilemme du prisonnier, le fait de savoir qu'on va jouer plusieurs fois avec un dur qui n'avoue jamais mais se venge cruellement, ou avec un lâche qui avoue toujours, change radicalement la stratégie optimale. Enfin, le fait que le nombre total de parties soit connu à l'avance ou non peut avoir des effets importants sur le résultat.

[Nash, 51]

II.3.6. Information

On dit qu'un jeu est à information complète si chaque joueur connaît lors de la prise de décision :

- ses possibilités d'action
- les gains résultants de ces actions
- les possibilités d'action des autres joueurs
- les motivations des autres joueurs

Les jeux en information incomplète sont des situations où l'une des conditions n'est pas vérifiée. Ce peut être parce qu'une des motivations d'un acteur est cachée. Ces jeux sont aussi appelés jeux bayésiens.

On parle de jeu à information parfaite dans le cas de jeu sous forme extensive, où chaque joueur a une connaissance parfaite de toute l'histoire du jeu.

Un jeu à information incomplète est aussi à information imparfaite. Les jeux à information complète peuvent être à information imparfaite soit du fait de la simultanéité des choix des joueurs, soit lorsque des événements aléatoires sont cachés à certains joueurs.

John Harsanyi a présenté une méthode permettant de transformer des jeux à information incomplète en jeux à information complète mais imparfaite : au début du jeu, la Nature effectue un choix de règles parmi les possibles, et les joueurs n'ont qu'une connaissance partielle de ce choix. Cette transformation introduit une subtilité dans la classification des jeux où le hasard intervient, séparant ceux où le hasard intervient uniquement avant le premier choix (assimilables à un jeu à information incomplète sans hasard), de ceux où le hasard intervient (aussi) après un choix d'un joueur. *[Rasmussen, 89]*

II.3.7. Mémoire

On distingue aussi les jeux à mémoire parfaite et à mémoire imparfaite. Les jeux à mémoire parfaite sont des situations où chaque joueur peut se rappeler à tout moment de la suite de coups qui ont été joués précédemment, au besoin en notant au fur et à mesure les coups joués. Les jeux à mémoire imparfaite supposent une amnésie de la part des joueurs.

Les jeux de guerre sont des exemples de jeux à mémoire imparfaite si les commandements de zones opérationnelles ne parviennent pas à communiquer entre eux ou avec l'État-major et donc n'ont pas trace des mouvements déjà effectués par les troupes amies lorsqu'elles doivent décider de leurs propres mouvements.

II.3.8. Jeux déterminés

Les jeux de Nim forment un cas particulier de jeu à somme nulle, sans intervention du hasard et dans la plupart des cas à nombre de situations finies. Dans leur cas particulier, la théorie des graphes fournit un outil plus utile que la théorie des jeux à proprement parler. La notion de noyau du jeu (ensemble des nœuds depuis lesquels la victoire est assurée si l'on y parvient en cours de jeu et qu'on joue de façon optimale ensuite) y est caractérisée.

II.4. Représentations des jeux

Un jeu est défini par l'ensemble des joueurs, l'ensemble des stratégies possibles pour chacun des joueurs et la spécification des paiements ou des utilités des joueurs pour chaque combinaison de stratégies. Les jeux coopératifs sont généralement présentés sous la forme de fonction caractéristiques alors que les jeux non coopératifs sont représentés sous forme normale ou sous forme extensive.

II.4.1. Forme normale

Un jeu sous forme normale (ou jeu sous forme stratégique) est défini par :

- l'ensemble des joueurs,
- l'ensemble des stratégies possibles pour chacun des joueurs,
- les préférences de chaque joueur sur l'ensemble des combinaisons stratégiques possibles.

L'ensemble des joueurs doit être fini. L'ensemble des stratégies de chacun des joueurs peut être fini comme dans le dilemme du prisonnier où chaque joueur décide de coopérer ou non, ou infini comme dans le duopole de Cournot où chaque joueur choisit une valeur quelconque dans l'ensemble des réels positifs en tant que quantité de bien à produire. Les préférences peuvent aussi être représentées par une fonction d'utilité ou une fonction de gain. [Rubinstein & Osborne, 94] Quand on représente un jeu sous forme normale, on fait l'hypothèse implicite que chaque joueur choisit sa stratégie sans avoir connaissance des choix des autres joueurs.

[Murat, 00]

II.4.1.1. Matrice des gains

Dans un jeu à deux joueurs avec un ensemble fini de stratégies pour chacun des deux joueurs, comme par exemple le dilemme du prisonnier, il est courant de représenter le jeu sous sa forme normale à l'aide d'une matrice des gains ou matrice des paiements.

Il s'agit d'un tableau à double-entrée qui énumère sur chaque côté les stratégies possibles des joueurs respectifs. Dans la case à la croisée de deux stratégies, on note le couple de gains des deux joueurs. Si le jeu est à somme nulle et à deux joueurs, alors on peut ne noter que les gains du premier joueur : ceux du second sont directement opposés.

	E	0
E	1,-1	-1 ; 1
0	-1,1	1,-1

Tableau 3.1 : Exemple de matrice des gains. [Murat, 00]

II.4.2. Forme extensive

Dans tous les jeux, les décisions peuvent être représentées par un arbre, dont chaque nœud est associé au joueur qui décide. Chaque option constitue une branche. Les gains de tous sont associés aux ou feuilles de l'arbre. Un joueur n'a pas besoin de savoir comment il est parvenu à un nœud : seul compte l'état présent du jeu, et les positions recherchées dans le futur. Lorsque certains mouvements ne sont autorisés qu'après un événement donné, cet événement n'est qu'un des éléments à matérialiser dans l'état présent du jeu et n'a pas besoin de faire partie d'un historique.

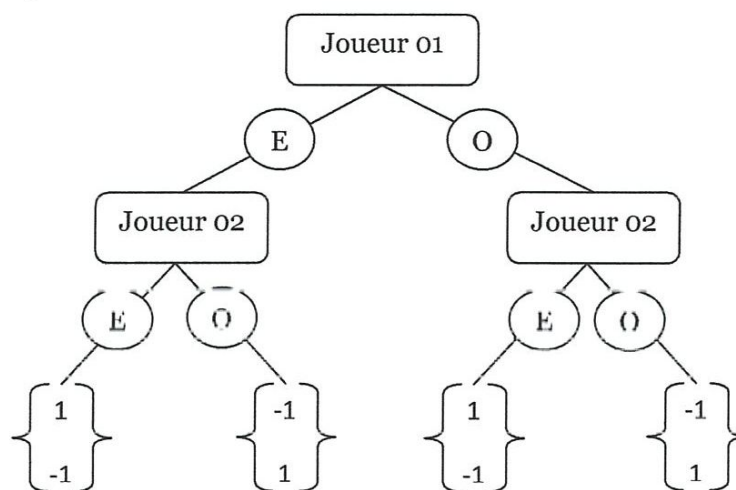


Figure 3.1 : exemple de forme extensive d'un jeu [Murat, 00]

II.5. Concepts de solutions

Plusieurs concepts de solutions ont été définis, dont nous allons présenter quelques uns.

II.5.1. L'équilibre en stratégies dominantes

En théorie des jeux, la dominance stratégique apparaît lorsqu'une stratégie est meilleure pour un joueur qu'une autre stratégie, quelle que soit la stratégie de l'adversaire. Sa définition mathématique est comme suite :

Soit deux stratégies A et B envisageables par un joueur dans un jeu à information parfaite donné. B domine A si le paiement associé à B est supérieur ou égal à celui associé à A pour toute stratégie de l'adversaire. S'il existe en outre une stratégie de l'adversaire telle que le paiement associé à B soit strictement supérieur à celui associé à A pour cette stratégie, alors B domine strictement A .

Ces définitions se généralisent naturellement à tout ensemble de stratégies :

- B est strictement dominante si elle domine strictement toutes les autres stratégies possibles.
- B est faiblement dominante si elle domine toutes les autres stratégies mais qu'il en existe au moins une qui ne soit pas strictement dominée par B .

Autrement dit ; soit un joueur i , S_i l'ensemble de ses stratégies et S_{-i} l'ensemble des stratégies de ses adversaires. Une stratégie $s^* \in S_i$ domine faiblement une autre stratégie $\hat{s} \in S_i$ si : $\forall s_{-i} \in S_{-i} [u_i(s^*, s_{-i}) \geq u_i(\hat{s}, s_{-i})]$ avec au moins une inégalité stricte.

De même, s^* domine strictement \hat{s} si : $\forall s_{-i} \in S_{-i} [u_i(s^*, s_{-i}) > u_i(\hat{s}, s_{-i})]$ [Pénard, 08]

II.5.2. L'équilibre par élimination itérée des stratégies dominées

On dit qu'une stratégie est dominée pour un joueur donné s'il existe au moins une autre stratégie telle que, quelles que soient les stratégies adoptées par les autres joueurs, cette autre stratégie est toujours au moins aussi bonne que la première et strictement meilleure dans au moins l'une des situations. Si chaque joueur est rationnel, suppose que les autres joueurs sont rationnels et suppose que les autres joueurs supposent qu'il est rationnel, alors on peut définir l'équilibre du jeu comme celui qui serait obtenu par l'élimination successive des stratégies dites dominées. [Pénard, 08]

II.5.3. L'équilibre de Nash

Dans la théorie des jeux, l'équilibre de Nash, nommé d'après *John Forbes Nash*, est un concept de solution dans lequel l'équilibre entre plusieurs joueurs, connaissant leurs stratégies réciproques, est devenu stable du fait qu'aucun ne modifie sa stratégie sans affaiblir sa position personnelle. Avant *Nash*, la détermination de situation stable n'avait pas de méthode formelle, même si l'existence d'équilibres pour les jeux à somme nulle était connue depuis 1926, via le théorème du minimax de Von Neumann. Quoique la traduction courante d'un équilibre de Nash puisse paraître simpliste, les considérables possibilités qu'il a ouvertes lui ont mérité le « *Prix Nobel* » d'économie en 1994, qu'il a reçu conjointement à *Reinhard Selten* et *John Harsanyi*. Cette définition s'applique à des jeux avec n'importe quel nombre de joueurs. Nash a démontré que tous les résultats trouvés avant lui conduisaient à des équilibres stables dans son sens.

Pour les jeux finis, on distingue l'équilibre de Nash en stratégies pures et l'équilibre de Nash en stratégies mixtes. Un équilibre de Nash en stratégies pures est l'équilibre d'un jeu dans lequel les joueurs choisissent une stratégie de manière déterministe alors que l'équilibre de Nash en stratégie mixte est l'équilibre de l'extension mixte de ce jeu, c'est-à-dire du même jeu, dans lequel les joueurs choisissent de jouer les différentes stratégies possibles de manière probabiliste. Leur stratégie est alors définie par le vecteur de probabilités qu'ils associent à chacune des stratégies pures possibles. Nash 1950 et 1951 ont établi que tout jeu fini a au moins un équilibre de Nash en stratégies mixtes. En revanche, rien ne garantit que l'équilibre de Nash soit unique.

[Pénard, 08]

Théorème de Nash — Soit $g: S_1 \times \dots \times S_m \rightarrow \mathbb{R}^m$ un jeu discret où m est le nombre de joueurs et S_i est l'ensemble des possibilités pour le joueur i , et soit \bar{g} l'extension de g aux stratégies mixtes. Alors le jeu \bar{g} admet au moins un point d'équilibre.

Par exemple, le jeu pierre-papier-ciseaux n'admet pas d'équilibre avec des stratégies pures (si on choisit à toutes les parties « pierre » par exemple, l'autre personne augmentera son gain (la fonction g) en choisissant « feuille ». Mais alors le premier joueur choisira ensuite « ciseau », etc. On n'arrivera jamais à un équilibre). En revanche, si on étend ce jeu aux stratégies mixtes, il y a un point d'équilibre d'après le théorème de Nash (et on peut montrer qu'il est unique). Ce point est donné en choisissant $\frac{1}{3}$ « pierre » + $\frac{1}{3}$ « ciseau » + $\frac{1}{3}$ « papier », c'est-à-dire, du point de vue probabiliste, de jouer avec une probabilité $\frac{1}{3}$ chacune des trois possibilités.

II.5.4. L'équilibre de Nash parfait en sous-jeux

Pour tous les jeux sous forme extensive en information parfaite, en 1965, Selten propose de considérer un raffinement de la notion d'équilibre de Nash, appelé équilibre de Nash parfait en sous-jeux. Un équilibre de Nash est dit parfait dans les sous-jeux s'il est aussi équilibre de Nash de tous les sous-jeux possibles du jeu. Cette notion permet d'éliminer certains équilibres de Nash non pertinents. L'algorithme de Zermelo, ou algorithme d'induction à rebours, permet de trouver l'équilibre de Nash parfait en sous-jeux d'un jeu sous forme extensive.

En 1981, Rosenthal critique la notion d'équilibre de Nash parfait en sous-jeu en exhibant un jeu dans lequel il est peu probable que des agents réels se comportant comme le prédit la théorie.

[Pénard, 08]

II.5.5. La solution du minimax

Le théorème du minimax de *John Von Neumann*, démontré en 1928, est un résultat important en théorie des jeux. Il assure que, pour un jeu non-coopératif synchrone à information complète opposant deux joueurs, à nombre fini de stratégies pures et à somme nulle, il existe au moins une situation d'interaction stable, à savoir une situation dans laquelle aucun des deux joueurs n'a intérêt à changer sa stratégie mixte si l'autre ne la change pas. Ce théorème est un cas particulier du théorème fondamental de la théorie des jeux à n joueurs de John Forbes Nash, démontré en 1950. Le théorème du minimax fournit une méthode rationnelle de prise de décision dans un contexte bien précis : celui où s'affrontent deux adversaires lorsqu'on suppose qu'ils doivent prendre leurs décisions simultanément et que tout gain de l'un est perte de l'autre. Cette seconde hypothèse, rarement remplie dans la réalité, limite cependant beaucoup son intérêt pratique. Un exemple de situation qu'il modélise bien est, au football, le duel entre un tireur de penalty et le gardien de but adverse. Le premier doit choisir où diriger son tir, le second quel secteur de sa cage protéger. En fonction du couple de décisions prises, les chances du tireur de marquer varient fortement.

Théorème de Von Neumann (1926) : Pour m entier strictement positif, notons Δ_m l'ensemble des vecteurs colonnes comportant m coefficients réels positifs ou nuls dont la somme vaut 1. Soit A une matrice réelle (n, k) . On a l'identité :

$$\max_{X \in \Delta_k} \min_{Y \in \Delta_n} Y^T A X = \min_{Y \in \Delta_n} \max_{X \in \Delta_k} Y^T A X. \quad [\text{Binmore, 07}]$$

II.5.6. L'équilibre corrélé

En théorie des jeux, la notion d'**équilibre corrélé** est une généralisation du concept d'équilibre de Nash proposée pour la première fois en 1974 par le mathématicien Robert Aumann. Celle-ci suppose l'existence d'un dispositif externe de corrélation, par exemple un "maître du jeu" auquel tous les joueurs font confiance. Celui-ci affecte leurs stratégies aux différents joueurs suivant une certaine loi de probabilité. On dit de cette loi que c'est un équilibre corrélé lorsque, quelles que soient les stratégies $\{s_i\}$ attribuées aux joueurs, aucun joueur i n'aura intérêt à changer sa stratégie (connaissant s_i ainsi que la loi de probabilité suivie par le dispositif).

Considérons un jeu à n joueurs où chaque joueur i choisit sa stratégie dans un ensemble S_i . La valeur reçue par le joueur i est notée $v_i(s_i, s_{-i})$. Soit une loi de probabilité p sur les vecteurs de stratégies $s \in \prod_i S_i$: $p(s)$ désigne la probabilité du vecteur s , que l'on écrira de manière équivalente $p(s_i, s_{-i})$ lorsqu'on s'intéressera au joueur i . On dit que la loi de probabilité p est un *équilibre corrélé* lorsque, pour tout joueur i et toute stratégie $s_i \in S_i$, on a la relation :

$$\forall \hat{s}_i \in S_i, \sum_{s_{-i}} p(s_i, s_{-i}) v_i(s_i, s_{-i}) \geq \sum_{s_{-i}} p(s_i, s_{-i}) v_i(\hat{s}_i, s_{-i})$$

C'est-à-dire : « sachant que le joueur i s'est vu attribuer la stratégie s_i , il ne peut obtenir en moyenne de valeur perçue plus grande en optant pour une autre stratégie \hat{s}_i . ». La moyenne en question correspond à l'espérance de v_i sur les stratégies des autres joueurs, distribuées selon la loi p conditionnée par l'événement « le joueur i a reçu la stratégie s_i ». En d'autres termes, le raisonnement présente deux étapes : les joueurs reçoivent d'abord leurs stratégies, puis envisagent d'améliorer leurs valeurs moyennes en supposant que les autres ne changent pas de tactique. S'il n'y a d'amélioration possible pour aucun joueur, on a un équilibre corrélé.

[Bernard, 05]

II.6. Conclusion

D'après ce qu'on a vu dans la partie précédente, la théorie des jeux est un outil facilement applicable à la problématique de gestion des carrefours, elle est aussi largement suffisante pour la modélisation des différentes situations de conflit dans les carrefours, vu ces multiples typologies et ces différents concepts de solution. Le chapitre qui suit, sera destiné à appliquer cet outil pour modéliser les situations de conflit dans les carrefours, et concevoir un mécanisme de coordination multi – agents résolvant ces conflits.

CONCLUSION

Dans ce chapitre, notre travail a été, dans sa totalité, limité à proposer un mécanisme de coordination répondant à notre problématique. Mais tout d'abord on a commencé par analyser les mécanismes existants dans la perspective de coordonner les actions des mobiles simulés aux carrefours, pour mener à un mécanisme plus réaliste et fiable. Puis on a consacré la deuxième partie à présenter la théorie des jeux, commençant par son historique, les types de jeux, leurs représentations, et enfin les concepts de solutions. Cette présentation nous a amenés à dire que la théorie des jeux est plus riche en termes de modèles qu'en termes de solution, et peut être vue comme cadre pour la conception d'un mécanisme de coordination du trafic au carrefour.

CHAPITRE IV – CONCEPTION ET IMPLÉMENTATION

INTRODUCTION

Les jeux peuvent être considérés comme la manière la plus simple pour modéliser les situations de conflit [Neuman, 47] et étudie les interactions entre agents intéressés. La question classique liée à la théorie des jeux et aux systèmes multi-agents est : quelle est la meilleure action qu'un agent puisse accomplir ? Dans la plupart des situations multi-agents, le gain global dépendra de façon critique des choix effectués par l'ensemble des agents impliqués dans la situation. Ceci implique que pour qu'un agent fasse le choix qui optimise ses gains, il doit considérer les décisions que peuvent prendre les autres agents et supposer qu'ils agiront de façon à optimiser leurs propres gains.

Ce chapitre sera réservé pour la conception et l'implémentation d'un mécanisme de coordination multi-agents basé sur les jeux, ayant comme but de résoudre les conflits apparaissant dans le trafic routier et spécialement dans les situations de carrefour. Pour cela notre travail sera divisé en trois parties. Dans la première on commencera par déterminer la nature des conflits apparaissant dans un carrefour, et en prenant en considération ces conflits nous nous fixerons un but à atteindre par l'application (le simulateur). En suite, nous passerons à la modélisation du problème, la discrétisation de l'environnement, la représentation des véhicules sous forme d'agent, et la simplification du mécanisme de coordination. La deuxième partie apportera une étude plus applicative, nous commencerons par présenter l'environnement du travail, tant matériel que logiciel. On présentera les capacités de l'outil matériel utilisé, la plate-forme de programmation, et le langage utilisé. La troisième partie sera réservée pour expliquer l'interface du logiciel et exposer quelques résultats de simulation ainsi que leurs interprétations.

I. PRÉSENTATION DU PROBLÈME

I.1. Nature des conflits

Dans le contexte du trafic routier, on distingue différents types de conflits, d'y parmi, les conflits de but, qui peuvent apparaître même si la circulation sur la section est considérée comme fluide. Un conducteur rentrera en conflit avec le véhicule qui le précède lorsque ce dernier roule à une vitesse moins élevée que la vitesse qu'il désire atteindre. On trouve aussi les conflits d'engagement, qui peuvent se produire lorsque les promesses qui ont été faites par un véhicule envers celui qui est derrière n'ont pas été tenues, comme dans le cas où un conducteur met son clignotant à l'instant t et l'éteint à l'instant $t+1$, ce qui signifie l'annulation de changement de voie. Ces deux types de conflits sont ubiquistes dans le trafic routier. Cependant, et par raison de simplicité, nous n'allons pas les considérer, et ceci par l'élimination du comportement de doublement (les véhicules ont la même vitesse), et la réduction de l'infrastructure routière au carrefour.

Par conséquent le seul problème restant à résoudre est le conflit de ressources, qui apparaît lorsque le nombre de véhicules voulant circuler sur une section devient supérieur à sa capacité. La circulation devient alors dense et des conflits autour de l'espace de circulation apparaissent. Les conflits viennent donc des ressources mises à la disposition des véhicules.

Les conflits d'intersection apparaissent généralement au niveau des carrefours entre des véhicules qui viennent de routes différentes et qui prennent des directions qui se croisent. Ces véhicules doivent s'organiser et se partager l'espace du carrefour de façon à ce que chacun puisse emprunter la direction qu'il a choisie sans qu'il y ait de collisions. Le problème ne se poserait pas, s'il n'y avait qu'un seul véhicule ou si l'espace était suffisant pour faire passer tous les véhicules en même temps.

I.2. Objectif de l'application

Dans le travail abordé par ce mémoire, on a pour objectif de proposer une solution à la simulation du trafic routier en répondant à la problématique de la coordination du trafic en situation de carrefour. L'idée est de concevoir et intégrer au modèle de simulation un mécanisme de coordination multi-agents fondé sur des jeux, permettant aux entités composant le trafic simulé de gérer leurs conflits d'accès à la ressource commune symbolisé par l'espace routier associé au carrefour. Le mécanisme à concevoir doit impérativement être doté de quelques caractéristiques que nous présentant comme suit :

- **Distribué** : pour optimiser l'utilisation de l'espace routier, le mécanisme de coordination doit être implémenté d'une façon que toutes les véhicules impliqués dans la simulation l'utilisent, vue qu'un mécanisme centralisé est plus exagérant et ne laisse passer dans un carrefour qu'un seul véhicule à la fois.
- **Flexible** : le mécanisme à implémenter ne doit pas être conçu spécifiquement pour un type de véhicule, il ne doit pas faire de différence entre véhicule lourd et léger car, en réalité, ceux derniers appliquent les mêmes règles de code de la route dans les situations de carrefour. Le mécanisme doit aussi prendre en considération tous les types de carrefour : croisement de flux et fusion de flux, croisement de deux voies ou plusieurs, ... etc.
- **Simplifié et doté d'une certaine vitesse d'exécution** : en tenant compte de la contrainte du temps-réel et en prenant en considération le but d'optimiser l'utilisation de l'infrastructure routière, on se rend rapidement compte que le mécanisme de coordination doit être plus simple que possible, les véhicules doivent prendre leurs décisions (franchir le carrefour, ou attendre) en un temps négligeable.
- **Normatif** : les règles de priorité utilisées dans le mécanisme de coordination doivent être inspirées du code de la route, pour ne pas sortir des normes et conserver l'hierarchie imposé auparavant par plusieurs règles et surtout celle de priorité à droite. Un mécanisme de telle nature donne au simulateur une apparence plus réelle, l'utilisateur sera alors plus tranquille, et aura plus de confiance envers la transposition du mécanisme de la simulation vers la réalité.

Ce mécanisme étant basé sur des jeux, va évidemment répondre aux buts des véhicules, qui sont représentés par des agents rationnels et ayant des attitudes stratégiques. Cependant, il doit aussi satisfaire les objectifs du système global que nous proposons et réduisons en ceux ci :

- L'évitement de collisions qui marquera le point crucial de l'application.
- l'élimination des files d'attentes, souvent causées par les feux de circulation ou bien la monopolisation de priorité par un seul sens de circulation.
- L'élimination des situations d'inter-blocage qui naissent lorsque les véhicules en conflit ont la même priorité, ce qui génère un blocage de la circulation dans plusieurs sens.

II. CONCEPTION

II.1. Modélisation du problème

Pour les situations impliquant deux mobiles dans un carrefour en X, il existe quatre types de situations représentées comme suit :

- Les deux mobiles ne sont pas en conflit car aucun n'est prioritaire sur l'autre (situation 1)
- Le premier des deux mobiles est prioritaire sur le second (situation 2) ;
- Le second des deux mobiles est prioritaire sur le premier (situation 3) ;
- Chacun des deux mobiles est prioritaire sur l'autre (situation 4).

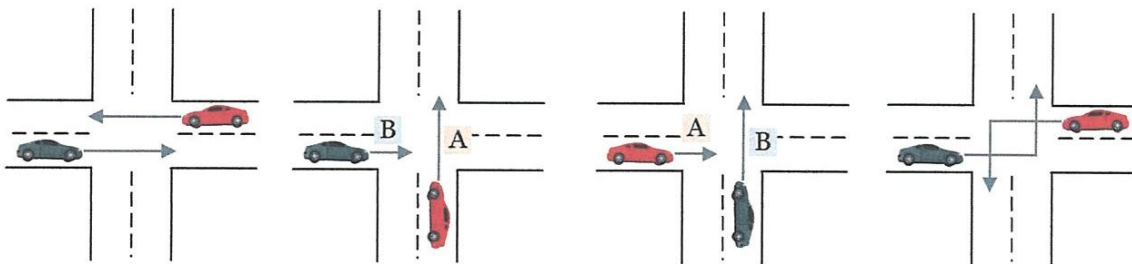


Figure 4.1 : Les quatre situations de conflit entre deux véhicules

En analysant les quatre situations précédentes, on peut déterminer les matrices de paiement associées. Ainsi, suivant l'ordre de priorité, les jeux modélisant les quatre situations sont notés comme suit :

- Jeux **J1** : pour la première situation où il n'ya pas de conflit entre les deux véhicules et aucun d'eux n'est prioritaire sur l'autre.
- Jeux **J2** : pour la deuxième situation où A est prioritaire sur B
- Jeux **J3** : pour la troisième situation où B est prioritaire sur A
- Jeux **J4** : pour la quatrième situation où chaque véhicule se voit prioritaire sur l'autre.

Concernant le jeu « **J1** » et « **J4** » les relations de **A** envers **B** et de **B** vers **A** sont identiques. Ceci implique que les paiements relatifs à une stratégie sont les mêmes. Tandis que pour les jeux « **J2** » et « **J3** », les deux jeux sont caractérisés par des relations symétriques. Ce qui implique les matrices de paiements suivantes (figure 4.2):

$A \backslash B$	<i>GO</i>	<i>STOP</i>
<i>GO</i>	(X_1, X_1)	(X_3, X_4)
<i>STOP</i>	(X_4, X_3)	(X_2, X_2)

Jeux J1 (pas de priorité)

$A \backslash B$	<i>GO</i>	<i>STOP</i>
<i>GO</i>	(Y_1, Y_2)	(Y_3, Y_4)
<i>STOP</i>	(Y_5, Y_6)	(Y_7, Y_8)

Jeux J2 (B prioritaire)

$A \backslash B$	<i>GO</i>	<i>STOP</i>
<i>GO</i>	(Y_2, Y_1)	(Y_6, Y_5)
<i>STOP</i>	(Y_4, Y_3)	(Y_8, Y_7)

Jeux J3 (A prioritaire)

$A \backslash B$	<i>GO</i>	<i>STOP</i>
<i>GO</i>	$(-X_1, -X_1)$	(X_3, X_4)
<i>STOP</i>	(X_4, X_3)	$(-X_2, -X_2)$

Jeux J4 (A et B prioritaires)

Figure 4.2 : matrices des paiements des quatre situations (modèle général).

On vient de présenter la modélisation sous forme de jeux des situations de conflit au carrefour impliquant deux véhicules. De manière générale, cette modélisation doit représenter le comportement des conducteurs, souvent considéré comme égoïste, mais aussi répondre au but global du système (donc le comportement collectif).

II.2. Calcul des matrices de paiement

Dans une situation de carrefour, chaque mobile doit traverser le carrefour tout en gérant le conflit éventuel. Ainsi, un joueur peut faire face à trois cas différents auxquels nous affectons des paiements :

- le joueur avance (il choisit la stratégie *Go*) mais ne résout pas le conflit qui devient effectif: le joueur va contre son intérêt ; dans un tel cas, les paiements associés à la stratégie *Go* doivent être négatifs (il s'agit alors de coûts) ;
- le joueur avance (il choisit la stratégie *Go*) et évite le conflit ; dans un tel cas, les paiements associés à la stratégie *Go* doivent être positifs (il s'agit alors de gains) ;

- le joueur s'arrête (il choisit la stratégie *Stop*) : il n'y a donc pas de conflit effectif mais le joueur ne peut réaliser son objectif à l'instant présent ; par conséquent, les paiements associés à la stratégie *Stop* doivent être nuls.
- Tous les deux joueurs s'arrêtent : il n'y a pas de conflit mais ils ne peuvent réaliser leurs objectifs et entrent en situation d'inter-blocage ; par conséquent, les paiements associés à cette stratégie doivent être négatifs.

Ces quatre affirmations amènent à dire qu'après une première simplification, les matrices de paiement associées aux quatre situations deviennent comme suit:

	<i>B</i>	
<i>A</i> \	<i>GO</i>	<i>STOP</i>
<i>GO</i>	(X_1, X_1)	$(X_3, 0)$
<i>STOP</i>	$(0, X_3)$	$(-X_2, -X_2)$

Jeux J1 (*pas de priorité*)

	<i>B</i>	
<i>A</i> \	<i>GO</i>	<i>STOP</i>
<i>GO</i>	(Y_1, Y_2)	$(Y_3, 0)$
<i>STOP</i>	$(0, Y_6)$	$(-X_2, -X_2)$

Jeux J2 (*B prioritaire*)

	<i>B</i>	
<i>A</i> \	<i>GO</i>	<i>STOP</i>
<i>GO</i>	(Y_2, Y_1)	$(Y_6, 0)$
<i>STOP</i>	$(0, Y_3)$	$(-X_2, -X_2)$

Jeux J3 (*A prioritaire*)

	<i>B</i>	
<i>A</i> \	<i>GO</i>	<i>STOP</i>
<i>GO</i>	$(-X_1, -X_1)$	$(X_3, 0)$
<i>STOP</i>	$(0, X_3)$	$(-X_2, -X_2)$

Jeux J4 (*A et B prioritaires*)

Figure 4.3 : matrices des paiements calculées pour les quatre situations.

II.3. Discrétisation de l'environnement

L'environnement (le carrefour) a été discrétisé en une matrice de taille 25 x 25, comptant 625 cellules en totale. Y compris, seulement 96 cellules réservées pour la circulation des véhicules. Les autres cellules sont consacrées pour la représentation des trottoirs, traçage des routes, et les bords des routes. Toutes ces cellules prennent une valeur logique (true, false) initialisées à false, qui indique que la cellule est occupée par un véhicule ou non. Cette représentation simplifiée de l'environnement permet d'éliminer complètement le problème de collision, du fait qu'une cellule est une ressource commune et ne peut être à la disposition de deux agents en même temps. La **figure 4.6** en dessous représente schématiquement le carrefour simulé.

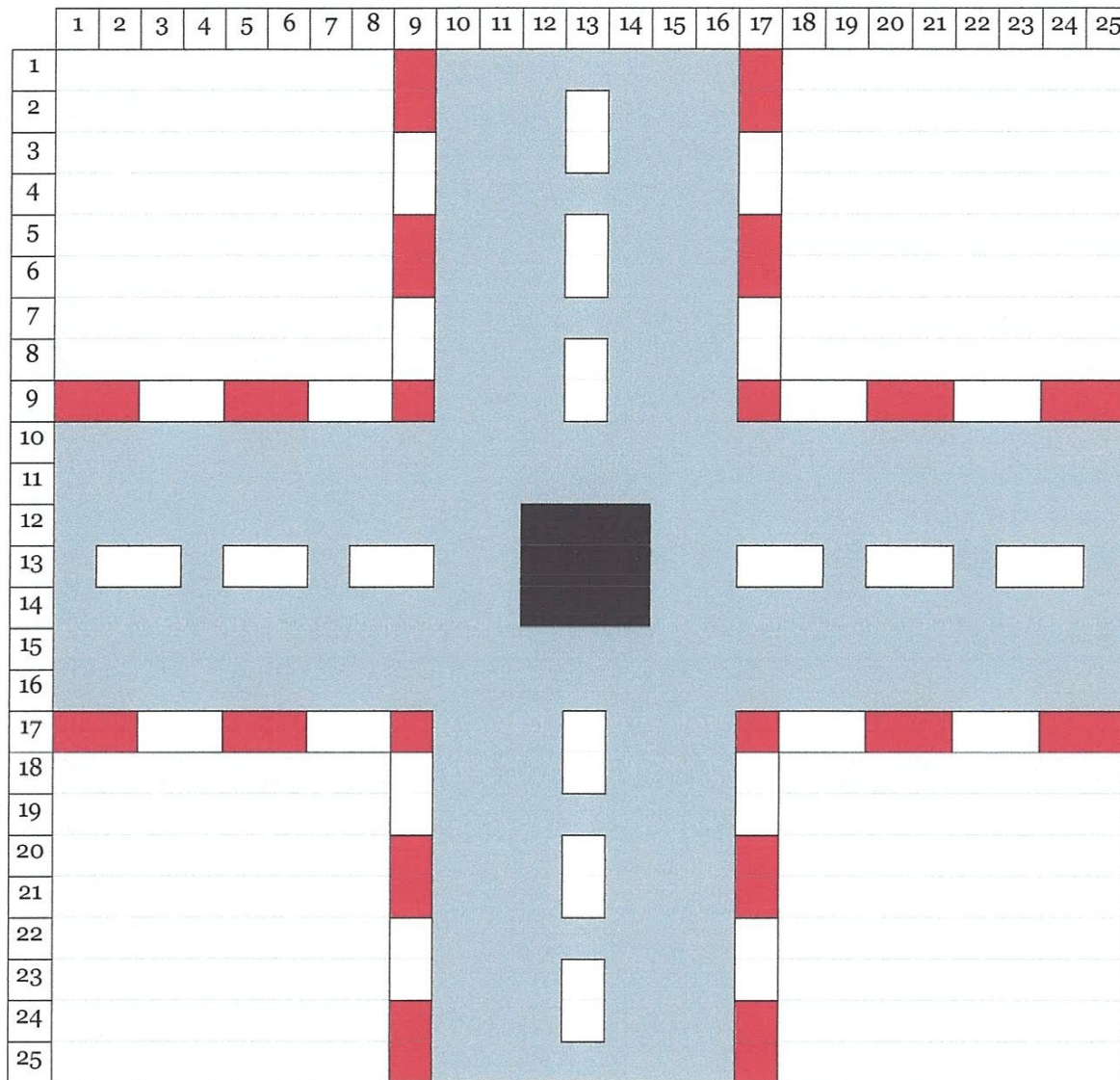


Figure 4.4 : représentation du carrefour par une matrice carrée.

II.4. Modélisation des agents

Les véhicules sont représentés par des agents hybrides, le fait qu'ils connaissent leurs positions de démarrage, leurs positions d'arrivée, et aussi bien les positions empruntées tous le long du chemin à parcourir leur donne un côté cognitif. Mais le fait qu'ils n'ont aucune connaissance des autres agents et leurs mouvements leur donne un côté réactif, et oblige chaque agent à tester si la prochaine position est occupée ou non avant d'y accéder et aussi à tester la priorité au carrefour.

II.4.1. Comportement des agents

Les agents utilisés dans ce simulateur sont, comme nous l'avons dit précédemment, hybrides, homogènes (ayant le même comportement). Ce comportement est décrit comme suit :

a) Déplacement :

Du fait que les agents simulent des véhicules, leur objectif est de se déplacer sur la route en suivant un parcours, ce dernier étant marqué par un point de départ et un point d'arrivée ainsi qu'un ensemble de cellules à emprunter impose de suivre quelques critères :

- Tant que l'objectif (point d'arrivée) n'est pas atteint : se déplacer ;
- Si la cellule suivante est vide : avancer ; sinon : attendre ;

Ce déplacement définit le comportement réactif des agents pendant leur cycle de vie, tant que pour le comportement – soit disant – cognitif, il se résume dans l'attitude de perception.

b) Perception :

Les agents sont dotés d'une certaine capacité de perception, qui s'exprime dans le fait qu'ils distinguent entre une zone de la route et une zone du carrefour et qu'ils savent que s'ils sont prioritaires ou non. Lorsque un véhicule arrive à un point d'entrée au carrefour, il perçoit immédiatement le changement de l'état et il réalise que pour franchir le carrefour il doit connaître s'il est prioritaire ou non, ceci en testant si la voie sur sa droite est libre ou contient des véhicules.

c) Action :

Après l'étape de perception, et suite au changement de l'état, le véhicule se trouve face à une zone de conflit. Donc, il fait appel au mécanisme de coordination pour calculer son action suivante (attendre ou passer). Si l'action à prendre est égale à « stop », le véhicule non prioritaire doit attendre jusqu'à ce que l'autre véhicule passe. Sinon il franchit le carrefour sans attendre. Après avoir sorti du carrefour le véhicule reprend son comportement initial, étant le déplacement.

d) Extinction :

La vie d'un agent simulant un véhicule est limitée par sa création (représenté visuellement par son apparition sur la route), et sa destruction. Lorsque l'agent atteint son but (point d'arrivée), il disparaît de l'image et sera définitivement supprimé du système.

II.4.2. Algorithme principal :

Le squelette de l'agent représentant les véhicules est comme suit :

```

public class Voiture extends Agent {
    déclaration des variables utilisées ;
    protected void setup () {
        Créer agent;
        addBehaviour (new CyclicBehaviour (this) {
            public void action () {
                tant que (prochaine case <> Carrefour) {
                    si prochaine case = vide {
                        Avancer ;
                        Verrouiller la case courante ;
                        Vider la case précédente ;
                    }
                }
                Tester la priorité ;
                Calculer l'équilibre de Nash ;
                Si le résultat est positif alors avancer
                Sinon attendre ;
            }
        }
    }
}

```

II.5. Mécanisme de coordination

Après les simplifications apportées au niveau de la représentation du carrefour, les risques de collision sont éliminés, reste le problème de l'inter-blocage et le problème de monopolisation de la priorité par un seul sens de circulation. En se référant au code de la route, on réalise immédiatement que ces deux problèmes peuvent être facilement résolus, en utilisant la fameuse règle de priorité à droite avec une certaine modification. Vu que les véhicules circulent en même vitesse, le test de priorité à droite pour un véhicule sera limité à une seule case, plus clairement et comme exemple : le véhicule venant de l'est et entrant au carrefour par le point (10,16), aura un conflit au point (10,10) avec le véhicule venant du nord (sur sa droite) et situé sur la le point (4,10). Donc il n'aura qu'à tester si cette case est vide ou non.

Dans le cas où la case est vide, le véhicule n'aura pas à attendre. Cependant, dans le cas où elle est occupée, l'action du véhicule sera conditionnée par le calcul de stratégie optimale.

II.6. Architecture de l'application

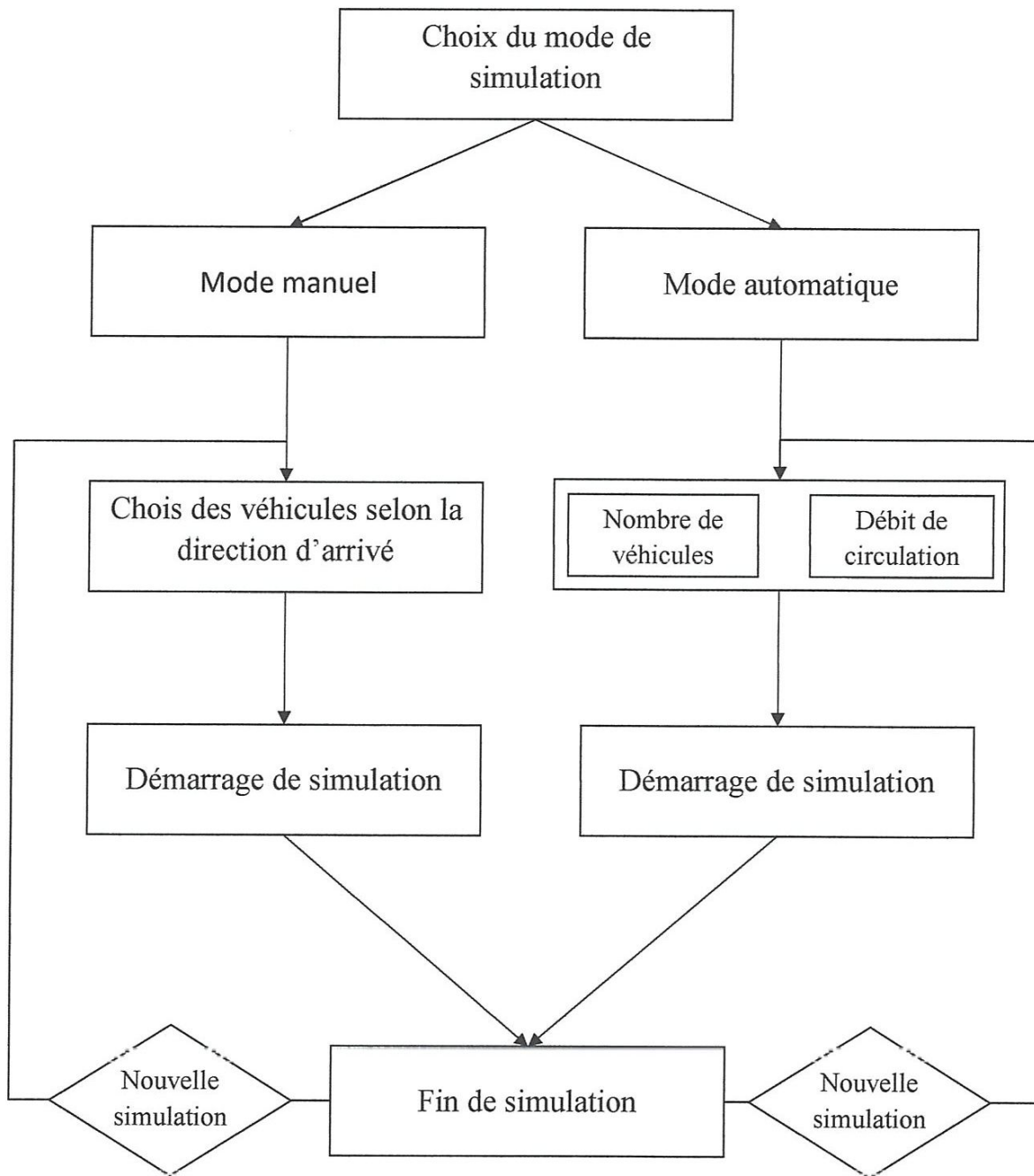


Figure 4.5 : organigramme du déroulement de l'application

III. Environnement de développement

III.1. Environnement matériel.

Le micro ordinateur utilisé tout au long de la réalisation du travail est un « HP Pavilion G7 », équipé de la version 6.1 de Windows 7 Édition Familiale Premium 64bit, et doté des capacités suivantes :

- Processeur : Intel ® Core TM I5 M480, à une fréquence de 2.76MHz (4 CPUs).
- Mémoire Vive : 4Gb
- Carte graphique :
 - o Intel ® HD Graphics : 1696 MB.
 - o Radeon TM HD 6470M : 2703 MB.

III.2. Environnement logiciel

III.2.1. Le langage de programmation

La programmation orientée agents a été proposée par Yoav Shoham en 1993 comme un nouveau paradigme de programmation, que l'on peut voir comme une spécialisation de la programmation orientée objets.

Dans cette approche, les agents sont les éléments centraux du langage, de la même façon que les objets sont centraux pour les langages orientés objets. De plus, à chaque agent est associé un ensemble d'habiletés qui représentent ce que l'agent sait faire. En même temps, la programmation orientée agents suppose qu'on va développer des programmes dans lesquels plusieurs agents interagissent, ce qui met l'accent sur la dimension sociale des agents.

Parmi les nombreux logiciels orientés agents distingue notamment la plateforme « Java ». Cette dernière constitue un puissant outil logiciel et permet à des milliers d'agent de fonctionner en parallèle. Ce qui offre la possibilité d'explorer la connexion entre le comportement qui peut émerger de l'interaction entre ces entités.

La plate-forme Java est une plate-forme produite par Sun Microsystems créé par James *Gosling et Patrick Naughton*, permettant de développer et d'exécuter des programmes écrits en langage Java indépendante de tout processeur et de tout système d'exploitation. La plate-forme se compose principalement d'un moteur d'exécution (appelé une machine virtuelle) et d'un compilateur fourni avec un ensemble de bibliothèques standards dont il existe plusieurs

implémentations pour divers matériel et système d'exploitation, de façon à ce que les programmes Java puissent s'exécuter de façon identique sur chacun d'entre eux.

La version installée et utilisée est la version 1.6.0_22-b04, ou simplement dite JAVA 6.

III.2.2. Plateforme multi-agents

Le meilleur moyen pour construire un système multi-agents (SMA) est d'utiliser une plateforme multi-agents. Cette dernière est définie comme étant un ensemble d'outils nécessaire à la construction et à la mise en service d'agents au sein d'un environnement spécifique. Ces outils peuvent servir également à l'analyse et au test du système ainsi créé. Ces outils peuvent être sous la forme d'environnement de programmation (API) et d'applications permettant d'aider le développeur. JADE (Java Agent DEvelopment framework) est l'une des plateformes multi-agents les plus connues, créé par le laboratoire *TILAB* et décrite par « Bellifemine et al. » dans ses deux publications : *[Bellifemine & al., 99]* et *[Bellifemine & al., 00]*. JADE permet le développement de systèmes multi-agents et d'applications conformes aux normes FIPA. Elle est implémentée en JAVA et fournit des classes qui implémentent « JESS » pour la définition du comportement des agents. JADE possède trois modules principaux (nécessaire aux normes FIPA) :

- DF « Director Facilitator » fournit un service de « pages jaunes » à la plate-forme ;
- ACC « Agent Communication Channel » gère la communication entre les agents ;
- AMS « Agent Management System » supervise l'enregistrement des agents, leur authentification, leur accès et l'utilisation du système.

Ces trois modules sont activés à chaque démarrage de la plate-forme.

III.2.3. Éditeur du code

Eclipse est un projet de la Fondation Eclipse visant à développer tout un environnement de développement libre, extensible, universel et polyvalent. Son objectif est de produire et fournir divers outils gravitant autour de la réalisation de logiciel, englobant les activités de codage logiciel proprement dites (avec notamment un environnement de développement intégré) mais aussi de modélisation, de conception, de test, de reporting, etc. Son environnement de développement notamment vise à la genericité pour lui permettre de supporter n'importe quel langage de programmation.

Le projet Eclipse est pour cela organisé en un ensemble cohérent de projets logiciels distincts, sa spécificité tenant à son architecture totalement développée autour de la notion de plugin (en

conformité avec la norme OSGi) : toutes les fonctionnalités de l'atelier logiciel doivent être développées en tant que *plug-in* bâti autour de l'**IDE Eclipse Platform**.

Eclipse recouvre donc notamment également à cet effet tout un Framework de développement logiciel fournissant des briques logicielles à partir desquelles développer tous ces outils. C'est la raison pour laquelle Eclipse est présenté dans la littérature tout autant comme un EDI ou comme un Framework.

La version utilisée dans notre travail est la version 3.6 nommée « Eclipse Helios Service Relis1 » sortie en juin 2010.

IV. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

IV.1. Interface du simulateur

Dans cette application qui simule le trafic routier en situation de carrefour, l'utilisateur a le choix d'exécuter une simulation automatique, où le simulateur génère des véhicules, selon le nombre introduit par l'utilisateur, ces véhicules sont caractérisé par le point de départ et le point d'arrivé, les deux couleurs de voitures ne signifient pas la différence entre ces entités. Ou bien une simulation manuelle, où l'utilisateur ne fait qu'introduire les véhicules impliqués dans la simulation. Les figures en dessous illustrent plus l'utilisation de l'interface.

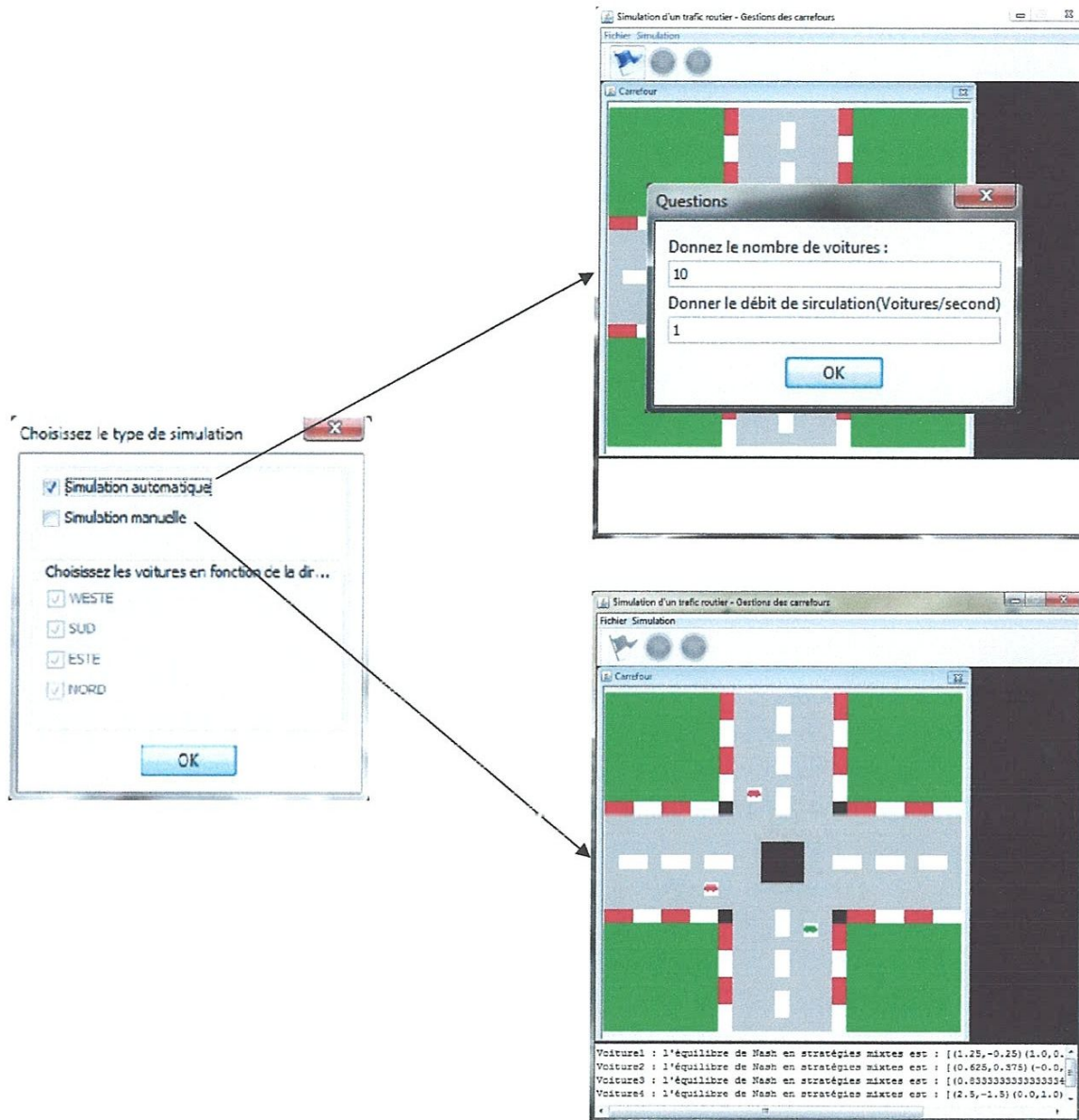


Figure 4.6 : défilement entre les fenêtres de l'application.

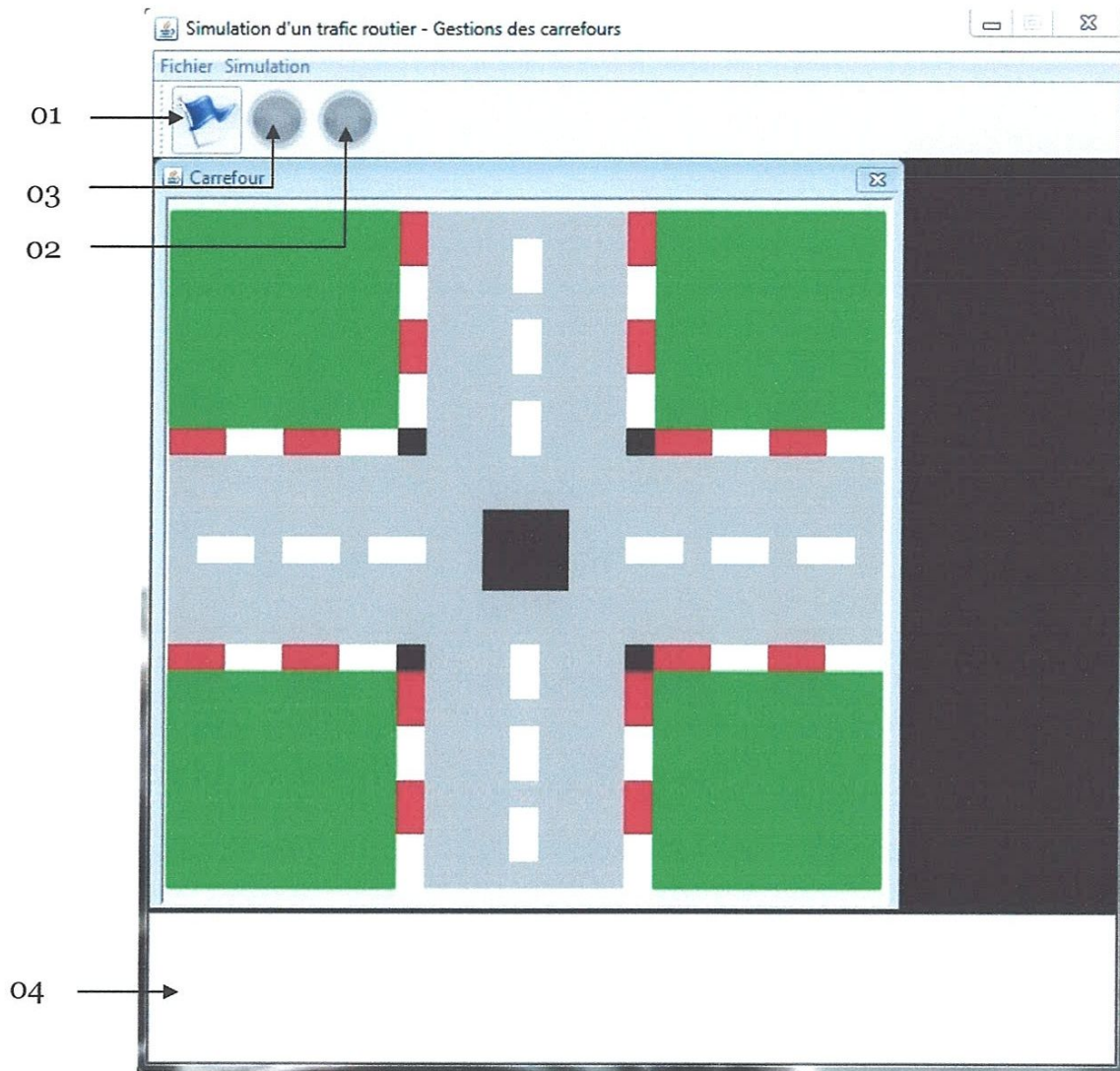


Figure 4.7 : fenêtre principale de simulation.

01 : Bouton « lancer la simulation », active en mode automatique seulement, il permet de lancer une nouvelle simulation, et affiche le panneau de saisie des valeurs de la simulation (Nb Véhicules, et débit de circulation).

02 : Bouton « suspendre la simulation », active seulement en mode automatique après le début de la simulation, il permet à l'utilisateur de suspendre le simulateur à n'importe quel moment, pour mieux étudier les situations de conflit

03 : Bouton « reprendre la simulation », s'active après la suspension du simulateur il permet de reprendre le processus de simulation.

04 : une zone de texte (JTextArea) dédiée à l'affichage de l'équilibre de Nash pour chaque joueur.

IV.2. Mode de simulation automatique

Après l'exécution du simulateur en mode automatique, et avoir choisi comme valeurs d'entrées : 40 véhicules avec un débit de circulation de quatre voitures par second, on réalise que la simulation se déroule comme prévu. Pas le moindre signe de collision, les situations d'inter-blocage sont éliminées, et les files d'attente ne se produisent que pour un temps négligeable (par rapport au cas des carrefours gérés par feux) dans les routes ayant un débit de circulation élevé. La loi de priorité à droite est respectée, mais pas dans tous les cas. Le véhicule – soit disant – prioritaire s'arrête et laisse passer le véhicule à gauche si ce dernier avait accédé au carrefour avant lui. Ce phénomène peu être considéré comme convenable à la contrainte du temps, et au désires d'optimiser l'exploitation de l'infrastructure routière.

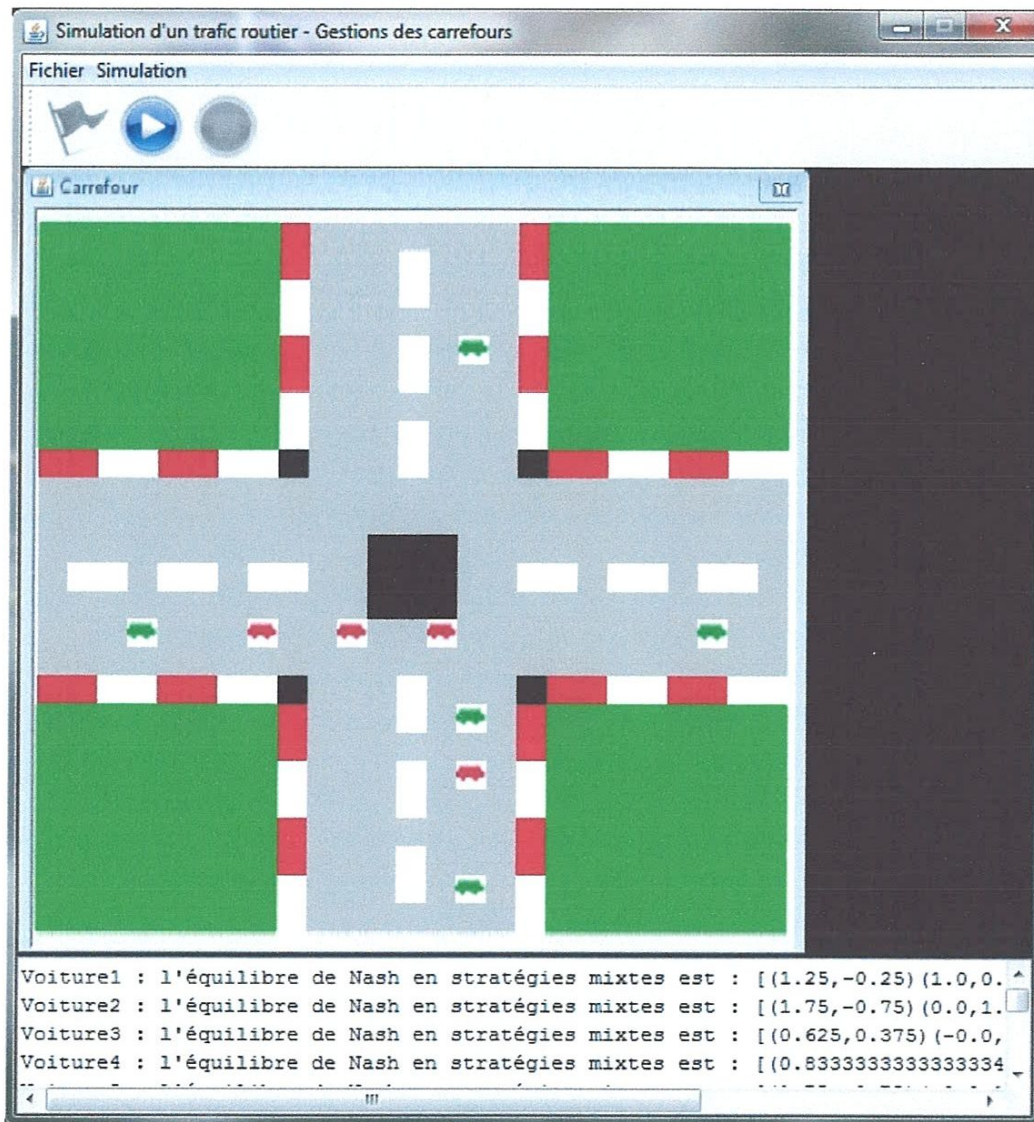


Figure 4.9 : résultats de l'exécution du simulateur en mode automatique

IV.3. Mode de simulation manuel

Après avoir exécuté le simulateur en mode manuel en choisissant deux véhicules, l'un venant du nord et allant à l'est, l'autre venant du sud et allant au nord (le point d'arrivée étant choisie aléatoirement par le simulateur), on réalise que le mécanisme de coordination est efficace, le fait qu'il coordonne la circulation des véhicules tout en évitant les collisions. Ce mode de simulation est très utile pour étudier la performance du mécanisme au cas par cas.

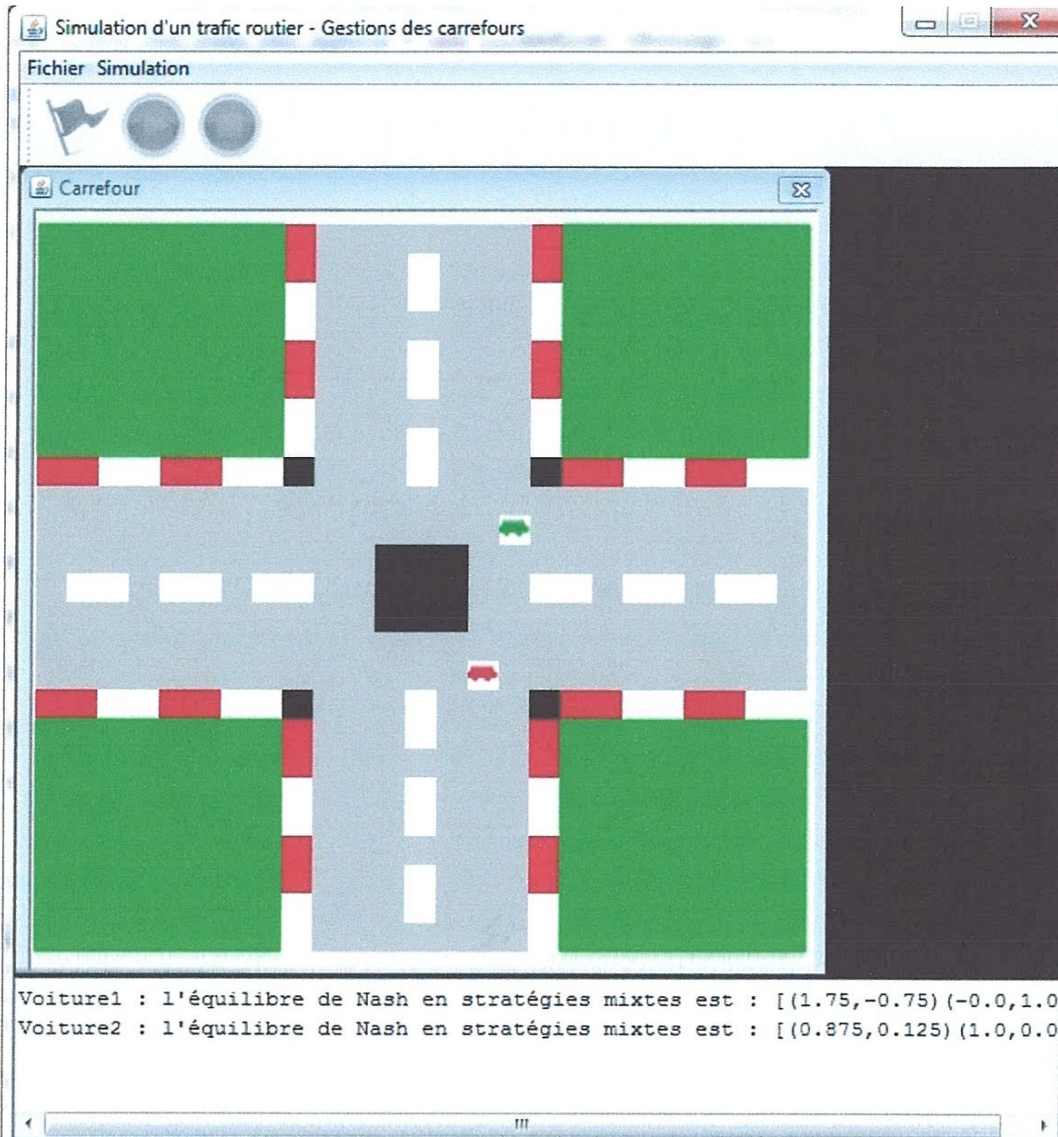


Figure 4.10 : résultat de l'exécution du simulateur en mode manuel

CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a abordé la conception et l'implémentation du mécanisme de coordination proposé. Nous avons commencé notre travail par cerner la nature des conflits du trafic routier. En suite, et après avoir fixé des objectifs à atteindre et des solutions à apporter pour la simulation du trafic routier en milieu urbain, on a entamé la modélisation du problème, ainsi que la représentation programmatique des différents acteurs du simulateur (environnement, agent, mécanisme). Enfin, nous avons présenté quelques résultats de simulation permettant d'apporter une évaluation critique du mécanisme conçu.

Après avoir testé le simulateur en ces deux modes, on réalise que le mécanisme de coordination basé sur les jeux est efficace, il gère bien les conflits d'accès aux ressources communes (les cellules qui composent le carrefour) et répond aux buts que nous avons ciblés auparavant. Les risques de collision sont carrément éliminés du fait que deux véhicules ne peuvent accéder à la même zone du carrefour. Les files d'attente sont éliminées dans la majorité des cas et ne se produisent que pendant un temps négligeable si le carrefour est occupé. Les situations d'inter-blocage aussi sont éliminées du fait que quatre véhicules peuvent franchir le carrefour simultanément.

CONCLUSION GÉNÉRALE

De nos jours, les problèmes liés à la simulation d'environnement urbain préoccupent la majorité des acteurs de simulation du trafic. D'une part, à cause de l'accroissement du trafic sur une infrastructure routière particulièrement restreinte, la nécessité de construire de nouveaux aménagements s'impose. D'autre part, la nécessité de tester les nouveaux systèmes d'aide dans un environnement autre qu'autoroutier impose de réaliser des études faisant appel à la simulation. Ainsi, le besoin de situations urbaines simulées est de plus en plus important, voire critique. Que ces besoins soient liés à l'obligation de mener une étude scientifique ou à la volonté de faire une opération de communication interne ou externe, ils créent aujourd'hui un marché potentiel important.

Or, à l'heure actuelle, aucun outil de simulation n'est réellement capable de proposer une simulation de réseau urbain en général, ou de carrefour complexe (rond point, carrefour non équipé de feux tricolores) en particulier, qui soit à la fois statistiquement valide et visuellement réaliste. Pour tous ces outils, le problème est le même : la difficulté à coordonner les actions des entités composant le trafic simulé en situation de carrefour.

Les concepts proposés en systèmes multi-agents (intelligence artificielle distribuée) caractérisent des entités autonomes, appelées agents, capables de percevoir leur environnement, d'agir et/ou de réagir aux informations extérieures, et surtout capables d'interagir avec d'autres agents (des logiciels ou des êtres humains). Ces travaux peuvent apporter des éléments de réponse dans des contextes de distribution des connaissances ou dans des situations dans lesquelles la coordination de différents agents est nécessaire, et en particulier dans des situations conflictuelles de but et/ou de ressource. Ces études mettent aussi en évidence l'intérêt de telles approches pour les transports, et en particulier dans le cadre de ce travail, sur la simulation de trafic routier

De notre part, nous pensons que la méthode la plus appropriée pour répondre à la problématique de simulation du trafic routier est de suivre une approche basée sur les systèmes multi-agents et modélisant les situations de conflit par des jeux. Cette approche a l'avantage de permettre aux entités composant le trafic simulé de faire preuve d'un comportement normatif et d'ainsi d'être potentiellement capables de gérer leurs conflits dans n'importe quelle situation de trafic. Le modèle de trafic est alors potentiellement générique.

En se basant sur l'approche multi-agent, d'une part, et la théorie des jeux, d'autre part, ce mémoire avait pour objectif de présenter une solution à la problématique de la simulation de trafic en situation de carrefour en proposant un mécanisme de coordination multi-agent fondé sur des jeux et prenant en compte les relations de priorité existant entre les entités composant le trafic simulé.

Le premier chapitre a présenté le domaine des systèmes multi-agents et les concepts relatifs. Tout d'abord, on a commencé par définir la notion d'agent et présenter ces différentes architectures. Ensuite, le concept de système multi-agent a été précisément détaillé en présentant ces composants, ces phénomènes et ces domaines d'application.

Le deuxième chapitre a été réservé pour présenter les différents mécanismes de coordination. Tous d'abord, une étude multidisciplinaire de la coordination a été abordée. En suite, les mécanismes de coordination issus de la recherche sur le domaine SMA ont été présentés. Enfin, la dernière partie du chapitre a présenté le trafic routier, ces problèmes, ainsi que les mécanismes de coordination qui ont été conçus pour résoudre ces conflits.

Dans le troisième chapitre on a présenté une théorie éprouvée, qui a pour objectif la gestion des conflits à l'aide de gains et de coûts : la théorie des jeux. Cette présentation détaillée nous a mené à dire que les jeux peuvent être considérés comme la manière la plus simple de modéliser et représenter les situations de conflit au carrefour.

Le dernier chapitre de ce mémoire, a exposé comment le mécanisme de coordination a été implémenté. Pour ce faire, ce chapitre a montré comment une situation de carrefour peut être efficacement modélisée sous forme de jeux en ne considérant que deux joueurs. Il a ensuite exposé comment les différents composants du simulateur (environnement, agents, mécanisme de coordination) ont été programmés. Enfin, une évaluation du mécanisme a été apportée, et a amené comme conclusion que le mécanisme est valide.

BIBLIOGRAPHIE ET RÉFÉRENCES

- [**Adam, 00**] : Adam E. – Modèle d'organisation multi-agent pour l'aide au travail coopératif dans les processus d'entreprise : application aux systèmes administratifs complexes – Thèse de doctorat – Université de Valenciennes – 2000.
- [**Aron, 87**] M. Aron – Approche microscopique de la cinématique des véhicules en milieu urbain – rapport INRETS n° 43 – 1987.
- [**Auman, 95**] : Aumann R.J. – Maschler M.B. et Stearns R.E. – Repeated games with incomplete information – USA : MIT Press – 1995.
- [**Barbera, 99**] : Barbera S. – Hammond P.J. et Seidl C. – Handbook of utility theory – Volume 1 : principes – Boston : Kluwer Academic Publishers – 1999
- [**Bellifemine & al., 99**] Bellifemine F., Poggi A., Rimassa G., – JADE : A FIPA-compliant agent framework – CSELT internal technical report – Part of this report has been also published in Proceedings of PAAM'99 – London – pp.97-108 – April 1999.
- [**Bellifemine & al., 00**] : Bellifemine F., Giovani C., Tiziana T. Rimassa G., – Jade Programmer's Guide – Jade version 2.6 (<http://sharon.cselt.it/projects/jade/>) – 2000.
- [**Bernard, 95**] : Bernard Guerrien – La théorie des jeux – Economica – 1995.
- [**Bernard, 05**] : Bernard Walliser - Les justifications des notions d'équilibre de jeux – Ecole Nationale des Ponts et Chaussées – Sciences Sociales – 2007.
- [**Binmore, 07**] : Ken Binmore – *Playing for Real: A Text on Game Theory* – Oxford University Press US – Un cours d'initiation à la théorie des jeux et à son formalisme mathématique, par un des spécialistes mondiaux du sujet – 2007 .
- [**Boissier, 00**] : Olivier Boissier – Système multi-agents : coordination – support du cours DEA communication et coopération dans les systèmes à agents – 2000.
- [**Castelfranchi, 92**] : Castelfranchi C. – Social power : a point missed in multi-agent – DAI and HCI. Decentralized AI – (Demazeau & Muller Eds.) – Elsevier – pp. 49-62 – 1990.

- [Castelfranchi, 94] : Castelfranchi C. – Guarantees for autonomy in cognitive agent architecture – Proceedings of the First International Workshop on Agent Theories – Architectures and Languages (ATAL 94) – Wooldridge et Jennings (Eds.) – pp. 56-70 – 1994.
- [Carlsson, 98] : Carlsson B – et Johansson S.J. – An iterated hawk-and-dove game – Agents and Multi-Agent Systems – 1441 in Lecture Notes in Artificial Intelligence – Springer Verlag – pp. 25-37 – 1998.
- [Chaib-Draa, 92] : Chaib-Draa H. & Moulin B. & Mandiau R. & Millot P. – Trends in distributed artificial intelligence – Artificial Intelligence Review – Klower (Eds.) – pp.35-66 – 1992.
- [Champion, 03] : Alexis Champion – mécanisme de coordination multi-agent fondé sur des jeux : application à la simulation comportementale de trafic routier en situation de carrefour – Thèse de doctorat – l'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis – 2003.
- [Chandler & al., 58] : R.E. Chandler, R. Herman et E. W. Montroll – Traffic dynamics . studies in car following – Operations research 6 – pp: 165-184 – 1958.
- [Cohen, 89] : S. Cohen & R. Semaan – Simulation des carrefours isolés: le logiciel CASIMIR – Rapport sur convention d'étude AFME-INRETS n° 655-8842 – 1989.
- [Cohen, 90] : Cohen S. & Semaan R. – Un logiciel de simulation comparative de stratégies de fonctionnement de carrefours à feux isolés – Recherche Transports Sécurité – 26 – pp.49-54 – 1990.
- [Decker, 95] : Decker K. – Environment centred analysis and design of coordination mechanisms – PhD Thesis – University of Massachusetts – 1995.
- [Demazeau, 93] : Demazeau Y. – La plate-forme PACO et ses applications – Actes des 2èmes Journées Nationales du PRC-IA – 1993.
- [Demazeau & Müller, 91] : Y. Demazeau et J.P. Müller – Decentralized Artificial Intelligence (2) – Y. Demazeau and J.P. Muller (Eds.) – Elsevier Science Publisher B. V. (North-Holland) – 1991.
- [Drogoul, 93] : Drogoul A. – De la simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes – Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents – Thèse de l'Université Paris VI – 1993.

- [**Durfee, 89**] : Durfee E.H. – Lesser V. et Corkill D. – Trends in cooperative distributed problem solving – IEEE Knowledge and Data Engineering – pp.63-83 – 1989.
- [**Durfee & Al, 91**] : Edmund H. Durfee, Victor R. Lesser, Daniel D. Corkill – Distributed problem solving – In S. Shapiro – The Encyclopaedia of artificial intelligence – Second edition – John Wiley & Sons – 1991.
- [**Durfee & Montgomery, 90**] : Durfee E. & Montgomery T. – A Hierarchical protocol for coordinating multi-agent behaviours – 8th National conference on artificial intelligence – 1977.
- [**Edie & Foot, 60**] : L. C. Edie et R. S. Foote – Effect of shock waves on tunnel traffic flow – Proceedings of the highway research board 39 – pp: 492-405 – 960.
- [**Espié, 02**] : Espié S. – Approche multi-acteur dans la simulation de trafic automobile – In Organisation et applications des SMA – Chapitre 10 – Mandiau, Grislin-Le Strugeon et Péninou (Eds.) – Paris: Hermès – 2002.
- [**Esser & al., 99**] : J. Esser, L. Neurbert, J. Wahl et M. Schreckenber. Microscopic on line simulation of urban traffic. In A.Ceder (ed), Proceedings of the 14th international symposium of transportation and traffic theory. Jerusalem, pp: 517-534, 1999.
- [**Fenster, 95**] : Fenster M. – Kraus S. et Rosenschein J. – Coordination without communication – Experimental validation of focal point techniques – Proceedings of the ICMAS 95 – pp.102-108 – AAAI/MIT Press – 1995.
- [**Ferber, 95**] : Jack Ferber – Les systèmes multi-agents – InterEditions – 1995.
- [**Ferguson, 92**] : Innes A.Ferguson – " Touring Machines : Autonomous Agents with Attitudes" – University of Cambridge – 1992.
- [**Fleurance, 12**] : Philippe Fleurance – au delà de la science normale ? Pour de nouvelles relations entre les savoirs et l'action – L'éditorial du Réseau Intelligence de la Complexité animé par MCX & APC – avril 2012.
- [**Forbes & al., 58**] : T.W.Forbes, H.J.Zagorski, E.L.Holshouser et W.A.Deterline – Measurement of driver reactions to tunnel conditions – Highway research board – Proceedings 37 – pp: 345-357 – 1958.

- [**Galliers, 88**] : Julia Rose Galliers – A Theoretical Framework for Computer Models of Cooperative Dialogue – Acknowledging Multi-agent Conflict – these – Open University United Kingdom – 1988.
- [**Hachette, 03**] : Dictionnaire Hachette langue française – Hachette Educ (Eds.) – 2003.
- [**Hadouaj, 01**] : Sameh El Hadouaj – Conception de comportements de résolution de conflits et de coordination: Application à une simulation multi-agent du trafic routier – thèse de doctorat – Université Pierre et Marie Curie – Paris 6 – École Doctorale d'Informatique Télécommunications et Électronique de Paris – 2001.
- [**Handler, 90**] : Hendler J. – Tate A. et Drummond M. – AI planning : systems and techniques – AI Magazine Summer 90 – pp. 61-77 – 1990.
- [**Hoc, 96**] : HOC J., Supervision et contrôle de processus : la cognition en situation dynamique, PUG, Grenoble, 1996.
- [**Brakni, 10**] : Brakni Ilhem – Planification multi-agents pour la composition dynamique – Université de Tébessa – Algérie – 2010.
- [**Jennings, 93**] : Jennings N.R. – Commitments and conventions : the foundation of coordination in multi-agents systems – Know. Eng. Rev. 8(3) – pp. 223-250 – 1993.
- [**Kabachi, 01**] : N.Kabachi – Intelligence Artificielle Distribuée et Systemes Multi-Agents – Support de cours extrait du mémoire de thèse de doctorat (partie état de l'art).
- [**Kosonen, 95**] : I. Kosonen, M. Pursula – Object-oriented and rule-based modeling – experiences from traffic signal simulation – The sixth international conference on computing in civil and building engineering – Berlin – Germany – July 1995.
- [**Kourakos, 00**] : Mavromichalis Vangelis Kourakos – Vouros George – "ICAGENT: Balancing between Reactivity and Deliberation" – Workshop on Balancing Reactivity and Social Deliberation in Multi-Agent Systems – 14th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI) – 2000.
- [**Le Sturgeon, 95**] : Le Sturgeon E. – Une méthodologie d'autoadaptation dans un système multi-agents cognitif – Thèse de l'Université de Valenciennes – 1995.

- [**Lighthill & Whitham, 55**] : M. H. Lighthill et G. B. Whitham. On Kinematic Waves II: a theory of traffic flow on long, crowded roads. Proceedings of the royal society of London series A, 229, pp: 317-345, 1995.
- [**Malone, 87**] : Malone T.W. – Modeling coordination in organizations and markets – Management Sciences – p.1317-1332 – 1987.
- [**Mandiau, 01**] : Mandiau R. – Modélisation et évaluation d'organisations multi-agents – Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches – Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis – 2001.
- [**Mandiau, 02**] : Mandiau R. – Grislin-Le Strugeon E. et Péninou A. – Organisation et applications des SMA – Paris: Hermès – 2002.
- [**Müller, 96**] : Müller H.J. – Negotiation principles – Foundations of Distributed Artificial Intelligence – Wiley and Sons – 1996
- [**Murat, 00**] : Murat Yildizoglu – Introduction à la théorie des jeux – Dunod – coll – « Eco Sup » – 2003 – 165 p.(ISBN 978-2100071845).
- [**Nagel, 96**] : K. Nagel – Practical hopping models and traffic flow theory – Physical review E 53 – pp: 4655-4672 – 1996.
- [**Nagel & al., 99**] : K. Nagel, P. Simon, M. Rickert et J. Esser – Iterated transportation simulation for Dallas and Portland – In Brillion, Hurber, Scheckenberg, and Wallentowitz (eds) – Traffic and mobility: simulation – economics environment – Springer-Verlag – 1999.
- [**Nash, 51**] : John Forbes. Nash – Non-Cooperative Games : in Annals of Mathematics, vol.54 – 1951;
- [**Neumann, 47**] : von Neumann J. et Morgenstern O. – Theory of games and economic behaviour – Princeton University Press – 1947.
- [**Nicolle, 02**] : Anne Nicolle – Les systèmes multi-agents – 2002 – Source : <http://users.info.unicaen.fr/~anne/HTML/sma.pdf>
- [**Ossowski, 98**] : Ossowski S. – *Coordination in artificial agent societies* – Springer – 1998.

- [Papageorgiou, 98]**: M. Papageorgiou – Some Remarks on Macroscopic Traffic Modelling – Transportation research A 32(5) – pp: 323-329 – 1998.
- [Payne, 71]** : H.J. Payne – Models for freeway traffic and control – In bekey – G.A. (ed) – Mathematical Models of public systems 1 – pp: 51-61 – 1971.
- [Pesty, 97]** : Pesty S. & Brassac C & Ferrent P – Ancrer les agents cognitifs dans l'environnement – Actes des 5^{ème} journée francophone sur l'intelligence artificielle distribuée et les système multi-agents – Avril 1997.
- [Pénard, 08]** : T. Pénard – Introduction à la théorie des jeux – Faculté de Sciences Économiques – Université de Rennes – 2008.
- [Pipes, 1953]** : L.A. Pipes – An operational analysis of traffic dynamics – Journal of applied physics – volume 24 – no.1 – pp: 274-287 – 1953.
- [Prince, 98]** : Violaine Prince – Professeur des Université – un cahier des charges pour la modélisation d'agents cognitifs au sein d'un système socio-technique complexe – Institut d'Enseignement à Distance Université Paris 8 – 6 rue Edouard vaillant. 93500 Saint-Denis – 16 juin 1998.
- [PUoB, 02]** : Politechnica University of Bucharest – Agent intelligent cours web interactif – 2002 – Source : <http://turing.cs.pub.ro/auf2/html/chapters/chapters.html>
- [Quinqueton, 03]** : Quinqueton J. et Hammadi – Communication et émergence : une épidémie chez les termites – Actes d'Ingénierie des SMA : JFIAD'99 – Gleizes et Marcenac (Eds.) – Paris : Hermès – 1999.
- [Rasmussen, 89]** : Games and information: an introduction to game theory – Eric Rasmussen – 1989.
- [Rubinstein & Osborne, 94]** : Ariel Rubinstein et Martin Osborne – A Course in Game Theory – MIT Press – 1994 – 368 p.(ISBN 978-0262650403).
- [Russell, 95]** : Russell S.J. – Norvig P. – Artificial Intelligence – A Modern Approach – Prentice-Hall – Englewood Cliffs – 1995.
- [Russell, 97]** : Russell S.J – Rationality and intelligence – Artificial Intelligence – Vol.94 – 1997.

- [Shoham, 93] : Shoham Y. – Thoughts : Constructive game theory – <http://robotics.stanford.edu/~shoham/> – 2001.
- [Smith, 80] : Smith R.G. – The contract net protocol : high level communication and control in a distributed problem solver – IEEE Trans. on computers – pp. 1104-1113, 1980.
- [Todosiev & Barbosa, 1964] : E. P. Todosiev et L. C. Barbosa – A proposed model for the driver- vehicle system – Traffic engineering 34 – 17-20 – 1964.
- [Wooldridge & Jennings, 95] : Wooldridge M. & N.R. Jennings – Agent theories, architectures, and languages – Dans Wooldridge, Jennings (ed) – Intelligent Agents – Springer Verlag – 1995. p.1-22.
- [Wooldridge, 99] : Wooldridge M. – « Intelligent Agents » – Weiss G. – Multiagent Systems : A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence – Chapitre 1 – p.27-77 – The MIT Press – Cambridge – 1999.