

Cas des Intersections en Simulation Comportementale de Trafic Routier : Mécanisme de résolution de conflit.

Case of the Intersections in Behavioral Road traffic Simulation: Conflict Resolution Mechanism.

Champion^{1,2} A., Auberlet¹ JM, Mandiau² R., Espié¹ S. and Kolski² C.

¹ Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité

2 avenue du Général Malleret-Joinville, F-94110 Arcueil

Phone: +33 (0)1 47 40 70 00 – Fax: +33 (0)1 45 47 56 06

auberlet@inrets.fr, espie@inrets.fr

² LAMIH UMR CNRS 8530,

Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis,

Le Mont Houy – F-59313 Valenciennes Cedex 9

Phone: +33 (0)3 27 51 14 38 – Fax: +33 (0)3 27 51 13 16

christophe.kolski@univ-valenciennes.fr, rene.mandiau@univ-valenciennes.fr

RÉSUMÉ. En parallèle des modèles de simulation de trafic – dits mathématiques – qui décrivent le trafic de manière statistique, l'INRETS a mené depuis plus de 15 ans des recherches sur la simulation du trafic routier fondée sur le comportement réel des conducteurs. ARCHISIM est un modèle de simulation comportementale ; les phénomènes de trafic proviennent des actions individuelles et des interactions des différents et nombreux acteurs des situations routières. Son implémentation suit les principes multi-agent et, comme pour toute application à base d'agents, la coordination est un problème crucial. En partant du principe que les jeux peuvent être considérés comme la manière la plus simple de modéliser les situations de conflit, un mécanisme de coordination multi-agent à base de jeux a été conçu, implémenté et partiellement validé pour les situations de trafic aux intersections.

ABSTRACT. Besides mathematical simulation models which describe road traffic in a statistical way, the INRETS has led research works on traffic simulation based on the actual driver's behaviour for more than 15 years. ARCHISIM is a behavioural simulation model; traffic phenomena result from individual actions and interactions of the various and numerous actors of road situations. The implementation follows the multi-agent principles and, as for any agent-based application, the coordination is a crucial issue. By considering that games can be seen as the simplest way to model conflict situations, a multi-agent coordination mechanism based on games has been designed, implemented and partially validated for the traffic situations at the intersections.

MOTS-CLÉS : Simulation multi-agent, mécanisme de coordination, trafic routier, intersection.

KEYWORDS: Multi-agent simulation, coordination mechanism, road traffic, intersection.

Introduction

La gestion des conflits et la coordination sont probablement les champs de recherche les plus actifs en Intelligence Artificielle Distribuée et plus particulièrement pour les Systèmes multi-agent (Wooldridge et Jennings, 1995). De nombreux types de mécanismes de coordination ont été conçus et développés et un certain nombre d'entre eux utilise la théorie des jeux (Jennings, 1996 ; Parsons et Wooldridge, 2002).

Les jeux peuvent être considérés comme la manière la plus simple de modéliser les situations de conflit (von Neuman et Morgenstern, 1947 ; Beaufils, 2000). L'emploi initial de la théorie mathématique des jeux dans la conception d'un mécanisme de coordination multi-agent revient à Rosenschein (Rosenschein, 1985). Depuis lors, les recherches toujours croissantes en Intelligence Artificielle ont permis le développement et l'implémentation de nombreuses applications industrielles et commerciales qui mettent à profit le lien qui existe entre agents et théorie des jeux (Khoo et Chen, 1995). Dans le domaine de la simulation de trafic routier, relativement peu de publications ont vu le jour et seules quelques-unes sont liées aux travaux présentés ici (Kita et Kei, 1999). Cela montre que, même si le travail effectué pour formaliser et généraliser les méthodes de coordination multi-agent est important, les mécanismes sont souvent limités à des applications spécifiques.

Cet article expose tout d'abord la problématique de la coordination du trafic routier simulé et plus particulièrement le cas des intersections. Ensuite, un mécanisme distribué de coordination à base de jeux et fondé sur la notion de priorité est proposé. Enfin, l'implémentation de ce mécanisme et les résultats de simulation sont présentés.

Problématique de la coordination des mobiles dans des intersections

Le trafic routier constitue un problème dynamique et est caractérisé par l'interaction des éléments le composant : les usagers de la route, les infrastructures et les opérateurs. Le trafic peut être considéré comme un problème d'offre et de demande dont la difficulté repose sur deux postulats opposés (Espié, 2002). L'offre répond à un usage collectif : le réseau routier est dimensionné pour un certain flux. La demande est individuelle : chaque conducteur désire voyager sous ses propres conditions. Nous proposons de nous attacher tout particulièrement au contexte des carrefours.

La littérature nous fournit un certain nombre de modèles et de contributions traitant le cas des intersections (Brilon 2005, Li 2003, Troutbeck 1998). La grande majorité de ces modèles est fondée sur la théorie dite du « Gap Acceptance ». Or l'utilisation de tels modèles ne permet pas réellement de simuler des comportements observables au centre des carrefours, particulièrement dans le cas d'intersection non signalisée. Le principal obstacle réside dans la non prise en compte de comportements humains « réels » *i.e.* transgressant les règles du code de la route. Pourtant il est parfois mentionné dans les études réalisées à l'aide d'un modèle de simulation de trafic, que le comportement des conducteurs est pris en compte, mais ce comportement est normatif ; il suit les règles du Code de la Route (Golias, 2001). Or dans certaines situations, les conducteurs respectent des règles dites informelles, qui diffèrent de celles de Code de la Route (Björklund, 2005). Reposant sur le postulat que les phénomènes de trafic proviennent des actions individuelles et des interactions des différents acteurs de la situation routière (Espié *et al.*, 1994), le comportement des conducteurs simulés n'est pas normatif car le modèle proposé ne repose pas sur les règles que devraient suivre les conducteurs mais sur leurs actions et leurs motivations.

Considérons l'exemple d'un carrefour en croix sans aucune indication de priorité, où deux véhicules arrivant face à face vont tourner à gauche. En France et dans de nombreux autres pays, chacun des deux véhicules est prioritaire sur l'autre (priorité à droite). Un des deux conducteurs doit décider de passer devant et l'autre doit attendre. Si simultanément un troisième véhicule arrive sur la route transversale et veut traverser le carrefour, il a la priorité sur un des deux premiers véhicules mais l'autre est prioritaire sur lui. Cette situation courante est dynamique et l'ensemble des conflits n'est pas simple à gérer, même pour un conducteur expérimenté. Simuler cette situation n'a rien de trivial car elle peut potentiellement mener à un blocage soit à la suite d'un accident entre des véhicules qui sont entrés dans le carrefour, soit parce qu'aucun

des véhicules n'est entré dans le carrefour (Champion *et al.*, 2001). De tels cas de figures peuvent avoir comme résultat de bloquer définitivement une partie du flux et cela est inacceptable car l'expérimentation ou l'étude en cours serait invalidée : les manœuvres des mobiles simulés sont trop limitées par rapport aux phénomènes observables dans une intersection congestionnée.

L'objectif est de concevoir et d'implémenter un mécanisme capable d'éviter toutes situations menant à des situations non résolues (les véhicules ne rentrent plus dans le carrefour et/ou des véhicules entrent en collisions) tout en étant le plus fidèle possible en regard des situations observables au quotidien. Cela signifie que le comportement individuel des mobiles aux intersections doit être validé par des experts et que le comportement du trafic doit être statistiquement satisfaisant (validation par comparaison de données réelles à des données obtenues par simulation). Le mécanisme de coordination doit être rapide et aisément intégrable au modèle et nous avons opté pour l'idée d'un mécanisme de coordination à base de jeux. Ce mécanisme est maintenant présenté.

Proposition d'un mécanisme à base de jeux, fondé sur la notion de priorité

Simulation comportementale : contexte

Une situation de trafic simulé à une intersection peut être considérée comme un jeu. Un jeu (Guerrien, 1997) est une situation pour laquelle des individus (les joueurs) doivent choisir parmi un certain nombre d'actions (stratégies) possibles dans un format prédéfini (les règles du jeu). Le résultat de ces choix donne une sortie du jeu (la solution), à laquelle est associé un gain positif ou négatif pour chacun des participants. Dans le contexte de la simulation comportementale de trafic routier, les joueurs sont les mobiles approchant ou entrant dans l'intersection. Les actions possibles des joueurs peuvent être accélérer et freiner (il s'agit bien entendu d'une limitation subjective), la principale caractéristique d'un mécanisme de coordination dans le contexte présent étant de contraindre l'accélération. La conception du mécanisme de coordination est alors de définir les règles et la méthode de résolution.

Dans le cas du trafic routier, les règles sont celles qui respectent le Code de la Route. Or c'est loin d'être toujours vrai, surtout dans le contexte des carrefours, il arrive même que les usagers créent eux-mêmes leurs propres règles (Björklund, 2005). Alors, que peut-on dire de la théorie des jeux dans le contexte de la simulation comportementale de trafic routier ? D'une part, les hypothèses faites en théorie des jeux sont fortes et difficilement compatibles avec ce que l'on sait du comportement humain. D'autre part, une grande partie des travaux réalisés en théorie des jeux porte sur la recherche et l'étude des équilibres dans l'objectif de trouver une solution aux jeux. Ces deux remarques sont essentiellement dues à une hypothèse qui concerne la connaissance du jeu qu'ont les joueurs. Le théoricien du jeu suppose bien souvent que tous les joueurs jouent au même jeu. Cette hypothèse est très difficile à valider, voire contraire aux comportements observables dans le contexte de la conduite automobile en carrefour (Saad *et al.*, 1990). De plus, la multiplicité possible des équilibres peut rendre la recherche d'un équilibre coûteuse en calculs. Par ailleurs, les situations de carrefour étant fortement dynamiques, ce qui sous entend de ré-évaluer fréquemment la situation, les mobiles n'ont pas -ou peu- de mémoire, nous ne pourrions considérer que les jeux à un seul tour. De plus, les mobiles ne perçoivent les situations que localement ; dans ce cas l'information est dite incomplète (de nombreux travaux en psychologie montrent que le niveau de ressources consacrée au traitement des interactions est limité et par conséquent que toutes les interactions ne peuvent pas être traitées). De même, l'autonomie des agents impose une prise de décision indépendante des autres (à chaque cycle, les mobiles calculent pseudo-parallèlement leurs actions) ; dans ce cas, l'information est dite imparfaite.

Au vu de tous ces éléments, deux idées se dégagent. Premièrement, nous assumons la définition et le choix de notre critère de résolution et, par conséquent, la conception de la matrice modélisant le jeu. Deuxièmement, tout ce qui touche à l'aspect comportemental, qui n'est pas pris en compte par le jeu, est considéré avant la création du jeu. Pour ce faire, la notion de priorité a été utilisée du fait de son rôle primordial pour le conducteur dans sa stratégie de régulation de la vitesse (Saad *et al.*, 1990).

Relation de priorité

À l'approche d'une intersection, le comportement du conducteur dépend de son environnement (infrastructures, autres véhicules...), de ses buts et des comportements des autres conducteurs. En effet, les règles définies par le Code de la route ne suffisent pas à expliquer les comportements observés : par exemple, il est fréquent d'observer un conducteur prioritaire ralentir puis ré-accélérer (Saad *et al.*, 1990). En fait, dans les situations réelles, les conducteurs ont rarement un comportement strictement normatif. D'après des études menées en psychologie de la conduite (Saad *et al.*, 1990 ; Houtenbos *et al.*, 2005), ce comportement est dû au fait qu'un conducteur ignore le comportement et les stratégies de régulation des autres conducteurs (notamment la régulation de la vitesse qui peut se traduire par des freinages tardifs ou anticipés). Un conducteur déduit le comportement des autres de ce qu'il perçoit d'eux en projetant son propre comportement. Chaque conducteur peut alors estimer (plus ou moins bien) les relations de priorité qu'il entretient avec chacun des autres véhicules. La priorité est ici entendue comme une notion large, tenant compte de divers aspects (Code de la route, vitesse, temps d'attente, position vis-à-vis du carrefour, etc.) et changeante avec le temps et l'évolution des situations (Champion *et al.*, 2002a).

Le mécanisme de coordination se déroule alors en trois étapes. À chaque cycle, chaque mobile détermine (ou estime) les relations de priorité qu'il entretient avec les autres mobiles. Puis il modélise, sous forme de jeu, la situation locale représentée par ces relations. Enfin, il résout le jeu. Ce jeu est statique (à un seul tour) et la dynamique du système est exprimée par le changement potentiel des relations de priorité (donc du jeu) à chaque cycle. Le mécanisme est distribué et une situation globale donnée peut être, au fil du temps, interprétée de manière différente par chaque mobile. À ce stade, nous supposerons qu'un mobile sait déterminer les relations de priorités qu'il entretient avec les autres joueurs.

Le principe du fonctionnement global est basé sur une décision à prendre par les différents agents à chaque cycle. Chaque mobile joueur approchant d'une intersection doit d'abord déterminer avec quel autre joueur il va jouer, puis le jeu auquel il va jouer. Enfin, chaque joueur doit résoudre son jeu, c'est-à-dire choisir l'action qui lui semble la plus intéressante.

Modélisation des situations de base à deux joueurs

Une fois la méthode de résolution connue, passons à la conception des matrices. Pour simplifier nous ne considérerons que des carrefours en X et en T. En effet intuitivement, nous pouvons supposer qu'un carrefour complexe est la somme de carrefours simples, hypothèse que l'on retrouve dans l'exemple d'un carrefour giratoire (somme de carrefour en T) et dans certaines recherches qui suggèrent qu'un conducteur perçoit une intersection complexe comme une succession de carrefour simple (*e.g.* Saad *et al* 1990). Pour les situations impliquant deux mobiles, nous remarquons qu'il existe quatre types de situations (Fig. 2).

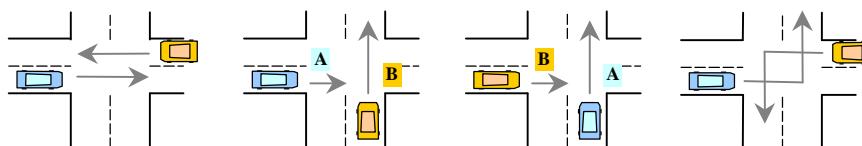


Figure 2 : Les quatre situations impliquant deux mobiles.

Ces situations modélisées par des jeux sont des matrices de taille 2×2 dont les cellules sont des couples de gain. Chaque cellule du tableau correspond donc à un résultat du jeu, qui est un vecteur de gains. Cette matrice des gains est appelée forme stratégique du jeu. Comme les actions longitudinales possibles pour un mobile sont accélérer et freiner (symbolisés par les termes *Go* et *Stop*), une matrice des gains pour un jeu à n joueurs est une matrice de dimension n , de taille 2^n , et dont les vecteurs gain sont de taille n . Ceci implique 32 variables à déterminer. Une analyse non détaillée dans le cadre de ce papier a été effectuée pour ne considérer que les variables nécessaires (Champion, 2003). Une explication des variables introduites correspondant aux différentes situations/matrices est détaillée dans (Mandiau *et al.*, 2008). Celle-ci amène à ne considérer que 9 variables pour l'ensemble des quatre matrices finales (Fig. 3), avec les contraintes suivantes :

$$\{x_1, x_3, y_1, y_2, y_3, y_6, z_1, d_1, d_2\} \quad \square \square^{\square} ; y_3 > y_1 ; y_2 > y_6 \quad (1)$$

On note : $Prio(A,B)$ la relation de priorité telle que A est prioritaire sur B et $\neg Prio(A,B)$ la relation de priorité telle que A n'est pas prioritaire sur B.

$A \setminus B$	Go	$Stop$	$A \setminus B$	Go	$Stop$	$A \setminus B$	Go	$Stop$
Go	(x_1, x_1)	$(x_3, 0)$	Go	$(-y_1, -y_2)$	$(y_3, 0)$	Go	$(-y_2, -y_1)$	$(y_6, 0)$
$Stop$	$(0, x_3)$	$(0, 0)$	$Stop$	$(0, y_6)$	$(0, 0)$	$Stop$	$(0, y_3)$	$(0, 0)$
$\neg Prio(A,B) \wedge \neg Prio(B,A)$			$Prio(A,B) \wedge \neg Prio(B,A)$			$\neg Prio(A,B) \wedge Prio(B,A)$		
$A \setminus B$	Go	$Stop$	$A \setminus B$	Go	$Stop$	$A \setminus B$	Go	$Stop$
Go	$(-z_1 + d_1, -z_1 - d_2)$	$(z_1, 0)$	$Stop$	$(0, z_1)$	$(0, 0)$			
			$Prio(A,B) \wedge Prio(B,A)$					

Figure 3 : Matrices finales pour les jeux à deux joueurs.

En fonction de la perception du carrefour, nous devons considérer le fait que l'information est incomplète : chaque joueur ne prend pas les gains des autres en compte. Ainsi, un joueur choisit l'action en maximisant ses gains : il fait la somme des paiements relatifs à chaque action. Plus précisément, l'agent A sélectionne la matrice de décision $m_{A/B}$ correspondante (il en est de même du joueur B). Le joueur A sélectionne la stratégie S_A telle que :

$$S_A = \{a^* \in \{Go, Stop\} / g_A(B) = \max(m_{A/B}(a^*, Go) + m_{A/B}(a^*, Stop))\} \quad (2)$$

De même, le joueur B sélectionne sa stratégie par :

$$S_B = \{b^* \in \{Go, Stop\} / g_B(A) = \max(m_{A/B}(Go, b^*) + m_{A/B}(Stop, b^*))\} \quad (3)$$

Les situations à deux joueurs sont maintenant modélisées et, les conflits sont gérés d'une manière « réaliste ». Il est désormais possible de considérer les situations à plusieurs joueurs.

Généralisation à plusieurs joueurs

Lorsqu'une situation implique trois joueurs ou plus, la matrice du jeu la modélisant est également fondée sur les relations de priorité. Pour une situation à trois joueurs, 6 relations binaires existent ($B \rightarrow C$, $C \rightarrow B$, $A \rightarrow B$, $B \rightarrow A$, $A \rightarrow C$, $C \rightarrow A$). Chaque jeu à trois joueurs correspond donc à trois jeux à deux joueurs ($A-B$, $A-C$ et $B-C$) et il existe $64 (2^6)$ jeux à trois joueurs possibles. Les matrices à deux joueurs peuvent être agrégées en une unique matrice à trois dimensions dont les cellules sont des vecteurs de gains de taille 3. Soit un joueur A parmi un ensemble de trois joueurs $\{A, B, C\}$. Le joueur A entretient deux relations de priorité avec le joueur B et également deux relations avec le joueur C. Deux relations mènent à un jeu à deux joueurs parmi un ensemble de quatre jeux possibles.

Plus généralement, la méthode d'agrégation qui a été choisie est la somme des gains et la formule pour le jeu à n joueurs est présentée ci-dessous. En supposant un ensemble $J = \{1, 2, \dots, k, \dots, n\}$ de joueurs, le gain G_k du joueur k pour un résultat $S = (S_1, S_2, \dots, S_k, \dots, S_n)$ dans un jeu n -joueur est décrit par la formule suivante :

$$\forall k \in J, S_k = \{k^* \in \{Go, Stop\} / G_k = \square_{i=1..n-k} g_k \square^i \} \quad (4)$$

Une fois le jeu déterminé, chaque joueur doit choisir sa stratégie suivant la formulation précédente. La méthode est la même que pour deux joueurs (maximisation de la somme des gains relatifs à chaque action). Ceci permet de prendre en compte qu'un joueur ne perçoit pas la situation dans sa globalité mais seulement ce qui est relatif dans son environnement local. Un joueur ne considère que ce qui vient de ses interactions avec les autres et ne connaît pas *a priori* la nature des interactions existantes entre deux autres joueurs. Par exemple, pour un jeu à trois joueurs, chaque joueur ne considère que quatre relations sur les six : celles dans

lesquelles il intervient (pour A : A→B, B→A, A→C, C→A). Bien entendu, avec un tel manque d'information, les solutions des jeux ne peuvent pas être toujours optimales et quelques cas (situations) peuvent mener à des accidents ou des interblocages. Il est alors nécessaire de choisir les valeurs des gains des matrices à deux joueurs dans l'objectif de tendre vers une certaine optimalité dans la résolution des jeux à trois joueurs. Pour ce faire, une étude semi-formelle fondée sur la résolution de systèmes d'inéquations a été réalisée à l'aide du logiciel Scilab¹ (Champion, 2003). Pour les jeux à trois joueurs, les valeurs retenues sont telles que seuls 6 cas d'interblocages sur 64 cas possibles apparaissent (Fig. 4).

A \ B	Go	Stop	A \ B	Go	Stop	A \ B	Go	Stop	
Go	(1, 1)	(1, 0)	Go	(-1, -6)	(2, 0)	Go	(-6, -1)	(1, 0)	
Stop	(0, 1)	(0, 0)	Stop	(0, 1)	(0, 0)	Stop	(0, 2)	(0, 0)	
$\neg \text{Prio}(A, B) \wedge \neg \text{Prio}(B, A)$				$\text{Prio}(A, B) \wedge \neg \text{Prio}(B, A)$				$\neg \text{Prio}(A, B) \wedge \text{Prio}(B, A)$	
A \ B	Go	Stop	A \ B	Go	Stop	A \ B	Go	Stop	
Go	(-1+1, -1-5)	(1, 0)	Stop	(0, 1)	(0, 0)	$\text{Prio}(A, B) \wedge \text{Prio}(B, A)$			

Figure 4 : Matrices de base à deux joueurs pour les situations à trois joueurs.

La même démarche peut être réalisée pour des jeux à n joueurs (Champion, 2003). Ces résultats théoriques étant encourageants, un mécanisme à base de ces jeux a été réalisé et appliqué au modèle de simulation ARCHISIM (annexe 1).

Application à la simulation comportementale de trafic

Implémentation du mécanisme dans l'outil de simulation de trafic

Implémenter un mécanisme de coordination multi-agent au sein d'un modèle de simulation pseudo-parallèle à temps discret impliquant un nombre important d'agents, dont certains peuvent être humains, n'est pas trivial. Tout d'abord parce que les agents doivent interpréter leur environnement et agir tous ensemble au même moment et qu'un agent logiciel et un agent humain ne communiquent pas de manière identique, cela implique des contraintes importantes.

Considérons les différentes étapes de la coordination, par l'utilisation de jeux, des actions d'un agent avec celles des autres à une intersection. Chaque agent estime tout d'abord s'il y a jeu ou non, c'est-à-dire s'il se détermine comme joueur pour un jeu lié à son intersection. Puis, l'agent joueur recherche les autres agents « liés » à la même intersection. Ensuite, le joueur détermine s'il est un joueur actif (c'est-à-dire s'il va activement prendre part au jeu au cours du pas de simulation courant). S'il est un joueur actif, l'agent détermine les relations de priorité qu'il entretient avec les autres joueurs et les joueurs susceptibles de participer à son jeu, ce qui détermine le jeu auquel il va jouer. Enfin, l'agent résout le jeu et agit en fonction de la solution trouvée.

En amont du jeu proprement dit, des étapes liées à la perception sont nécessaires. Ainsi pour savoir si un autre agent est un joueur potentiel pour son jeu, un agent doit estimer si lui et l'autre se trouvent à la même intersection. Pour diminuer les temps de calcul (contrainte induite par l'immersion potentielle d'un sujet humain dans la simulation), chaque agent détermine le carrefour sur lequel il joue et met l'information à disposition de ses accointances. Mais cette information ne leur est disponible qu'au pas de simulation suivant, ce qui peut introduire un décalage au niveau des jeux joués par les différents agents. A la suite de cela, chaque joueur détermine s'il prend une part active au jeu pendant le cycle courant de la simulation en estimant sa situation vis-à-vis des autres joueurs. En effet, moins il y a de joueurs actifs, plus le calcul est

¹

SciLab : <http://www-rocq.inria.fr/scilab>

rapide ; si un joueur est momentanément bloqué par un autre, il lui est inutile de jouer pour calculer une accélération qui sera de toute façon nulle.

Vient ensuite la détermination des relations de priorité qui est une étape essentielle car c'est d'elle que dépend en grande partie le bon fonctionnement du mécanisme de coordination puisqu'elle donne naissance au jeu qui sera joué par l'agent pendant le cycle courant. Il s'agit de l'étape qui nécessite le plus de calculs puisqu'elle est principalement fondée sur l'interprétation de l'environnement local : passage des informations numériques en informations symboliques. Ces informations sont ensuite traitées pour obtenir les différentes priorités qui sont finalement agrégées (Champion *et al.*, 2002a). Une fois les joueurs actifs connus et les relations de priorité associées également connues, un joueur actif détermine les joueurs susceptibles de participer à son jeu. A ce stade, nous devons préciser que pour plus de rapidité et de simplicité, et pour être plus en adéquation avec la conduite réelle, seuls trois autres mobiles au maximum sont considérés. En effet de nombreux travaux en psychologie de la conduite nous montrent qu'un conducteur ne peut traiter toutes les interactions qu'il perçoit, dû d'une part au temps limité dont il dispose et d'autre part du niveau de ressources également limité dont il dispose pour traiter les interactions (*e.g.* Houtenbos, 2005). Ceci implique qu'un jeu ne comporte au maximum que quatre joueurs : le joueur « principal » et les mobiles (s'ils existent) les plus contraignants sur chacune des branches entrantes de l'intersection.

Lorsque les joueurs et les relations de priorité sont établis, l'agent possède alors les matrices à deux joueurs. Il ne reste à l'agent qu'à créer son jeu à n joueurs et à le résoudre. La matrice finale, qui est en théorie l'agrégation des matrices à deux joueurs, n'est en fait pas explicitement calculée par l'agent ; celui-ci peut, par artifice de calcul, directement obtenir la solution. En effet, sachant que la méthode de résolution ne prend en compte que les paiements relatifs à l'agent et que les paiements relatifs à l'action Stop sont toujours nuls (Fig. 4), l'agent n'effectue que la somme des paiements relatifs à l'action Go. Si cette somme est positive, il choisit cette dernière stratégie, sinon il choisit la stratégie Stop. Par conséquent, une évaluation en terme de complexité temporelle/mémoire (Fig. 5) montrent que lorsque l'espace mémoire nécessaire ou le temps dans le pire des cas augmente en fonction du nombre d'agents. Cependant, nous considérons qu'au vu du nombre d'agents (*i.e.* nombre de joueurs jouant au même jeu) directement en conflits, le mécanisme donne des résultats satisfaisants.

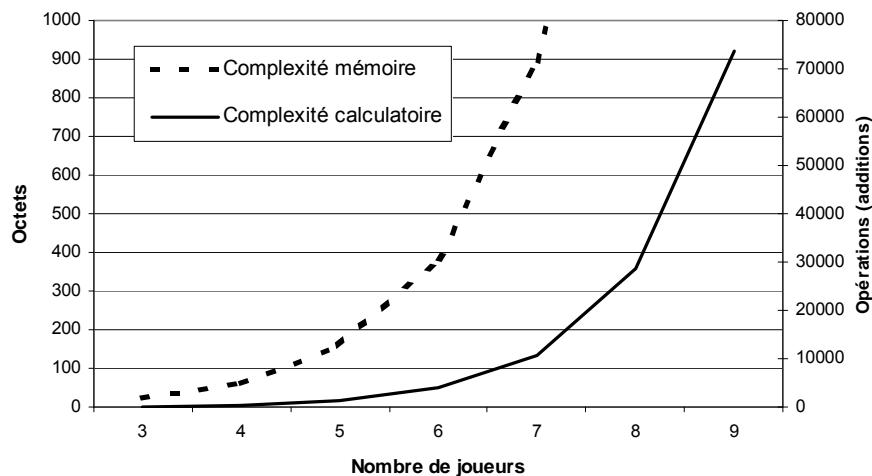


Figure 5 : Complexité informatique du mécanisme distribué (Champion, 2003).

Pour une situation de trafic globale donnée, chaque mobile voit et traite la situation localement, relativement à lui-même. Il est donc possible que les joueurs jouent à des jeux différents pour coordonner leurs actions, ce qui pourrait être à l'origine d'interblocages (voire d'accident²). Dans les faits, cela se produit lorsqu'un

² Nous sommes conscients que l'objectif de notre étude n'est pas de reproduire les accidents éventuels produits par des conducteurs humains.

nouveau mobile approche de l'intersection puis, la situation se stabilisant, les jeux des différents joueurs s'harmonisent, rendant la gestion des conflits globalement cohérente. Toutefois, les cas d'accidents ou d'interblocages ne sont pas totalement à exclure. La gestion de ces interblocages est effectuée lors du calcul des relations de priorité, principalement en utilisant les notions de temps d'attente et d'impatience : lorsqu'un agent estime qu'il attend depuis trop longtemps, il décide qu'il devient prioritaire sur les autres.

Un mécanisme de coordination multi-agent fondé sur les jeux et la notion de priorité a été proposé et implémenté. Il présente, en théorie, des propriétés intéressantes et les cas non résolus par le mécanisme sont reconstruits et pris en compte grâce au calcul dynamique des relations de priorité et donc du jeu. Les phases de test et validation sont maintenant présentées.

Validation : premiers résultats

La validation d'un mécanisme de coordination du trafic aux intersections pour un modèle de simulation comportementale de trafic routier s'effectue à deux niveaux et en plusieurs étapes. Le mécanisme doit être validé au niveau local et au niveau global. Au niveau local, la validation doit être réalisée conjointement par l'utilisation de résultats d'études très fines au niveau des données (discrétisation temporelle élevée notamment) et par l'observation d'experts ; les variables importantes sont la vitesse, l'accélération, les temps d'attente, les créneaux temporels pris pour entrer dans l'intersection... Au niveau global (flux du trafic), la validation doit être réalisée par l'utilisation de résultats d'études trafic ; les variables importantes sont les vitesses de flux, les débits... Les différentes étapes de la validation sont liées à deux aspects indépendants. D'une part, il faut considérer qu'une intersection se présente avec ou sans zone de stockage ; une zone de stockage est créée par la présence d'un ou plusieurs flux entrants comportant plusieurs voies, ceci favorise l'apparition de conflits potentiels. D'autre part, il faut considérer qu'une intersection peut être simple (carrefour en T ou en X) ou complexe (suite de carrefours simples). Tous ces éléments amènent une validation longue et complexe qui demande un déroulement précis allant de la simulation d'un carrefour simple impliquant deux mobiles à la simulation d'un important axe urbain.

La première validation porte sur la vitesse des mobiles à l'approche d'un carrefour. Pour cela, il faut considérer deux mobiles arrivant à une intersection, l'un des mobiles étant, de par le Code de la route, prioritaire sur l'autre. Les résultats de simulations ont été comparés à ceux d'une étude menée en psychologie de la conduite (Saad *et al.*, 1990) et sont présentés ci-après (Fig. 6).

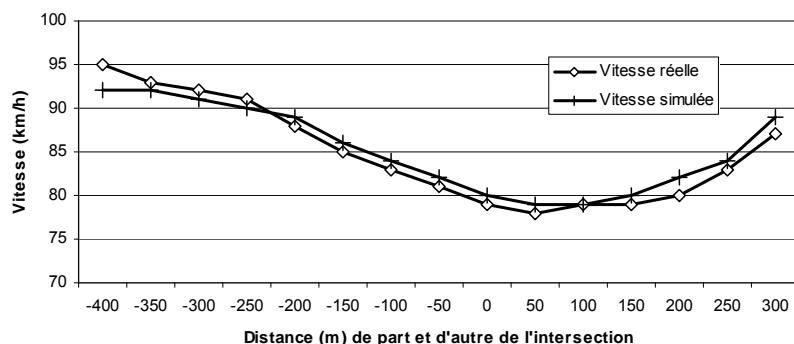


Figure 6 : Vitesses moyennes pratiquées à une intersection en X par un mobile prioritaire en présence d'un autre mobile non prioritaire.

Une telle variation de la vitesse est due à l'estimation, à chaque cycle de la simulation, des relations de priorité (au sens large) et à la dynamique ainsi créée : tant que le mobile *a priori* prioritaire n'est pas certain du ralentissement de l'autre, il ne se considère pas comme prioritaire. Cette expérimentation valide partiellement le calcul de la priorité.

De nombreuses autres simulations concernant un carrefour en X avec un trafic aléatoirement généré et plus ou moins dense ont été effectuées. Une illustration est donnée par l'exemple ci-après. Il s'agit d'un carrefour

simple sans réelle zone de stockage. La simulation de cette intersection est fondée sur une intersection réelle, située à Reggio Calabria en Italie. Ce carrefour est équipé en panneaux de signalisation. La répartition du trafic est de 816 véhicules par heure (vh/h) en provenance du Sud (Fig. 7), de 685 vh/h du nord, de 428 vh/h de l'Est et de 26vh/h de l'Ouest. Les données de trafic disponibles étaient uniquement les débits par axes et les pourcentages de mouvement tournants.

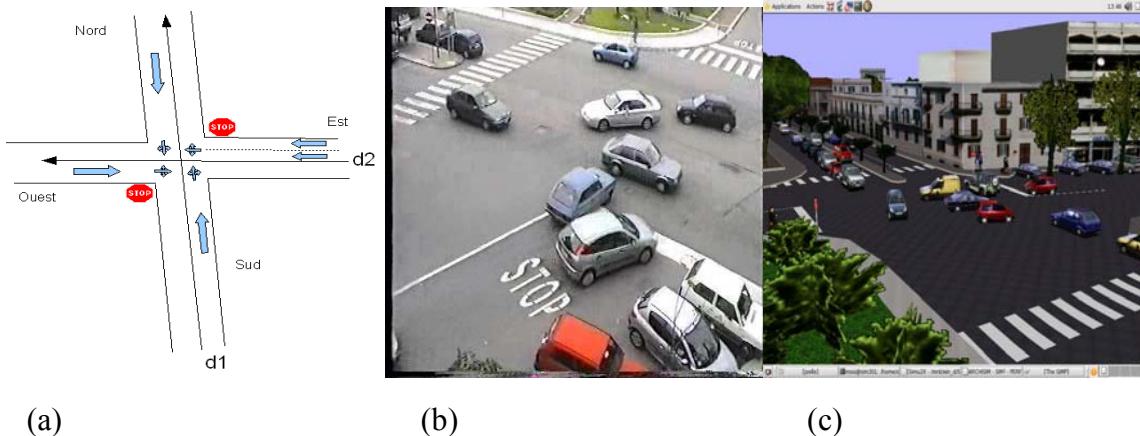


Figure 7 : Configuration d'un carrefour (a), vue réelle (b) et sa représentation 3D (c)

Pour connaître le taux d'erreur de simulation, l'indicateur d'écart quadratique moyen relatif (EQMR) a été utilisé pour comparer les débits simulés et les débits réels sur chacun des axes entrants du carrefour. L'EQMR par axe n'excédait pas 15 pour chacun des axes du carrefour sur lequel le trafic était significatif ; le manque de données sur l'axe ouest (discrétisation temporelle trop grande par rapport au volume de trafic) ne permet pas de comparer significativement les données réelles et simulées. Ces résultats sont encourageants car aucune situation de conflits non résolue par l'algorithme n'est apparue.

De telles simulations permettent de clôturer la première phase de validation du mécanisme de coordination. Ces validations concernent des carrefours simples isolés et sans zone de stockage et ne permettent donc en rien de valider le mécanisme d'un point de vue trafic. Car, dans ce contexte, mesurer les débits et les vitesses n'a que peu d'intérêt. De plus, le temps de traversée et le temps d'attente sont des variables complexes qui dépendent de la configuration du carrefour (à feux ou non, avec signalisation ou non) et de la densité du trafic sur les différents axes (Gattuso *et al.*, 2005). Le plus satisfaisant est de simuler un axe urbain existant en comparant les résultats avec des mesures réelles.

Conclusion et perspectives

L'objectif initial de ce papier vise à proposer un mécanisme de coordination multi-agents inspiré des matrices de jeux, en vue de contribuer à des applications de simulation de carrefour routier en contexte urbain. Nous savons que les carrefours sont des lieux sensibles en terme d'interaction entre des véhicules. Nous avons choisi d'étudier ce problème plus précisément en essayant de développer un mécanisme à la fois simple et efficace. Nous assurons en particulier que le trafic global reste cohérent dans le but de réduire les interblocages et d'être relativement proche des mesures réelles.

Le mécanisme proposé est *a priori* simple. Il est composé de deux étapes principales. Dans une première étape, les agents recherchent les différentes interactions avec les autres agents. La seconde étape consiste à déterminer la matrice de décision qui correspond à la situation complexe envisagée. Au vu du nombre d'informations manipulées, ce mécanisme reste efficace pour un nombre d'agents en situation conflictuel relativement faible. Nous avons également implémenté ce mécanisme dans l'outil de simulation Archisim.

Les validations qui ont été réalisées jusqu'alors portent plutôt sur des intersections isolées sans réelle zone de stockage. Néanmoins les simulations que nous avons réalisées pour l'étude d'un carrefour giratoire à une voie de circulation nous ont permis de mettre en évidence que le mécanisme proposé dans cette contribution tout en autorisant le non respect des règles du code la route dans le cas des intersections favorise

l'émergence d'un trafic cohérent, en comparaison de données de trafic observé (Mandiau 07, Auberlet 08). De plus une validation à grande échelle portant sur un grand axe urbain est à l'étude mais elle nécessite des données fines extrêmement difficile à obtenir en raison justement de leur finesse (Wu, 2003). Cette étude consisterait à simuler une artère majeure comportant plusieurs carrefours consécutifs. Les données qui nous sont nécessaires, sont des données géographiques (configuration des axes, nombre de voies, voies de présélection), des données trafic (débits, vitesses, pourcentages directionnels, cycles de feux...). L'objectif final est de proposer un outil de simulation capable d'être exploité pour des études du système trafic portant sur l'urbain, tout comme il a été déjà exploité pour la réalisation d'études trafic portant sur les réseaux autoroutiers.

Remerciements.

Les auteurs tiennent à remercier Christian Lancelin et David Torjemane de CS-Srilog pour leur soutien. Ces travaux ont été partiellement financés par une bourse CIFRE. Les auteurs tiennent également à remercier le professeur Domenico Gattuso et son équipe de recherche de l'Université de Reggio de Calabre en Italie pour nous avoir fourni les données de trafic.

Bibliographie

- Auberlet J.-M., Tripodi A., Espié S., Gattuso D., 2003. The use of innovative technologies in the case of the space reduction in urban environment: study of a lane keeping system. Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference, Montréal, Canada. ISBN 1-56555-284-9.
- Auberlet J.-M., Espié S., Tripodi A., 2004. Integrated Approach : a new method to study the Intelligent Transport System. Proceedings of the 83th Transportation Research Board annual meeting, Washington D.C., USA.
- Auberlet J.-M, Doniec A., Mandiau R., Conflict in one-lane roundabout: keep the priority or keep calm? Proceedings of Third International Symposium of Transport Simulation, Queensland, Australia.
- Beaufils B., 2000. Modèles et simulations informatiques des problèmes de coopération entre agents. Thèse de Doctorat de l'Université de Lille, France.
- Björklund G.M., Åberg L., 2005. Driver behaviour in intersections: Formal and informal traffic rules. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Volume 8, Issue 3 , Pages 239-253.
- Brilon W, Miltner T. Capacity and Delays at Intersections without Traffic Signals. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 1920, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2005, pp. 32–40.
- Champion, A., Mandiau R., Kolski C., Heidet A., Kemeny A., 1999. Traffic generation with the SCANeR II simulator: towards a multi-agent architecture. Proceedings of the Driving Simulation Conference, Paris, France.
- Champion A., Espié S., Mandiau R., Kolski C., 2001. Multi-agent road traffic simulation: the coordination issue. Proceedings of the 13th European Simulation Symposium, Marseille, France. In Giambiasi N. and Frydman C. (Eds), London, SCS Europe Bvba., pp. 903-908.
- Champion A., Espié S., Mandiau R., 2002a. Let interactions live – how to improve the behavior of simulated drivers approaching a crossroad. Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference, San Diego, USA. ISBN 1-56555-255-5.
- Champion A., Zhang M.Y., Auberlet J.M., Espié S., 2002b. Behavioural simulation towards high-density network traffic studies. Proceedings of the third International Conference on Traffic and Transportation Studies, Guilin, China. ISBN 0-7844-0630-8.
- Champion A., 2003. Mécanisme de coordination multi-agent à base de jeux: application à la simulation comportementale de trafic routier en situation de carrefour. Thèse de Doctorat de l'Université de Valenciennes, France.

El Hadouaj S., Espié S., Drogoul A., 2000. To combine reactivity and anticipation: the case of conflicts resolution in a simulated road traffic. Proceedings of the 2nd International Multi-Agent Based Simulation Workshop, Boston, USA. In Moss & Davidson (Ed.), Springer, pp.82-96.

El Hadouaj S., 2004. Conception de comportements de résolution de conflits et de coordination : Application à une simulation multi-agent du trafic routier. Thèse de Doctorat de l'Université de Paris 6, France.

Espié S., Saad F., Schnetzler B., Bourlier F., Djemane N. 1994. Microscopic traffic simulation and driver behaviour modelling: the ARCHISIM project. Proceedings of the Road Safety in Europe ans Strategic Highway Research Program, VTI Konferens 2A part3, Lille, France.

Espié S., 1999. Vehicle driven simulator versus traffic-driven simulator: the INRETS approach. Proceedings of the Driving Simulation Conference, Paris, France.

Espié S., 2002. 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.

Gattuso D., Musolino D., Tripodi A., 2005. Analyse expérimentale du comportement des conducteurs dans un carrefour urbain sans feux. Recherche Transports Sécurité, volume 22/88, pp.205-224.

Golias J., Yannis G., Antoniou C., 2001. Impact of Advanced Driver Assistance Systems on Urban Traffic Network Conditions. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 1, no. 3 (2001), pp. 277 – 289.

Guerrien B., 1997. La théorie des jeux, Paris, Economica.

Houtenbos, M., Hagenzieker M., Wieringa P., Hale A., 2005. The role of expectations in interaction behaviour between car drivers. In G. Underwood (Ed.), Traffic and Transport Psychology : Theory and Application (1st ed., pp. 303-314). Kidlington, Oxford: Elsevier.

Khoo N.K., Chen D., 1995. The evolution of intelligent agent and game theory: towards the future and intelligent automation. Surprise Project, Intelligent Agents and Games Final Report.

Kita H., Kei F., 1999. A merging-giveaway behavior model considering interactions at expressway on-ramps, In Transportation and Traffic Theory (Avishai Ceder ed.), Pergamon, pp. 173-187.

Jennings N.R., 1996. Coordination techniques for distributed artificial intelligence. In Foundation of Distributed Artificial Intelligence, Wiley & Sons, 1996, pp. 187-210.

Li W, Wang W, Jiang D. Capacity of Unsignalized Intersections with Mixed Vehicle Flows. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1852, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2003

Mandiau R., Doniec A., Piechowiak S., Auberlet J.-M., and Espié S., 2007. Anticiper pour maîtriser la violation de normes : application à la simulation de trafic routier. Proceedings of Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents.

Mandiau R., Champion A., Auberlet J-M., Espié S. Kolski C., 2008. Behaviour based on decision matrices for a coordination between agents in urban traffic simulation. *Applied Intelligence*, 28, pp. 121-138.

Parsons S., Wooldridge M., 2002. Game Theory and Decision Theory in Multi-Agent Systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 5(3), pp. 243-254.

Rosenschein J.S., 1985. Rational interaction: cooperation among intelligent agents. PhD Thesis of the Stanford University.

Saad F., Delhomme P., Van Elslande P., 1990. Driver's speed regulation when negotiating intersections. In: Koshi M. (ed.), *Transportation and Traffic Theory*, Elsevier.

Saad, F., 1992. In-depth analysis of interactions between drivers and the road environment: contribution of on-board observations and subsequent verbal report. Proceedings of the 4th Workshop of ICTCT, University of Lund, Bulletin 110.

Tripodi A., Auberlet J.-M., Espié S., Gattuso D., 2003. Study of the stop&go system on driver's behaviour in urban environment. Proceedings of the 10th ITS World Congress, Madrid, Spain.

Troutbeck R. Background for HCM Section on Analysis of Performance of Roundabouts In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1646, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1998, pp. 54–62.

Von Neumann J., Morgenstern O., 1947. Theory of games and economic behavior. Princeton University Press, Princeton.

Wooldridge M., Jennings N. 1995. Agent theories, architectures, and languages. In Wooldridge and Jennings (eds.), Intelligent Agents, Springer-Verlag.

Wu J., Brackstone M., McDonald M., 2003. The validation of a microscopic simulation model: a methodological case study. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 11, Issue 6, Pages 463-479.

Annexe 1 : Outil de simulation Archisim

l'INRETS a mené depuis plus de 15 ans des recherches sur la simulation du trafic routier fondée sur le comportement réel du conducteur dont un des résultats est l'outil et modèle de simulation de trafic ARCHISIM (Saad, 1992 ; Espié *et al.*, 1994). Ce modèle de trafic est fondé sur le postulat suivant : les phénomènes de trafic proviennent des actions individuelles et des interactions des différents acteurs de la situation routière.

ARCHISIM (ARCHItecture parallèle multi-acteurs pour la SIMulation de trafic) dont les travaux ont été initiés à la fin des années 80 est de fait une architecture de simulation multi-agent. Des travaux de thèse (El Hadouaj *et al.*, 2000 ; Champion *et al.*, 2002b) ont montré la pertinence de la modélisation multi-agent pour représenter les phénomènes de trafic pour des situations autoroutières. Les agents de cette simulation peuvent aussi bien être des véhicules motorisés (véhicules légers, camions, motos...) que des piétons ou des contrôleurs de carrefour à feux par exemple. Ici, nous nous intéressons aux agents qui sont des conducteurs simulés autonomes dans des véhicules virtuels, ce binôme étant désigné sous le terme de mobile. Chaque mobile possède un modèle local de son environnement (les agents ne sont pas omniscients) et interagit avec les autres mobiles (voitures, camions, bus...), les infrastructures et ses équipements (feux tricolores, barrières...) et la route (géométrie). Chaque mobile a ses propres buts, stratégies et caractéristiques.

Il est possible de modifier dynamiquement les conditions de simulation (préférences des conducteurs simulés, algorithmes de contrôle des feux, etc.) sans aucun re-calibrage du modèle. Le modèle permet ainsi une meilleure compréhension des conditions d'apparition des phénomènes de trafic et des effets de modifications sur le système de trafic (*i.e.* le tryptique conducteur/véhicule/infrastructure). En retour, suivant une approche itérative, cela permet non seulement une amélioration du modèle de trafic (Auberlet *et al.*, 2004), mais également de faire d'ARCHISIM un outil ouvert pour l'étude du « système de trafic » (Champion *et al.*, 1999, Espié 1999). En effet, il a été développé afin de permettre l'intégration d'un simulateur de conduite. Dans ce cas, le sujet humain au volant interagit avec le trafic simulé et réciproquement ; les mobiles simulés perçoivent le couple sujet-simulateur comme un autre mobile simulé - agent - participant à la simulation.

ARCHISIM est donc un outil flexible pour lequel un ensemble d'applications existe : études de nouveaux types de routes, études de systèmes d'aide à la conduite relatif au contrôle latéral (Auberlet *et al.*, 2003), aux arrêts/redémarrages en situation de congestion (Tripodi *et al.*, 2003), étude du risque de sur-collision en peloton (Auberlet *et al.*, 2004). Le modèle de trafic a été validé pour des situations autoroutières (El Hadouaj *et al.*, 2004 ; Champion *et al.*, 2002b). Pour faire de même pour les situations urbaines, il est nécessaire de le développer et de le valider pour les intersections.