Concilier réactivité et anticipation : le cas de la résolution de conflits dans un trafic routier simulé

Sameh El Hadouaj[*,], Alexis Drogoul[**], Stéphane Espié[*]**

**INRETS*
2, avenue Malleret Joinville
94114 ARCEUIL CEDEX
espie@inrets.fr, hadouaj@inrets.fr

***LIP6 - OASIS/MIRIAD*
UPMC/CNRS UMR 7606
Boîte 169, 4 Place Jussieu 75232 Paris CEDEX 05
Alexis.Drogoul@lip6.fr

RÉSUMÉ.Nous présentons dans cet article la méthode employée pour résoudre les conflits pouvant survenir entre des agents conducteurs d'un trafic routier simulé. Ce travail est partie prenant du projet ArchiSim, de l'INRETS, dont le but est non seulement de simuler l'évolution d'un trafic routier globalement réaliste, mais également de rendre crédible le comportement des agents aux yeux de conducteurs humains placés dans des simulateurs de conduite. Après avoir catégorisé les types de conflits pouvant survenir, ainsi que les contraintes pesant sur le choix d'une méthode de résolution, nous proposons une méthode qui concilie réactivité et anticipation, tout en restant fidèle aux travaux menés en psychologie de la conduite au sein de l'INRETS. Nous en montrons une validation expérimentale effectuées par comparaison avec des données réelles et en discutons les avantages dans le cadre d'applications plus larges.

MOTS-CLÉS : Simulation multi-agent, résolution de conflits

Introduction

Les modèles de simulation multi-agent constituent un outil de plus en plus important pour l'analyse et la compréhension de phénomènes complexes [REY 87], [SEM 97], en particulier dans les organisations humaines (voir [SIC 98]). Nous nous plaçons, dans cet article, dans le cas un peu particulier d'une simulation réaliste du trafic routier. Cette simulation, qui fait l'objet d'une recherche menée en collaboration avec le Laboratoire d'Informatique de Paris 6, est intégrée au projet ArchiSim, commun au Département d'Analyse et de Régulation de Trafic et au Laboratoire de Psychologie de la Conduite (LPC) de L'INRETS [ESP 94]. Ce projet a pour but de produire le phénomène global d'un trafic routier par le biais d'une reproduction du comportement de chacun des conducteurs qui y prend part.

Dans ce modèle, un conducteur est considéré comme un agent autonome dont le comportement s'appuie sur les études de psychologie de la conduite menées au LPC, qui fournissent un modèle décrivant son activité décisionnelle en fonction de son environnement. Le trafic produit dans ArchiSim résulte ainsi de l'interaction du comportement de chaque agent avec la réglementation, l'infrastructure routière et les autres usagers de la route. Le réalisme de la simulation est donc fonction de la qualité des modèles de comportement conçus.

Nous décrivons dans cet article la démarche que nous avons adoptée afin de produire des situations de trafic qui puissent être interpréter comme réalistes par un usager de la route. Nous nous attachons en particulier à montrer le parallèle entre les problèmes que soulèvent ce type de simulation et les problèmes rencontrés dans beaucoup de systèmes multi-agents, comme celui du choix d'une méthode de résolution de conflits. Le plan de l'article s'articule donc comme suit : dans un premier temps nous décrivons plus en détail le projet ArchiSim. Nous mettons en exergue, ensuite, en section 2, les difficultés qui se posent au concepteur d'un tel simulateur, et notamment la résolution des conflits survenant entre les agents conducteurs. Après un aperçu des méthodes traditionnellement utilisées en IAD et en raison des difficultés qu'elles soulèvent, nous proposons, en section 3, une démarche combinant anticipation et réactivité. Nous en montrons ensuite une validation expérimentale, qui concilie réalisme et fonctionnement en temps réel. Nous terminons par un aperçu des perspectives de recherche autour de ce sujet.

1.1. *Présentation de ArchiSim*

De nouvelles possibilités de régulation de trafic sont souvent introduites afin de rendre la circulation automobile aussi sûre et confortable que possible. Les modèles de simulation permettent de tester et d'évaluer plusieurs variantes sans avoir recours aux tests grandeur nature coûteux et difficiles à réaliser et constituent à ce titre un outil de prévision et de gestion du trafic de plus en plus utilisé, notamment par les collectivités locales. Ces modèles se différencient principalement en deux familles :

— Les modèles macroscopiques : Ils décrivent des mouvements d'ensemble sur les infrastructures routières et approchent le trafic de manière globale en mettant en jeu son débit, sa densité et sa vitesse moyenne. Les plus connus sont Simaut [MOR 89], Strada [BUI 96] ou Meta [PAP 90].

— Les modèles microscopiques : Ils représentent le trafic de façon plus fine. Ces modèles traitent les véhicules individuellement et visent à mettre l'accent sur les interactions entre les véhicules. Les grandeurs qu'ils manipulent sont inhérentes aux véhicules considérés individuellement, par exemple le temps inter-véhiculaire, la vitesse du véhicule ou son accélération. Dans cette catégorie peuvent être cités, notamment, les projets Casimir [COH 89], Severe [ARO 87], Mixic [ARE 97], ou encore Pharos [REE 93].

L'analyse d'une organisation sociale tel que le trafic routier ne peut se faire sans tenir compte des interactions entre ses membres [FER 95]. En mettant précisément l'accent sur les interactions, les différents modèles microscopiques présentés plus haut permettent de produire des situations de trafic plus réalistes que celles produites par les modèles macroscopiques. Cependant, qu'ils soient macroscopiques ou microscopiques, la majorité des modèles de simulation ont généralement pour objectif de reproduire les lois d'écoulement du trafic identifiées par des campagnes de mesures. Ils sont conçus pour la plupart dans le but de résoudre un problème extrêmement bien défini, comme la comparaison de stratégies de fonctionnement de carrefour à feux isolés dans le modèle Casimir ou l'étude de l'impact de l'AICC (Autonoumous Intelligent Cruise Control) sur un nombre de tronçons d'autoroute consécutifs dans le modèle Mixic.

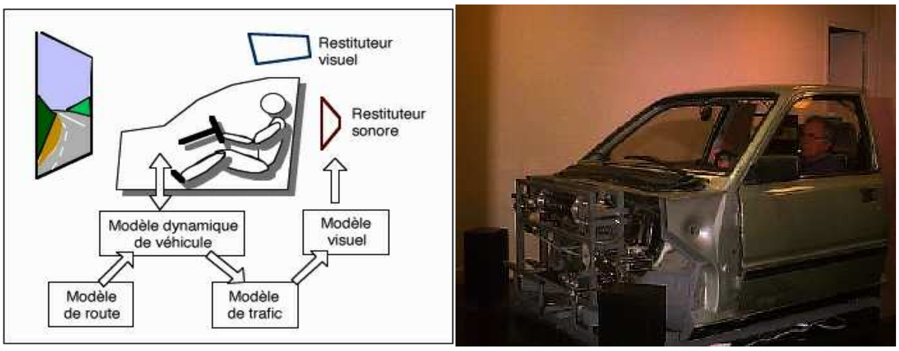

Figure 1. *Schéma du simulateur piloté avec écran. Vue du simulateur actuel.*

Dans le modèle ArchiSim, dont le but est non seulement de produire un trafic réaliste, mais aussi de simuler un trafic composé de véhicules se comportant individuellement de façon crédible, le choix d'une architecture multi-agent nous offre la possibilité de modéliser les interactions entre les conducteurs de façon assez fine, à la manière de la plupart des modèles microscopiques présentés plus haut, ainsi que de modéliser et de reproduire le comportement du conducteur. Les lois d'écoulement de trafic produites ne sont alors que le résultat de l'interaction de ce comportement avec la réglementation, l'infrastructure routière et le comportement des autres usagers.

La modélisation du comportement de ces conducteurs artificiels s'appuie sur les études expérimentales de psychologie de la conduite menées au LPC. Ces travaux mettent en œuvre un modèle conceptuel défini par un ensemble de règles décrivant l'activité décisionnelle du conducteur. La qualité de cette modélisation est un élément clé du réalisme des situations routières qui sont simulées (voir figure 2).

L'architecture informatique du modèle est conçue pour permettre également à un simulateur piloté de participer à la simulation réalisée et d'autoriser ainsi un sujet humain à voir et interagir avec divers « scénarios routiers » (voir figure 1). Le but est de permettre le test, sur des conducteurs « réels », d'infrastructures « virtuelles » ou d'équipements nouveaux (airbags, etc.), afin d'étudier leurs réactions. Le scénario de trafic produit par le modèle doit par conséquent fournir à un opérateur humain l'illusion d'un scénario routier réel, ce qui représente un défi considérable. Outre l'étude de problématiques qui ne concernent pas cet article, comme la représentation graphique en trois dimensions ou le retour d'efforts sur les commandes, il faut donc que les agents qui peuplent les tronçons routiers soient "crédibles" et ne provoquent pas de situations impensables dans un vrai trafic. A terme, ArchiSim a ainsi pour objectif de permettre :

— d'accueillir, tester et affiner les modèles de comportement des conducteurs

— de tester sur le simulateur des dispositifs d'interface avec l'homme, de vérifier leur compatibilité avec la tâche de conduite et d'évaluer leur impact sur le système.

— de tester la sensibilité du système pour des scénarios variés en terme de taux d'équipement en dispositifs d'assistance à la conduite

1.2. *Description du système multi-agent existant*

Figure 2. *Exemple de trafic simulé (agents : infrastructure, véhicules, etc.)*

La nature distribuée du trafic routier, l'absence de tout contrôle central et l'importance des comportements, choix et besoins individuels dans la modélisation de la conduite nous ont naturellement amené à choisir une approche multi-agent pour modéliser ce phénomène.

Dans ArchiSim, une situation routière est considérée comme étant le fruit d'interactions entre des agents relativement hétérogènes : véhicules, infrastructure, contrôleur à feux, panneau à messages variables, etc. (figure 2). Chaque agent est une entité autonome dotée de ses propres connaissances, d'un but et d'une stratégie qui lui est personnelle pour effectuer les tâches pour lesquelles il a été conçu et pour résoudre les conflits éventuels qu'elle aura avec d'autres agents.

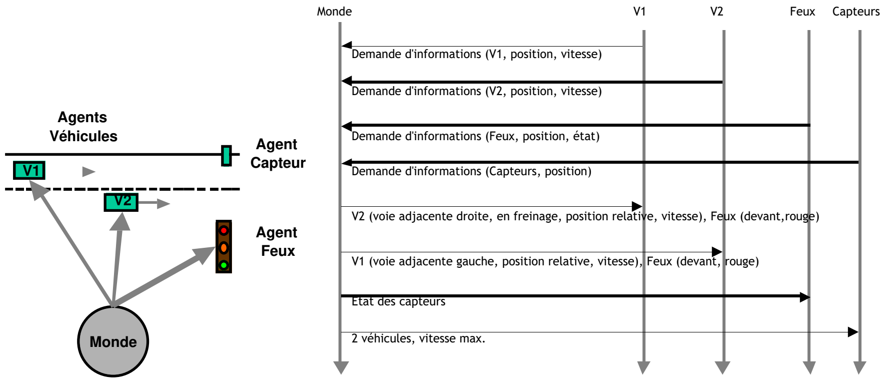

Figure 3. *Exemple d'échange de messages entre l'agent monde et le reste des agents présents dans le trafic*

Les connaissances d'un agent sont mises à jour par le biais d'échanges avec son environnement. Une question essentielle consiste à fournir à chaque agent les éléments susceptibles de modifier son comportement. Pour cela un processus que nous appelons « monde » joue le rôle de « serveur de vision ». Ce processus est le seul à avoir une connaissance globale de l'état du réseau routier, mais sans avoir accès aux connaissances locales des agents. Il n'accède qu'aux informations que veulent bien lui fournir les agents, sans pouvoir les modifier.

Une simulation dans ArchiSim consiste à démarrer le processus Monde. Chacun des agents présents dans la simulation lui envoie une requête concernant les éléments placés dans son champ de perception. Le monde attend de recevoir tous les messages des agents avant de déterminer et d'envoyer à chacun les éléments que celui-ci voit. Ces informations seront utilisées par chaque agent pour modifier son comportement et mettre à jour ses connaissances. A titre d'illustration, un exemple simple d'échange de messages entre le processus monde et le reste des agents présents dans le trafic est donné par la figure 3.

Difficultés principales liées à la simulation du trafic

1.3. *Ensemble d'agents en interaction*

Les principaux agents de notre modèle sont les conducteurs. C'est de ces derniers que dépend en grande partie la qualité d'une simulation. Dans ArchiSim, chaque conducteur est une entité autonome, dotée de son propre comportement, de son propre but qui consiste à suivre un itinéraire donné ainsi que de ses propres connaissances qui sont décrites par une représentation partielle de son environnement.

Un conducteur subit un ensemble d'interactions décrites par les contraintes liées aux comportements des autres usagers, à l'infrastructure routière et à la réglementation. Ces interactions sont souvent sources de conflits. La résolution de ces conflits nécessite à son tour des interactions supplémentaires. Il est à noter, d'ailleurs, que dans ce système comme dans beaucoup d'autres systèmes collectifs, les notions d'interactions et de conflits sont indissociables. Les conflits sont à la fois l'effet et la cause des interactions. Obtenir une simulation réaliste nécessite donc d'employer des méthodes de résolutions de conflits pertinentes dans le contexte particulier qui nous est imposé par cette simulation, à savoir : garantir la fidélité aux modèles proposés par les psychologues (la « crédibilité ») et assurer un fonctionnement en temps réel.

1.4. *Nature des conflits*

Le réseau routier est le lieu du déroulement du trafic. Il est défini par un ensemble de routes et de carrefours. Une route est caractérisée par son infrastructure (sa largeur, son nombre de voies, etc.) . Les carrefours sont les lieux d'intersection de ces routes.

Un réseau peut également être vu comme un ensemble de sections, où une section représente une partie de route(s) caractérisée par une infrastructure et une capacité. La capacité d'une section est définie par le nombre de véhicules ayant une chance raisonnable de s'écouler pendant un intervalle de temps de référence sur cette section [COH 90]. Des conflits peuvent apparaître lorsque le nombre de véhicules voulant circuler sur la section devient supérieur à sa capacité. La circulation devient alors dense et des conflits autour de l'espace de circulation apparaissent. Ces conflits peuvent être qualifiés comme étant des conflits de ressource. En effet, s'il y avait plus d'espace ou si le nombre de véhicules était moindre, les conflits disparaîtraient. Les conflits viennent donc des ressources mises à la disposition de chacun des véhicules. Dans le trafic, nous distinguons deux types de conflits de ressources :

— Les conflits d'insertion dans une file qui apparaissent par exemple lors d'une fermeture de voie. Un véhicule qui repère que la voie sur laquelle il roule est fermée doit trouver un créneau pour s'insérer sur une voie adjacente. Des conflits entre ce véhicule et les mobiles présents sur cette voie adjacente naissent si la circulation y est dense. Le même type de conflit peut naître dans le cas d'une autoroute avec une bretelle d'entrée, entre les véhicules qui sont situés sur la bretelle et ceux qui sont situés sur la route. De même lorsqu'un véhicule décide de changer de voie pour une raison quelconque et que la densité de la voie ciblée est très importante.

— 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 n'y ait de collisions. Le problème ne se poserait s'il n'y avait qu'un seul véhicule ou si l'espace était suffisant pour faire passer tous les véhicules en même temps.

D'autres types de conflits peuvent naître même si la circulation sur la section est considérée comme fluide. Ils sont liés à la gêne que constitue la simple présence d'un autre véhicule. Ainsi, 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. Ce conflit peut être qualifié comme étant un conflit de but. Les objectifs locaux de chacun des deux conducteurs ne peuvent être fusionnées en un seul au niveau global; autrement dit, la satisfaction de l'un entraîne l'insatisfaction de l'autre.

Le conducteur peut entrer également en conflit avec un véhicule qui, circulant devant, met son clignotant à l'instant t et l'éteint à l'instant t+1. En effet, le fait qu'un conducteur mette son clignotant implique son engagement à quitter la voie. Le véhicule qui est derrière va alors prendre des mesures sur cette base, mesures qu'il va devoir annuler à l'instant t+1. Ces types de conflits peuvent être apparentés à un conflit d'engagement. La promesse faite le véhicule qui a mis son clignotant envers celui qui était derrière n'a pas été tenue. Toutes les anticipations que les autres agents ont pu faire sur cette base doivent être annulées.

Certains types de conflits ont été prévus et peuvent être évités *a priori*. Dans la réalité, ils sont souvent résolus par le biais des contraintes imposées par la réglementation et l'infrastructure routière. En effet, le code de la route et les équipements routiers tels que les feux et les panneaux de signalisation imposent des contraintes fortes à la circulation sur route. De même, l'aménagement d'une autoroute, réalisé de telle sorte qu'il sépare les flux évoluant dans des sens opposés, permet d'éviter les collisions entre ces deux flux. Ces contraintes ont été introduites dans notre modèle. Elles consistent en un ensemble de règles de comportement individuelles prioritaires visant à éliminer ce type de conflits. En termes multi-agents, cette méthode de résolution est désignée par les termes de coordination par réglementation ou par normes sociales (voir par exemple [CON 95] qui, bien que travaillant sur l'*émergence* de normes sociales au sein de population d'agents, exprime assez bien l'intérêt qu'il peut y avoir à les introduire dans un SMA).

Cependant d'autres types de conflits ne peuvent être résolus par cette méthode. Parfois, la seule application de la réglementation conduit même à des situations de blocage. Prenons le cas d'un carrefour en croix, sur lequel un véhicule est positionné en aval de chacune des routes qui le composent. Si les conducteurs appliquent la règle de priorité à droite, aucun ne prendra l'initiative d'entrer sur le carrefour et les véhicules resteront bloqués. Dans la pratique, le conducteur fait appel à sa perception de l'environnement pour prendre ses décisions et pouvoir échapper à ce genre de situations de conflits. Les agents conducteurs doivent faire de même si nous voulons que leur comportement, individuel et collectif, soit réaliste. Il leur faut, comme dans la réalité, trouver une solution qui satisfasse à la majorité des contraintes imposées par la réglementation, l'infrastructure et le trafic courant, sans pour autant forcément les respecter toutes. C'est principalement à ce type de conflits (et aux méthodes permettant de les résoudre) que nous nous intéressons dans cet article.

1.5. *Contraintes pour la résolution des conflits*

Les études de psychologie de conduite effectuées au LPC [SAA 94], sur lesquelles nous nous sommes basés pour concevoir le modèle de comportement, soulignent l'importance du *mécanisme d'anticipation* chez le conducteur. Celui-ci intègre la durée prévisible de l'interaction et ne réagit pas simplement aux variations instantanées des données qui peuvent la décrire. La méthode de résolution de conflits adoptée doit donc permettre aux agents-conducteurs d'anticiper l'évolution de la partie du trafic qui les intéresse, si nous souhaitons que leur comportement soit crédible.

D'autre part, le trafic routier peut être qualifié comme étant un phénomène dynamique, ce qui le rend difficilement prévisible. Ce système évolutif nécessite alors une méthode de résolution de conflit rapide et adaptative qui permette au conducteur simulé d'agir en temps réel, ou du moins aussi rapidement qu'un conducteur réel. Il s'agit donc de mettre en place de véritables "réflexes", que l'agent pourra utiliser dans toutes les situations qu'il n'aura pas pu anticiper. Etant données les contraintes (de déplacement, de mobilité, etc.) qui pèsent sur les agents conducteurs, on se retrouve là dans une problématique très proche de celle de la conception de robots réactifs, par exemple ceux des compétitions de robots footballeurs [ASA 98], tout en gardant à l'esprit que la méthode adoptée dans ArchiSim a dû satisfaire à la fois trois contraintes: implémenter les mécanismes *d'anticipation* décrits par les psychologues, concilier ces mécanismes avec une forte *réactivité*, tout en assurant, par la combinaison de ces deux modèles de comportement, une certaine *crédibilité* aux agents conducteurs.

Résolution des conflits entre agents conducteurs

1.6. *Inadéquation des méthodes classique de l' IAD*

1.6.1. *Systèmes purement réactifs*

La coordination réactive est une méthode de résolution de conflit qui a fait ses preuves dans le cadre des systèmes multi-agents à caractère très dynamique. Elle repose sur l'utilisation de quelques techniques essentielles [FER 95]. Parmi ces techniques, la plus utilisée est celle basée sur des champs de forces symétriques définissant des comportements attractifs et répulsifs. On en trouve des applications dans le cadre du trafic aérien [ZEG 93], dans la simulation de comportements collectifs d'animaux [REY 87 ; DRO 93], ou dans le cadre de la robotique collective, pour la planification dynamique de trajectoires [DRO 98b].

La résolution de conflit peut être également assurée en ajoutant des actions de coordination permettant aux agents de s'entraider. Il s'agit de modifier les comportements des agents de manière à construire des structures de coordination. Par exemple, pour concevoir des avions autonomes qui surveillent le trafic [COR 97], chaque agent-avion connaît les tactiques du groupe et son rôle dans ces tactiques. La coordination entre agent se fait alors à travers les tactiques communes, appuyée sur les simples observations des actions des membres du groupe. Un autre exemple de coordination, procédant de façon semblable par transmission de programmes de contrôle entre agents réactifs, est fourni par [ARK 93].

Toutes ses approches, conçues pour être utilisées dans des contextes dynamiques et imprévisibles, ne sont pourtant pas adaptées (ou bien très difficilement adaptables) au cas du trafic routier. En effet, leur principe consiste à agir quasi-exclusivement en fonction des événements présents perçus par l'agent. La boucle perception-action devant être la plus courte possible, celui-ci ne peut en effet ni extraire trop d'informations de son environnement, ni anticiper sur le futur. Or, les psychologues de la conduite insistent sur l'importance de la prévision, y compris dans des contextes très perturbés. Le modèle de simulation de trafic microscopique Mitsim [YAN 94] est à cet égard un bon exemple de l'inadéquation d'une méthode purement réactive. Ce modèle applique une méthode de résolution de conflit qui repose sur la loi de poursuite (qui consiste à calculer l'accélération du véhicule en ne tenant compte que de la vitesse de celui qui le précède) et la décision de changement de voie n'est fonction que de l'état du trafic dans l'environnement proche. Cette prise d'information restreinte, nécessaire à la réactivité, produit des anticipations à très court terme et conduit à l'émergence de comportements irréalistes. La figure 4 illustre un cas de dysfonctionnement de cette méthode.

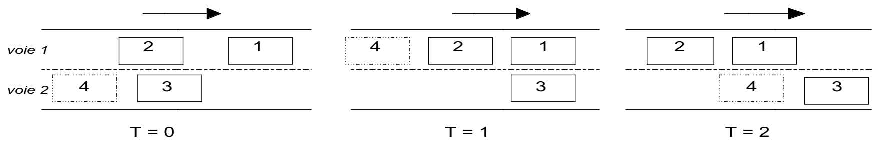

Figure 4. *Quatre véhicules (voir texte ci-aprés)*

Les véhicules, numérotés de 1 à 4, ont comme vitesse respective 60, 100, 80 et 90 km/h. A l'instant t=0, la vitesse du véhicule 2 est meilleure que celle du véhicule 3. Ceci amène le véhicule 4 à changer de voie pour pouvoir progresser plus rapidement. Néanmoins, à l'instant t=1, le véhicule 2 se trouve contraint par la vitesse du véhicule 1. En évaluant de nouveau la vitesse de chacun des véhicules 2 et 3, le véhicule 4 décide de revenir sur la voie 2. Ce changement de voie non justifié aurait pu être évité s'il avait anticipé à moyen terme en prenant en considération le véhicule 1, ce que fait dans la même situation un conducteur humain (selon les expérimentations menées par les psychologues).

De plus, il peut être difficile de sortir d'une situation de conflit si les agents ne sont pas capables d'anticiper un minimum. Par exemple, un embouteillage à un carrefour peut devenir si dense qu'il devient impossible de l'éliminer, ce qui ne se produit que rarement dans la réalité, et n'est pas acceptable dans une simulation qui se veut réaliste (voir l'exemple de formation d'un embouteillage par des agents-conducteurs - trop - simples dans [RES 95]).

1.6.2. *Systèmes de planification*

D'autres techniques proposées dans la littérature, telles que des mécanismes de planification permettent de pallier ce problème en donnant aux agents des capacités à anticiper. Cependant, elles requièrent usuellement une forte communication entre les agents (si l'on souhaite qu'ils se coordonnent) et des possibilités de représentation assez importante (par exemple en termes de croyance sur le comportement des autres agents). Elles se révèlent souvent, de plus, incapables de prendre en compte en un temps suffisamment court des situations imprévues ou trop complexes, ce qui est argumenté, quoique dans un autre domaine, dans [AGR 87].

Dans ce type de systèmes, en effet, chaque agent définit un plan en déterminant la suite d'actions qu'il doit accomplir à moyen ou long terme, en fonction de l'état de son environnement actuel et de l'état qu'il souhaite atteindre. Etant donné que dans le cas du trafic routier le nombre d'agents conducteur est souvent élevé, nous pouvons nous attendre à de nombreuses révisions de plan et donc à un temps d'exécution individuel relativement lent, ce qui empêcherait l'agent d'agir ou de réagir en temps réel. De plus, si les modifications des données décrivant l'environnement atteignent une fréquence importante (supérieure à la vitesse de génération de plans par l'agent), l'utilisation d'une méthode de planification devient non seulement inefficiente (si l'agent change trop souvent de plans), mais surtout inutile (s'il ne fait que générer des plans sans pouvoir les exécuter ni les conserver). Par exemple, l'utilisation de techniques de planification pour simuler d'une manière microscopique un carrefour de la ville de Saint-Quentin [TRA 98] permet de rendre compte de façon réaliste des flux sur ce carrefour, mais le temps de calcul devient trop important lorsque le nombre de véhicules dépasse la centaine, ce qui est rédhibitoire en terme de simulation.

Nous pouvons ainsi conclure de tout cela que, d'une part, les méthodes de résolution de conflits capables de faire face en temps réel à un environnement dynamique ne permettent généralement pas d'effectuer de prévisions à long ou à moyen terme, et que , d'autre part, les méthodes capables d'anticiper les événements ont du mal à gérer des systèmes fortement dynamiques. Or, une méthode de résolution de conflit utilisée dans le cadre du trafic routier ne peut être efficace que si elle permet de faire un compromis entre ces deux critères antagonistes. Elle doit combiner à la fois anticipation et réactivité.

1.7. *Méthode de résolution de conflit proposée*

D'après les études menées au LPC [SAA 94], l'espace autour du véhicule, constituant le champ de contrôle du conducteur, peut être décomposé en plusieurs secteurs, distingués selon leur localisation (avant, arrière, latérale gauche, latérale droite) et leur proximité (très proche, proche, lointain, très lointain). C'est en se basant sur une analyse de l'état du trafic dans ces zones que le conducteur prend ses décisions. Son but est de minimiser les conflits actuels et futurs.

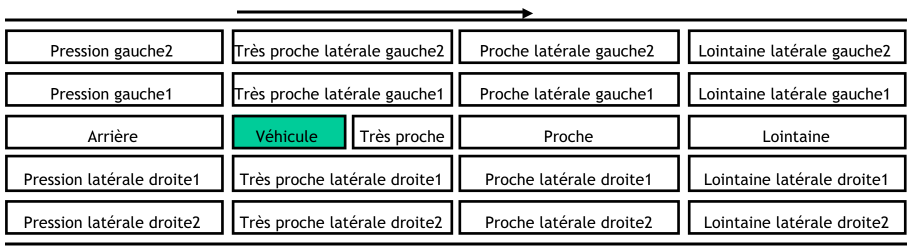

Figure 5. *Les zones de perception d'un conducteur*

L'idée est donc de répartir l'espace routier de chaque conducteur simulé en un ensemble de zones qui couvrent le champ de contrôle d'un conducteur réel (voir figure 5). Le conducteur se base dans la prise de ses décisions sur les caractéristiques de ces zones : leur infrastructure, la réglementation qui les régit ainsi que le comportement des conducteurs se trouvant dedans. À chaque nouveau pas de la simulation, le conducteur prélève de l'information sur ces zones et décide, en fonction de ces données, des actions qu'il entreprendra. Les informations essentielles qu'utilise le conducteur sont l'écart type et la vitesse de la zone : l'écart type mesure la répartition des vitesses des véhicules présents dans la zone, donc sa stabilité. La vitesse est celle du véhicule le plus contraignant dans la zone.

Ainsi, il opère d'une manière réactive dans la mesure où ses réactions dépendent uniquement de la perception qu'il a de son environnement. Toutes les informations relatives à son comportement s'y trouvent et il n'a pas besoin de communiquer avec les autres agents pour les acquérir, ni de les mémoriser. Les règles de décision qu'il utilise sont donc des règles simples, qui associent une zone de perception à une ou plusieurs actions (changement de vitesse, de voie, etc.), organisées par ordre de priorité en fonction de la zone de perception dont elles dépendent.

Cette méthode lui permet également d'anticiper. Désormais l'agent peut réagir en se basant sur les caractéristiques des zones proches mais aussi prévoir l'évolution du trafic en regardant les zones lointaines et ainsi anticiper les conflits à long terme et prendre les mesures nécessaires pour y échapper. Par exemple, si le trafic est fluide dans les zones proches et qu'un accident se produit dans une zone lointaine, on peut alors s'attendre à un ralentissement des vitesses dans les secondes qui viennent. La distinction des zones selon leur proximité permet ainsi de catégoriser les types d'actions à entreprendre en actions réactives et actions anticipatrices.

Ceci est bien sûr rendu possible vu l'adéquation qui existe, dans le cadre du trafic routier, entre la vision en « avant » dans l'espace et la vision en « avant » dans le temps, et c'est sans doute ce qui explique que cette méthode n'est pas généralisable à tous les problèmes représentés sous une forme multi-agent, mais seulement à une classe de problèmes, encore à déterminer, possédant les mêmes caractéristiques spatio/temporelles. L'intérêt scientifique de cette méthode réside plutôt dans l'idée, maintenant admise dans beaucoup de domaines en psychologie (cf. par exemple les travaux de psychologie sur la prise de décision dans le contexte sportif [RIP 95]), qu'une fois l'effort cognitif de détermination des indices visuels importants réalisé (ce qui constitue « l'expérience » du conducteur via une discrétisation de sa perception active), la mise en œuvre de règles simples et stéréotypées appliquées à ces éléments d'information permet d'obtenir un comportement combinant de façon harmonieuse anticipation et réactivité. On retrouve là la démarche que nous avons déjà défendue dans d'autres contextes (cf. [DRO 98a], par exemple), à ceci prés qu'elle nous permet en outre, dans le cas présent, d'obtenir des comportements interprétés comme parfaitement *crédibles* par les utilisateurs du simulateur. La section suivante illustre ce point dans le cas particulier de la conduite en file.

1.8. *Exemple : Cas de conduite en file*

Dans cet exemple, notre but était d'améliorer le réalisme de la décision de changement de voie, déjà présente auparavant dans le simulateur, mais sous une forme peu réaliste. Pour prendre cette décision - changer ou non de file -, le conducteur doit prendre en compte l'état du trafic non seulement dans son environnement proche, mais également plus lointain. Lorsque les anticipations sont seulement de courte durée, c'est-à-dire que l'état de trafic n'est prélevé que dans l'environnement proche, les comportements émergents sont souvent irréalistes. On observe en particulier une grande mobilité entre les voies (voir exemple du paragraphe 3.1.1). En appliquant la méthode d'anticipation de conflits présentée ci-dessus et en observant de près des scénarios de simulation, nous avons pu conclure, en liaison avec les psychologues, que le comportement était réaliste au niveau individuel [ELH 98]. Au niveau collectif, une première vérification a consisté à tester si le trafic produit par le modèle obéissait aux lois générales d'écoulement du trafic. Pour cela, nous avons établi une comparaison entre les résultats obtenus à partir de notre modèle de simulation et les lois décrites dans [COH 90]. Les expérimentations ont montré que le modèle ArchiSim reproduit fidèlement ces lois [ELH 98]. Nous avons ensuite procédé à une validation du choix de la file de circulation.

Pour cela, nous avons établi des comparaisons avec les résultats des travaux réalisés par le département d'ingénierie de transport de l'Université de Naples 2 et de la faculté d'ingénierie de l'Université de Reggio Calabria [TOT 95]. En se basant sur des données réelles, ces derniers ont en effet mis en évidence une loi représentant la distribution du débit par voie fonction du débit total ainsi qu'une loi décrivant la relation entre vitesse moyenne par voie et débit total, toutes les deux dans les contextes d'une autoroute à deux voies et d'une autoroute à trois voies.

En superposant les courbes obtenues par simulation dans ArchiSim aux lois correspondantes [ELH 98] (voir Figure 6), nous avons pu vérifier que le trafic produit par notre modèle respectait les lois en question et donc que la distribution de flux par voie apparaissait parfaitement réaliste.

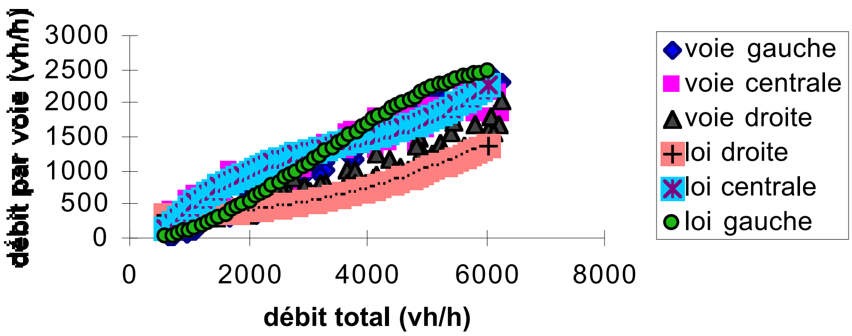

Figure 6. *Distribution du débit sur une autoroute à trois voies. Les lois représentées sur la courbe ont été obtenues par interpolation de données réelles et décrivent la distribution du débit en fonction du débit total dans le cas d'une autoroute à trois voies. Les données représentées sous forme de nuages de points ont été obtenues suite à l'application de notre modèle au même type de scénario.*

Conclusion & perspectives

L'objectif du modèle ArchiSim est de produire des situations de trafic réalistes par le biais d'une reproduction du comportement des conducteurs et de la mise en interaction de ces conducteurs simulés dans un environnement artificiel. Le trafic produit est alors le fruit des interactions entre ces agents artificiels (dans le cadre de l'infrastructure routière et de la réglementation). Cependant, contrairement à la plupart des modèles existants, ArchiSim permet également d'introduire dans le système un conducteur réel, au volant d'un simulateur de conduite, auquel sont projetées les images du trafic simulé. Le « réalisme » global d'une simulation (en termes de données mesurables) va devoir alors se doubler d'un « réalisme » individuel, qui devra faire de chaque agent un conducteur crédible aux yeux du conducteur humain. C'est donc sous cette double contrainte (contrainte que l'on retrouve par exemple lors de la définition d' « avatars » dans les mondes virtuels) qu'ont été conçus les comportements des agents. En particulier, un grand soin a été accordé aux mécanismes de résolution de conflit mis en œuvre par les agents, dans la mesure où aucune des méthodes habituellement employées en IAD ne donnait vraiment satisfaction : soit en raison de leur faible réalisme (méthodes réactives), soit parce qu'elle nécessitaient des temps de calcul trop important pour pouvoir fonctionner en temps réel (planification), soit encore parce qu'elles étaient inadéquates dans un environnement extrêmement dynamique (planification, encore). La solution choisie doit beaucoup aux travaux des psychologues de la conduite et aux caractéristiques du trafic routier, qui font que voir au loin permet, avec une marge d'erreur faible, de se projeter dans le temps et donc d'anticiper l'évolution du trafic. Nous avons pu, de cette façon, concilier de façon originale la conception de comportements réactifs dépendant d'une discrétisation de la perception (les zones routières) avec une possibilité d'anticipation, qui n'est autre dans ce cas-là que la mise en œuvre d'un comportement réactif appliqué à une zone lointaine, tout en conservant un très grand réalisme au comportement individuel des agents conducteurs. L'application de cette méthode au cas particulier de conduite en file est venue pour sa part témoigner de sa validité quant à l'obtention d'un trafic globalement réaliste.

Les perspectives de travail que nous nous sommes fixées pour les deux ans à venir concernent : (1) l'élaboration de nouvelles règles de décision individuelles (basées sur la même méthode) pour aborder la simulation d'infrastructures routières encore plus complexes comme les bretelles d'entrée sur autoroute, les carrefours, etc. ; (2) la recherche de critère globaux permettant de valider plus finement le réalisme de nos simulations[1] ; (3) la généralisation de ce type de méthode à d'autres systèmes multi-agents dans lesquels il est indispensable d'arriver à concilier réactivité, anticipation, fonctionnement en temps réel et crédibilité des agents. La conception d'agents artificiels évoluant dans des environnements de réalité virtuelle en même temps que des humains ou celle de colonies de robots immergées dans des collectivités humaines [DRO 99] nous semblent à cet égard de bons problèmes.

Références

[AGR 87] AGRE, P. E. and D. CHAPMAN. Pengi: an Implementation of a Theory of Activity. Proceedings of AAAI'87, pp. 268-272, 1987.

[ARE 97] VAN AREM B., DEVOS A.P., VANDERSCHUREN M.J., The microscopic traffic simulation model MIXIC 1.3, 1997.

[ARO 87] M.ARON, approche microscopique de la cinématique des véhicules en milieu urbain, rapport INRETS n° 43, 1987.

[ASA 98] ASADA M., KUNIYOSHI M., DROGOUL A., ASAMA H., MATARIC M., DUHAUT D., STONE P., KITANO H., « The RoboCup Physical Agent Challenge : Phase-I », *Applied Artificial Intelligence (AAI) Journal*, n° 12 (2–3), 1998.

[ARK 93] ARKIN, R. C. and J. D. HOBBS. Dimensions of Communications and Social Organization in Multi-Agent Robotic Systems. From Animals to Animats II. J. A. Meyer and S. Wilson. Cambridge, MIT Press: 486-493, 1993.

[BUIS 96] BUISSON C., LEBAQUE J.-P., LESSORT J.-B. STRADA, a discretized macroscopic model of vehicular traffic flow in complex networks based on the godunov scheme, CESE'96, Lille, France, p. 976-981, 9 au 12 juillet 1996.

[COH 90] Cohen S., Ingénierie du trafic routier. Cours de l'école nationale des ponts et chaussées, 1990

[1] Par exemple, l'analyse du choix de file de circulation nous a permis de valider la décision de changement de voie de manière globale, mais il serait intéressant de procéder à une validation plus fine basée sur le nombre de changements de voies. Comme il n'existe pas des données réelles concernant ce point, une collaboration avec nos partenaires italiens est envisagée, où ces derniers établiront expérimentalement des lois décrivant les changements de voies.

[COH 89] Cohen S., Semaan R., Simulation des carrefours isolés : le logiciel CASIMIR, rapport sur convention d'étude AFME-INRETS n° 655-8842

[CON 95] Conte R. & Castelfranchi C., Understanding the functions of norms in social groups through simulation. In Gilbert, G.N. & Conte, R. (eds) Artificial societies: the computer simulation of social life. London: UCL Press, 1995.

[COR 97] S.Coradeschi, L.Karlsson, A behavior-based approach to reactivity and coordination: a preliminary report, Intelligent agent IV Agent theories, architectures and languages 4th ATAL workshop , 1997.

[DRO 93] DROGOUL, A. De la Simulation multi-agent à la résolution collective de problèmes, Thèse de 3ème Cycle, Université Pierre et Marie Curie, 1993.

[DRO 98a] DROGOUL, A. and D. FRESNEAU. Métaphore du fourragement et modèle d'exploitation collective de l'espace pour des colonies de robots autonomes mobiles. Actes des JFIADSMA'98, Paris, Hermés. 1998.

[DRO 98b] DROGOUL, A., M. TAMBE, ET FUKUDA, T., Eds.. Collective Robotics. Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer-Verlag, #1456, 1998.

[DRO 99] DROGOUL A., et PICAULT S. MICRobES : vers des collectivités de robots socialement situés, article soumis aux JFIADSMA'99.

[ELH 98] EL HADOUAJ S. ARCHISIM : Prise en compte des phénomènes d'anticipation dans le cas de conduite en file, Rapport DEA IARFA, Université Paris 6, 1998.

[ESP 94] ESPIE S., SAAD F., SCHNETZLER B, ARCHISIM, Architecture parallèle multi-agent pour simulation microscopique du trafic, Rapport de fin de convention avec le GIE PSA-RENAULT, INRETS, 1994.

[FER 95] J.FERBER, Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective, InterEditions, Paris, 1995.

[MOR 89] MORIN J.-M. SIMAUT : notice de présentation, rapport SCE-TAUROUTE, 1989.

[PAP 90] PAPAGEORGIOU M., HADJ SALEM H., ELLOUMI N., CHRISOULAKIS J., MIDDELHAM F. Integrated control of traffic corridors, Proceedings of the 1st world congress on application of transport telematics and intelligent vehicle-highway systems, Paris, p. 556-563, 1994.

[REE 93] D. REECE AND S. SHAFER, A computational model of driving for autonomous vehicules, transpn.res-A, vol.27 A, n° 1, pp. 23-50, 1993.

[RES 95] M. RESNICK, "Turtles, Termites and Traffic Jams", MIT Press, 1995.

[REY 87] C.W.REYNOLDS Flocks, Herds and Schools: A distributed behavioral Model In computer graphics, 21(4) (SIGGRAPH'85 proceedings) pages 289-296, 1987.

[RIP 95] RIPOLL, H., KERLIRZIN, Y., & STEIN, J.F.. Analysis of information processing, decision making, and visual strategies in a complex problem solving sport situation. *Human Movement Sciences*., *14*, 325-349. 1995.

[SAA 94] F.SAAD, B.SCHNETZLER Un modèle conceptuel du comportement des conducteurs en file sur autoroute, Rapport Interne INRETS, 1994.

[SIC 98] SICHMAN, CONTE AND GILBERT (eds), Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation, LNAI series, volume 1534, Berlin, Springer-Verlag, December 1998.

[TOT 95] V.TORRIERI, D.GATTUSO. Densità e livelli di servizio in autostrade a due e tre corsie carreggiata, 1995.

[TRA 98] H. TRANNOIS, A.LEBRUN, J.L.DELEAGE. Utilisation de l'intelligence artificielle distribuée pour la simulation microscopique d'un carrefour , Recherche Transport Sécurité n° 59, Avril-Juin 1998.

[YAN 96] YANG Q., KOUTSOPOULOS, H.N. A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems. Transportation Research, C (43). pp. 113-119, 1996.

[ZEG 93] K.ZEGHAL. Champs de forces symétriques: Un modèle de coordination d'actions appliqué au trafic aérien, Rapport LAFORIA 93/14, Université Paris 6, 1993.