



**HAL**  
open science

## Anticiper pour maîtriser la violation de Normes : application à la simulation de trafic routier

R Mandiau, Doniec Arnaud, S Piechowiak, Jean-Michel Auberlet, S Espié

### ► To cite this version:

R Mandiau, Doniec Arnaud, S Piechowiak, Jean-Michel Auberlet, S Espié. Anticiper pour maîtriser la violation de Normes : application à la simulation de trafic routier. Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents, Oct 2007, Carcassonne, France. hal-04178824

**HAL Id: hal-04178824**

**<https://hal.science/hal-04178824>**

Submitted on 8 Aug 2023

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

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

# Anticiper pour maîtriser la violation de Normes : application à la simulation de trafic routier

R. Mandiau\* A. Doniec \* † S. Piechowiak \* J-M Auberlet † S.Espié †

\*LAMIH UMR CNRS 8530  
Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis  
59300 Valenciennes Cedex 9 – FRANCE

† INRETS  
2 Avenue du General Malleret-Joinville  
94114 Arcueil Cedex – France

## Résumé

*Les systèmes multi-agents visent tout particulièrement à étudier des phénomènes complexes qui ne peuvent pas facilement être décrits de manière analytique. Les approches sont souvent basées sur une étude de la coordination entre différents agents définis par des modèles comportementaux. Dans cet article, nous nous intéressons à des agents dont les comportements ne respectent pas obligatoirement la norme, et dans certain cas, décident de les violer. Cependant, nous considérons dans ce papier, que le non-respect des normes conduit à proposer un modèle d'anticipation afin de conserver un comportement global cohérent et afin d'autoriser également la détection des situations critiques. Ces idées sont mises en oeuvre dans le contexte de la simulation de trafic routier, et en particulier dans le cadre d'intersection entre des véhicules.*

**Mots-clés :** Modèles comportementaux, coordination, normes, anticipation, simulation

## Abstract

*Multi-agent systems allow the simulation of complex phenomena that cannot easily be described analytically. Multi-agent approaches are often based on coordinating agents which are described by behavioral models. In this paper, we focus on agents' behaviour which are not respect the norm, and in this case, these agents try to violate them. However, the irrespect leads to define an anticipatory model, in order to keep coherent global phenomena and to allow critical situations. Our proposition has been applied in road traffic simulations, and in particular in intersections between vehicles.*

**Keywords:** behavioural models, coordination, norms, anticipation, simulation

## 1 Introduction

De nombreux problèmes peuvent se modéliser sous la forme d'un système multi-agent dans lequel chaque entité évolue dans un environnement fortement dynamique et se coordonne avec ses congénères [13]. Par exemple, le trafic routier peut être considéré comme un phénomène émergent à base d'agents.

Nous pensons que l'étude des modèles comportementaux constituant un agent permet une compréhension des comportements collectifs. Le souhait de produire un comportement global cohérent consiste-t-il à décrire des comportements réalistes ou des comportements optimisés des différents agents ? Cette question fondamentale est souvent l'objet de discussion ; mais à notre avis, rarement posée en ces termes. Par exemple le problème du carrefour dans les contextes urbains est souvent traité par une approche d'optimisation des comportements des agents [3]. Pour notre part, nous souhaitons définir un trafic réaliste comme étant le seul moyen, à notre avis, de véritablement comprendre le phénomène réel. Les agents doivent en effet agir en n'ayant qu'une vision partielle et imparfaite de l'environnement. Ces idées sont bien adaptées à la robotique [17] mais sont difficilement applicables lorsque le but est de reproduire des comportements humains ou lorsque les agents sont contraints dans leur déplacement (impossibilité d'inverser leur trajectoire). Or il semble difficile de reproduire un comportement réaliste sans une bonne gestion espace/temps. D'ailleurs, Lacroix et al. [14] mettent en évidence que ce problème classique est souvent très mal traité dans les travaux existants de simulation. Il est à noter que pour le problème du carrefour ou du rond-point, la majorité des outils n'envisagent pas la gestion de l'espace à l'intérieur de l'intersection.

L'article est constitué de trois parties. Pour reproduire des comportements réalistes, de nouvelles idées sur des modèles comportementaux à base de normes ont récemment émergé. Un état de l'art succinct et notre point de vue sont présentés dans la deuxième partie. La troisième partie est consacrée à notre modèle représentant des agents non normatifs qui peuvent violer la norme tout en conservant un comportement global cohérent. La quatrième partie illustre le fonctionnement de notre modèle et insiste sur quelques validations.

## 2 Modèle comportemental basé sur les Normes

Cette partie présente des modèles comportementaux basés sur la notion de norme, il s'agit d'un bref rappel des travaux existants et notre intérêt dans l'étude de ces derniers.

### 2.1 Les Normes : rappels

Au sens habituel, une norme désigne un ensemble de règles et de principes appliqués à une entité (un objet, une personne, ...) et décrivant comment cette entité doit être et doit se comporter. Dans les systèmes multi-agents, les normes sont généralement utilisées pour spécifier ce qu'un agent doit faire. En d'autres termes, les normes fournissent la manière de coordonner un ensemble d'agents par une forme de régulation.

Shoham et Tennenholz [16] utilisent le concept de lois sociales pour contraindre les actions motivées par des buts antagonistes. En restreignant les moyens de satisfaire les objectifs individuels des agents, ces lois sociales garantissent des propriétés de coopération au niveau collectif. D'autres travaux étendent des approches connues en coordination [8]. Le degré d'influence de la norme du système sur la prise de décision individuelle constitue un des aspects de l'autonomie d'un agent [5] et quelques travaux traitent de la violation de la norme dans un système multi-agent [1].

En général, les travaux existants sur les modèles normatifs sont souvent appliqués à des problématiques de type *institution électronique* [4] [11]. Nous envisageons de l'utiliser dans un contexte de simulation de trafic routier. En effet, l'ensemble des règles composant le code de la Route peut être vu comme une norme régissant le *système de trafic*. Un comportement non-normatif, c'est-à-dire un comportement ne

respectant pas les normes du système, apparaît comme pertinent dans le cadre de cette application.

### 2.2 Intérêt des Normes pour la simulation de trafic routier

Il semble *a priori* que la plupart des travaux considèrent que les agents simulés qui respectent scrupuleusement les règles. Nous pensons au contraire, qu'il est nécessaire de décrire ce non respect des règles dans le modèle des agents. L'intérêt de ce concept est compréhensible dans le cadre de simulation de trafic routier. Il est facile de donner des exemples où les conducteurs humains ne respectent pas la norme (i.e. le code de la route). Par exemple, une règle connue du code de la route affirme qu'un conducteur ne doit pas entrer dans un carrefour s'il n'est pas sûr d'en sortir. De nombreux travaux en psychologie de la conduite montrent qu'un conducteur humain ne respecte pas toujours le code de la Route et va même jusqu'à développer ses propres règles informelles de conduite.

Une difficulté de cette idée concerne le contrôle de la violation des normes. Si un agent décide de violer cette norme, ce dernier recevra une pénalité définie en fonction du contexte applicatif. Dans les applications typiques des institutions, la pénalité peut se concevoir. En effet, il est toujours possible de pénaliser l'agent sur l'accessibilité d'une ressource, d'une information ou d'une perte de temps en terme de calcul par exemple. Dans le contexte de la conduite, et par exemple en France, des contraventions, des retraits de points ou le retrait du permis de conduire sont des solutions pour obliger les individus à "bien" se comporter. Les pénalités citées précédemment nous semblent moins évidentes pour des agents virtuels dans ce type d'application.

Nous envisageons donc un modèle qui autorise la violation de certaines règles de conduite et qui diffère par certains aspects de la littérature consacrée à cette problématique. La section suivante propose un modèle pour la violation de normes dans une application de trafic routier.

## 3 Modèle de comportements non normatifs

La proposition de notre modèle se définit par la description de règles contextuelles et par la ca-

pacité de l'agent à anticiper. Ces deux composantes sont présentées successivement.

### 3.1 Comportement normatif

Dans la réalité, les conducteurs humains ne respectent pas obligatoirement le code de la route. Des études en psychologie de la conduite montrent que les conducteurs agissent de manière opportuniste en fonction du contexte et de la situation de trafic dans le but d'atteindre temporairement ses objectifs.

A notre niveau, nous pensons que chaque agent a cette tendance à violer la norme en fonction de ces objectifs ; mais aussi en fonction de sa façon de percevoir les relations de priorités qui sont d'ailleurs définies dans le code de la route [10].

Nous considérons un prédicat *prioCode* utilisé par le mécanisme de coordination suivant le nombre de points de conflits (point d'intersection des deux véhicules). (Cf. figure 1).

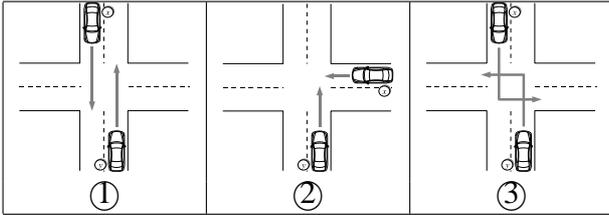


FIG. 1 – Situations élémentaires dans un carrefour

- $\neg prioCode(x, y) \wedge \neg prioCode(y, x)$  : La première situation considère que les véhicules ne sont pas prioritaires. Le nombre de points de conflit est zéro ; puisqu'aucun conflit ne peut survenir entre ces deux véhicules  $x$  et  $y$ .
- $prioCode(x, y) \wedge \neg prioCode(y, x)$  : La seconde situation considère que l'un des véhicules est prioritaire sur l'autre. Le nombre de points de conflit est de un.  $x$  arrive à la droite de  $y$  et en l'absence de panneaux de signalisation (Stop, feux tricolores),  $x$  a la priorité.
- $prioCode(x, y) \wedge prioCode(y, x)$  : La dernière situation admet qu'il existe deux points de conflits ; les deux véhicules  $x$  et  $y$  ont un même niveau de priorité.

A partir de ces situations élémentaires, un carrefour complexe ou un rond-point est perçu comme une combinaison de ces situations élémentaires. Le comportement associé à chaque agent dépend ainsi de sa façon de percevoir le carrefour ainsi que les interactions inter-agents. Les résultats obtenus par cette première approche ont été considérés comme satisfaisants

(des EQMR<sup>1</sup> inférieurs à 10%, critère retenu dans les études de trafic) [15]. Souhaitant améliorer la qualité des résultats, nous avons ensuite entrepris de modifier le comportement des agents, en introduisant un non-respect de la norme.

### 3.2 Description des règles de comportement non normatif

**Définition des règles.** Pour atteindre cet objectif, l'idée consiste à définir également un prédicat *prio* spécifiant la relation de priorité suivant la perception de l'agent. Si l'agent fonde sa perception des priorités uniquement sur le code de la route, le comportement résultant obtenu sera considéré comme normatif.

Nous avons enrichi le modèle en considérant d'autres informations contextuelles sur la situation de conduite qui peuvent avoir un réel impact sur la reconnaissance de priorité et qui permettrait de caractériser un comportement non normatifs des agents.

Nous proposons de décrire la violation de norme par l'expression de règles définies de la façon suivante :

$$\boxed{\text{comportement normatif}} \wedge \boxed{\text{precondition}} \\ \wedge \boxed{\text{postcondition}} \rightarrow \boxed{\text{comportement } \neg\text{normatif}}$$

Cette règle générique peut se décomposer en quatre parties :

- La partie de la règle correspondant au *comportement normatif* exprime la relation de priorité entre le véhicule et un autre véhicule du point de vue du code de la route.
- La partie s'attachant à la *precondition de la violation* exprime le fait que l'agent planifie de violer le code de la route et d'agir d'une manière non normative.
- La partie correspondant à la *postcondition de la violation* indique la condition que doit remplir l'agent afin de pouvoir agir d'une manière non normative.
- La partie associée au *comportement non-normatif* met en évidence la relation de priorité que l'agent doit percevoir pour agir de façon non normative.

Pour décrire les différentes règles, les prédicats suivants ont été introduits :

- *impatience* indique le niveau d'impatience de l'agent (ce niveau est activé lorsque l'agent

<sup>1</sup>Ecart Quadratique Moyen Relatif, i.e. l'erreur au carré entre les données réelles et données simulées.

s'est arrêté pour un laps de temps supérieur à un certain seuil ; il est à noter que cette valeur est différente pour chaque agent).

- *re-démarrage* exprime l'idée que l'agent est en phase d'accélération après une certaine période de temps à un stop (ce prédicat reste vérifié jusqu'à ce que l'agent atteigne une certaine vitesse).

Une fonction  $distC$  permet également d'exprimer la distance que les deux agents doivent parcourir pour atteindre leur point de conflit (intersection de leur trajectoire).

En autorisant la violation de norme, nous augmentons *a priori* le risque d'accident et d'interblocage. Afin d'éviter cet écueil et afin d'éviter aussi de donner des pénalités qui n'auraient pas dans notre contexte, de réels intérêts, nous envisageons la description d'un modèle d'anticipation qui permettra d'éviter ces problèmes.

**Deux exemples de règles de comportement non normatif.** Nous expliquons assez rapidement la proposition d'encodage du modèle. Dans un souci de lisibilité, nous ne développerons pas les règles développées dans l'outil (voir par exemple, [10]). Pour éviter certains problèmes liés à la cohérence des règles, nous avons choisi de ne sélectionner qu'une seule règle à chaque itération (les règles étant ordonnées, la sélection s'effectue suivant cet ordre). Parmi une dizaine de règles encodées actuellement dans l'outil ArchiSim (voir la partie suivante), nous présentons les deux règles suivantes liées au niveau d'impatience du conducteur.

- *Règle de prise en compte de la distance au point de conflit* : Lorsque le trafic à l'intérieur de l'intersection est relativement dense, le respect des règles du code de la route conduit à des périodes d'attente très longue au Stop. Dans la vie réelle, un conducteur choisit généralement de ne pas respecter les règles du code de la route. Par exemple, lorsque un véhicule  $a_y$  est arrêté ou roule à une vitesse très lente, un autre agent  $a_x$  peut décider qu'il a la priorité (*comportement non normatif*) s'il est impatient (*precondition de la violation*) et est plus proche du point de conflit que l'autre véhicule  $a_y$  (*postcondition de la violation*).

$$\boxed{\neg prioCode(a_x, a_y) \wedge prioCode(a_y, a_x)} \wedge \boxed{impatience(a_x)} \wedge \boxed{(distC(a_x, a_y) < distC(a_y, a_x))} \quad (1) \\ \rightarrow \boxed{prio(a_x, a_y) \wedge \neg prio(a_y, a_x)}$$

- *Règle de prise en compte de la distance au*

*freinage* : Considérons maintenant le cas d'un véhicule approchant à l'intersection avec une vitesse élevée. Si la vitesse de  $a_x$  est suffisamment élevée par rapport à celle de  $a_y$ ,  $a_x$  peut considérer qu'il a la priorité sur  $a_y$ , à la condition que celui-ci ait une distance de freinage suffisante pour éviter une collision. La post condition  $distC(a_y, a_x) < -\frac{V_{a_y}^2}{2\gamma_{a_y}}$  exprime que  $a_y$  sera capable de freiner avec une décélération  $\gamma_{a_y}$  et ainsi s'arrêter avant le point de conflit. La distance de freinage est décrite par la formule cinématique  $-\frac{V_{a_y}^2}{2\gamma_{a_y}}$ .

$$\boxed{prioCode(a_x, a_y) \wedge \neg prioCode(a_y, a_x)} \wedge \boxed{\frac{distC(a_y, a_x)}{V_{a_y}} < \frac{distC(a_x, a_y)}{V_{a_x}}} \wedge (2) \\ \boxed{distC(a_y, a_x) < -\frac{V_{a_y}^2}{2\gamma_{a_y}}} \rightarrow \boxed{\neg prio(a_x, a_y) \wedge prio(a_y, a_x)}$$

### 3.3 Anticiper des comportements non normatifs

L'idée initiale consiste à modéliser des comportements individuels des conducteurs. En fonction de leurs expériences, les conducteurs humains anticipent afin d'éviter des situations dangereuses ou critiques. Davidsson [6] propose également de contrôler à l'aide d'anticipation préventive de telles situations et de maintenir l'agent dans une situation désirée/stable (i.e. non critique).

Nous avons donc voulu modéliser cette notion en adaptant une approche de traitement par contraintes. Un réseau de contraintes est un ensemble de variables avec des domaines associés et un ensemble de contraintes : "*Variables are object or item that can take a variety of values. The set of possible values for a given variable is called domain. [...] Constraints are rules that impose a limitation on the values that a variable may be assigned.*" [7].

Chaque agent construit une représentation de son environnement et plus spécifiquement des relations et des interactions inter-agents. La représentation  $M_{a_i}$  de chaque agent  $a_i$  est constituée de trois composants élémentaires, notée  $\langle A, D, R \rangle$  :

- $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  est un sous-ensemble de tous les agents perçus par  $x$ ,
- $D = \{dom(a_1), dom(a_2), \dots, dom(a_n)\}$  définissant le domaine de chaque agent de  $A$ ,

- $R = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$  où chaque  $r_i$  est une relation binaire exprimant une interaction entre deux agents de  $A$ .

Notons qu'un domaine dépend de l'application à une autre, et peut être spatial ou temporel. De plus, chaque action proposée par un agent est décrit par l'ajout ou la suppression d'une relation dans  $R$ . Les effets indirects sont calculés par des techniques de propagation sur les effets directs des actions; ce qui permet de réduire l'espace de recherche. L'algorithme classique AC-3 a été adapté à notre problématique [9].

Les simulations doivent prendre en compte des agents avec des contraintes spatiales et temporelles. L'ensemble  $R$  est constitué de (i) relation de priorité (prédicat *prio* lequel a déjà été introduit), et (ii) trois types de relations de "blocage" :

- $bph_{a_i}(a_x, a_y)$  signifiant " $a_x$  est physiquement bloqué par  $a_y$  du point de vue d'un agent  $a_i$ ".
- $bpha_{a_i}(a_x, a_y)$  signifiant " $a_i$  observe que  $a_x$  sera physiquement bloqué par  $a_y$ ".
- $bpr_{a_i}(a_x, a_y)$  signifiant " $a_y$  a la priorité sur  $a_x$  du point de vue de l'agent  $a_i$ ".

Aux contraintes spatiales, les domaines associés à chaque agent expriment les contraintes temporelles. A un instant donné  $t$ , si une valeur  $i$  n'est pas présente dans le domaine d'un agent, cet agent sera considéré comme bloqué à  $t + i$ . Par exemple :

- $dom(a_z) = [1, +\infty[$  est équivalent à " $a_z$  peut agir et se déplacer durant l'intervalle  $t + 1$  à  $+\infty$ ".
- $dom(a_z) = [1, 4] \cup [8, 10]$  est équivalent à " $a_z$  sera bloqué entre  $t + 5$  et  $t + 7$ ".

Comme les relations ont une sémantique particulière et sont appliquées dans un cadre temporel, nous avons définis pour chaque relation des propagateurs spécifiques. Ces propagateurs reposent sur la manipulation d'intervalles.

La relation  $bph$  peut ainsi s'exprimer comme un décalage entre deux intervalles de temps correspondant au temps de redémarrage du véhicule bloqué :

$$bph_{a_i}(a_x, a_y) \equiv_{def} \left( dom(a_x) = \left\{ [t_{a_y} + Tr(a_x), t'_{a_y} + Tr(a_x)] \right\} \right) \quad (3)$$

$Tr(a_x)$  est le temps nécessaire de redémarrage de  $a_x$ ;  $t_{a_y}$  et  $t'_{a_y}$  sont respectivement les bornes inférieures et supérieures de  $dom(a_y)$ .

La relation  $bpha$  peut être vue comme l'union de l'intervalle de temps nécessaire pour que le blocage devienne effectif et de l'intervalle du véhicule bloquant décalé d'une durée égale au temps de redémarrage :

$$bpha_{a_i}(a_x, a_y) \equiv_{def} \left( dom(a_x) = ([t_{a_x}, t_{a_x} + Tac(a_x, a_y)] \cup [t_{a_y} + Tr(a_x), t'_{a_y} + Tr(a_x)]) \right) \quad (4)$$

$Tac(a_x, a_y)$  est le temps au conflit mis par  $a_x$  pour atteindre  $a_y$  et  $t_{a_x}$  est la borne inférieure de  $dom(a_x)$ .

La relation  $bpr$ , quant à elle, se définit comme la différence entre l'intervalle de temps nécessaire au véhicule bloquant pour dépasser son point de conflit et son propre intervalle

$$bpr_{a_i}(a_x, a_y) \equiv_{def} \left( dom(a_x) = \left\{ [t_{a_x}, t'_{a_x}] - [t_{a_y}, t_{a_y} + Tpc(a_y, a_x)] \right\} \right) \quad (5)$$

$Tpc(a_y, a_x)$  est le temps mis par  $a_y$  pour dépasser son point de conflit avec  $a_x$ .

Dans cette section, nous avons décrit un modèle comportemental et nous proposons de l'appliquer au contexte urbain avec le simulateur ArchiSim [12].

## 4 Mise en œuvre dans Archisim

### 4.1 Illustration du principe sur un carrefour

Nous expliquons le fonctionnement du modèle sur un carrefour à trois véhicules tournant à gauche. Cette situation de trafic est illustrée à la figure 2. Un agent  $x$  arrive au carrefour et doit déterminer sa relation de priorité avec les autres véhicules  $y$  et  $z$ . Les trois véhicules ont pour objectif d'effectuer une manoeuvre de tourne à gauche. Selon le code de la route :

- $x$  a priorité sur  $y$  et doit céder le passage au véhicule provenant de sa droite, à savoir  $z$ .  $z$  doit toutefois laisser passer le véhicule  $y$  jusqu'à son premier point de conflit.

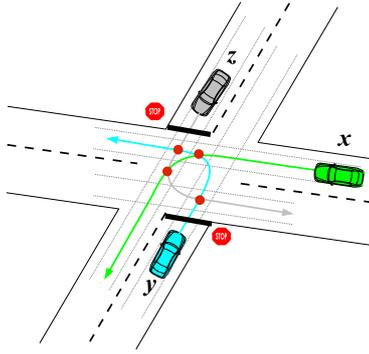


FIG. 2 – Coordination de trois agents dans un carrefour

- Les véhicules ne devraient pas entrer dans l’intersection s’ils ne sont pas certains d’en sortir.

Cet exemple sera traité successivement suivant deux phases, à savoir la violation de la norme par des agents et la capacité des autres agents à anticiper.

**Violation de la norme par des agents.** Nous supposons que les véhicules  $y$  et  $z$  ont décidé d’entrer dans le carrefour et de violer la norme. Dans cet exemple, la violation de norme consiste à ne pas s’arrêter au stop, et par conséquent à ne pas céder le passage à  $x$ . Pour autoriser cette violation de norme, nous utilisons un ensemble de règles contextuelles décrites précédemment.

Dans cette première phase, chaque agent évalue les règles de priorité qu’il partage avec les autres agents perçus. Nous pouvons en déduire assez facilement :

- $prioCode(x, z) \wedge prioCode(x, y)$  pour le véhicule  $x$  ;
- $\neg prioCode(y, x) \wedge \neg prioCode(y, z)$  pour le véhicule  $y$  ;
- $\neg prioCode(z, x) \wedge \neg prioCode(z, y)$  pour le véhicule  $z$  ;

Dans un comportement normatif, il est clair que le véhicule  $x$  est prioritaire sur les véhicules  $y$  et  $z$ , i.e. le prédicat  $prioCode$  est directement défini par le prédicat  $prio$ . Le mécanisme de coordination est appliqué afin d’obtenir le résultat attendu.

Imaginons l’hypothèse dans laquelle les véhicules  $y$  et  $z$  arrivent à l’intersection avec une vitesse élevée et estiment en même temps que le véhicule  $x$  est assez loin du carrefour (distance de freinage suffisante). La règle de prise en compte de la distance du freinage peut alors être appliquée aux deux véhicules (règle 2). En effet, la relation  $prioCode(x, y) \wedge \neg prioCode(y, x)$

permet d’obtenir  $\neg prio(x, y) \wedge prio(y, x)$ , à savoir la perception de la priorité pour  $y$  au dépens de  $x$ . De même, nous pouvons aussi supposer un raisonnement identique pour le véhicule  $z$ , la relation est ainsi modifiée  $prioCode(x, z) \wedge \neg prioCode(z, x)$  par  $\neg prio(x, z) \wedge prio(z, x)$ .

Prenons la situation dans laquelle deux agents  $y$  et  $z$  ont décidé de ne pas respecter les règles de conduite (figure 3). Si  $x$  appliquait le schéma de raisonnement précédent, il se déplacerait et provoquerait un interblocage.

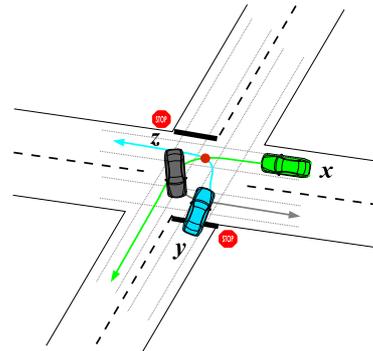


FIG. 3 – Situation après comportement non normatif des agents  $y$  et  $z$

Comme nous l’avons déjà évoqué, ces règles de violation de la norme expriment l’idée que l’agent simulé puisse agir avec un comportement non normatif (proche d’un comportement de conducteur humain), en estimant qu’il n’y aura pas de risque de collision. Cependant, ce comportement ne nous garantit plus un flux global cohérent du trafic routier. Rappelons que le code de la route a été introduit non seulement pour empêcher des collisions entre véhicules ; mais aussi pour éviter des situations d’interblocages. Notre idée consiste à anticiper ces situations d’interblocage, et ainsi à maîtriser la violation éventuelle de normes par les agents.

**Anticipation de l’interblocage.** Pour des raisons de clarté dans l’explication, nous supposons que le temps nécessaire à un véhicule pour ne plus être sur la trajectoire d’un autre véhicule est  $Tr(a_i) = 3$  secondes. Dans le modèle implémenté, ce calcul est obtenu par l’équation cinématique de re-démarrage d’un véhicule. L’intervalle de temps sur lequel les agents anticipent est admis également comme borné, à savoir 10 secondes. Dans le modèle de ArchiSim, cette borne est un paramètre (généralisé aléatoirement) qui varie suivant les agents.

L’agent  $x$  qui a perçu l’engagement des véhicules  $y$  et  $z$  dans le carrefour, va effectuer un

raisonnement présenté dans la suite. L'agent  $x$  avait construit sa représentation de l'environnement,  $M_x = \langle A, D, R \rangle^2$  :

$$\begin{aligned} A &= \{x, y, z\} \\ D &= \{dom(x) = [1, 10], dom(y) = [1, 10] \\ &\quad dom(z) = [1, 10]\} \\ R &= \{prio(x, y) \wedge \neg prio(y, x), \\ &\quad \neg prio(x, z) \wedge prio(z, x), \\ &\quad bpha(x, z), bph(z, y)\} \end{aligned}$$

Notons que la relation  $\neg prio(x, z) \wedge prio(z, x)$  est redondante avec les relations de blocage  $bph$  et  $bpha$ . Dans la suite, cette relation ne sera plus présentée dans l'ensemble  $R$ . Du point de vue de l'agent  $x$ , nous obtenons le raisonnement suivant :

1. *propagation* : Compte tenu des différentes relations de l'ensemble  $R$ , les domaines associés aux trois agents de  $A$  peuvent être réduits. La propagation peut s'effectuer en deux sous-étapes. La première sous-étape consiste à traiter la relation  $bph$  ; tandis que la seconde vise à exploiter la connaissance sur la relation  $bpha$ . L'agent  $z$  sera bloqué jusqu'à ce que  $y$  ne soit plus sur sa trajectoire. En estimant le temps nécessaire à  $z$  pour dépasser le point de conflit égal à 3 secondes, le domaine  $dom(z)$  se réduit à l'intervalle  $[4, 10]$ . Le traitement de la seconde relation  $bpha$  permet de réduire le domaine du véhicule  $x$  ; pour qu'il ne soit pas en conflit avec le domaine résultant de  $z$ . Si le temps au conflit  $Tac(x, z)$  est de 2 secondes,  $x$  sera capable de se déplacer sur l'intervalle  $[1, 2]$ . Le véhicule  $z$  va pouvoir re-démarrer à partir de  $t + 4$  ; et  $x$  pourra poursuivre sa route à partir de  $t + 5$ , d'où son domaine  $dom(x) = [1, 2] \cup [5, 10]$ .

$$D = \{dom(x) = [1, 2] \cup [5, 10], \\ dom(y) = [1, 10], dom(z) = [4, 10]\}$$

2. *calcul des effets des actions de  $x$*  : L'algorithme de coordination gère que l'accélération longitudinale. Deux actions sont donc possibles pour  $x$  : *Go* et *Stop*. Si  $x$  décide d'avancer (i.e. action *Go*) et donc de rentrer dans le carrefour : le blocage  $bpha$  devient effectif et la relation  $bpha$  est remplacée par  $bph$  ; la relation de priorité entre  $x$  et  $y$  devient une relation de blocage  $bph(y, x)$ .

$$R = \{bph(y, x), bph(x, z), bph(z, y)\}$$

3. *propagation* : L'introduction de la relation  $bph(y, x)$  remet en cause le domaine de  $y$  qui dans un premier parcours du réseau peut se réduire à  $[7, 10]$ . Par suite, cette réduction remet également en cause tous les autres domaines dont celui de  $z$  :  $dom(z) = [9, 10]$ . Comme le domaine de  $z$  est modifié, le domaine de  $x$  peut encore être réduit à  $[1, 2] \cup [10, 10]$  ; induisant de nouvelles réductions de domaine pour  $y$  et  $z$ . Le véhicule  $x$  peut se déplacer aux itérations 1, 2 et 10 ; cela sous-entend que  $y$  ne pourra pas se déplacer avant  $t + 11$ . Nous en déduisons que  $dom(y) = \emptyset$ . Comme  $y$  ne peut pas se déplacer sur l'intervalle étudié, il en est de même pour  $z$ , et par conséquent  $dom(z) = \emptyset$ . A l'itération suivante, l'impossibilité de  $z$  de se déplacer induit l'impossibilité de  $x$  à re-démarrer à  $t + 10$ . D'où un domaine de  $x$  égal à  $[1, 2]$ . A la fin de ces différentes itérations, nous obtenons :

$$D = \{dom(x) = [1, 2], dom(y) = \emptyset \\ dom(z) = \emptyset\}$$

4. *recherche des états indésirés* : A la suite de ce raisonnement,  $x$  est capable de prévoir que s'il choisit l'action d'avancer, il sera bloqué à partir de  $t + 2$  et bloquera également  $y$  et  $z$ . De son point de vue, ceci constitue un état non désiré. L'agent  $x$  doit donc éliminer l'action d'avancer de sa liste d'actions possibles. Il décide donc de s'arrêter et perd ainsi, par la même occasion, la priorité.

Dans cette situation, le même raisonnement du point de vue de  $y$  n'infère pas d'états indésirés. L'agent  $y$  peut se considérer comme prioritaire au vu de la décélération pratiquée par  $x$  pour s'arrêter. Le mobile  $y$  peut donc s'engager et ainsi débloquent les deux autres mobiles  $z$ , puis  $x$ .

## 4.2 Evaluation des temps d'exécution des agents

Nous avons effectué des mesures de performances des temps d'exécution des agents. Nous avons décrit un carrefour à priorité à droite dans lequel nous avons fait évoluer la densité de véhicules par branches de ce carrefour. La figure 4 montre la courbe obtenue.

<sup>2</sup>Pour des raisons de lisibilité, nous n'indiquons pas les indices représentant le point de vue de l'agent  $x$  dans les relations de blocages définissant l'ensemble  $R$ . Notons également que seules les informations modifiées seront présentées dans la suite du papier.

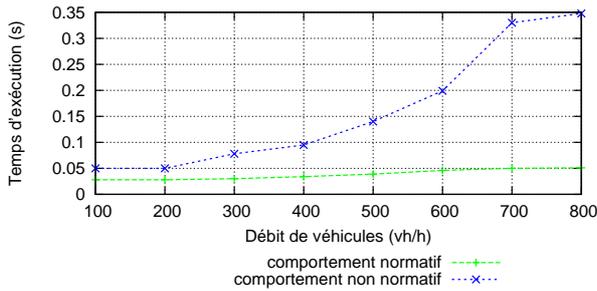


FIG. 4 – Mesure de Performances d'exécution des modèles des agents

Il est évident que plus la densité croît sur chaque branche, plus le temps nécessaire pour effectuer la décision de chaque agent croît. Pour des densités faibles d'agents (moins de 300 véhicules/heure), le temps d'exécution nécessaire pour l'ensemble des agents est très raisonnable : ce temps est inférieur à 0.1 seconde. Pour des densités élevées d'agents simulés (densité de 800 véhicules/heure), le temps nécessaire pour exécuter le modèle proposé utilise 0.35 seconde en moyenne de temps CPU. Nous pouvons donc affirmer que ce temps est relativement faible au vu d'une densité importante d'agents pour les simulations proposées.

### 4.3 Fonction du pas de simulation

Dans un but de robustesse et d'utilisation de tels outils par des ingénieurs en trafic, un outil de simulation doit, à notre avis, simuler des phénomènes identiques suivant différents pas de simulation. La difficulté des simulations multi-agents réside principalement dans un nombre important d'agents et dans un certain contrôle de l'émergence. Par conséquent, la reproductibilité d'une situation particulière est difficilement assurée. Il nous semble pertinent d'évaluer la stabilité suivant la variation du pas de simulation. L'outil ArchiSim autorise ce paramétrage et peut supporter une variation de 1 à 30 millisecondes. Les simulations peuvent donc être effectuées en temps réel, c'est à dire 1 seconde de temps de calcul équivaut à 1 seconde de simulation.

Dans le cadre d'une simulation d'un carrefour réel (Roma-Zerbi) situé dans le Sud de l'Italie (temps de simulation correspondant à 1h), nous avons vérifié les EQMR pour des pas de simulation différents : 1 ms, 5 ms et 10 ms. D'une manière globale, nous avons noté que ces simulations donnent de bons résultats sur chaque branche du carrefour puisque les variations de

l'EQMR varient très faiblement (l'erreur est en moyenne de 0.009). La variation la plus importante se situe sur l'axe Est-Ouest avec une différence de 0.02. Ce dernier résultat tend à montrer que l'insertion de véhicules provenant de flux non prioritaire est un phénomène très sensible. Ces résultats sont illustrés à la figure 5.

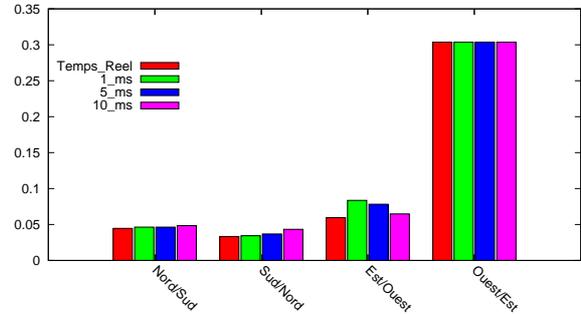


FIG. 5 – Variation des EQMR pour différents pas de simulation

En conclusion, nous pouvons souligner que la simulation basée sur notre modèle est reproductible pour des pas de simulation différents. Cet aspect nous semble crucial pour toute bonne simulation, bien qu'il soit souvent mal traité dans le domaine des SMA.

### 4.4 Mesure comparative sur un rond-point

Une autre expérimentation pour évaluer la validité du trafic d'un point de vue macroscopique, a été réalisée sur un rond-point. Le rond-point est de plus en plus présent sur les axes urbains. Il est considéré comme une succession de carrefours élémentaires et permet de remplacer les croisements de flux par des insertions de flux. Pour mener cette évaluation, nous nous sommes basés sur les résultats présentés dans l'article de Bared et Edara [2]. Les auteurs y présentent une comparaison entre différents outils de simulation pour l'évaluation de la capacité du rond-point. Différentes données de trafic ont été relevées sur une dizaine de sites existant aux Etats-Unis et présentant une géométrie identique. Le tableau 1 récapitule les principales dimensions du rond-point.

La figure 6 donne un aperçu général de l'infrastructure. Les expérimentations menées par les auteurs [2] consistent à faire varier le débit circulant sur la voie intérieure (flux conflictuel) du rond-point et mesurer le débit entrant des véhicules (flux d'entrée). Les données collectées sur le terrain montrent que plus le débit à l'intérieur du rond-point est élevé, plus le débit d'en-

TAB. 1 – Description géométrique du rond-point

Diamètre du rond central	35m
Rayon de courbure en entrée	20m
Rayon de courbure en sortie	20m
Largeur de la chaussée en entrée	4,5m
Largeur de la chaussée en approche	4m
Largeur de la chaussée en sortie	4,5m
Largeur de la chaussée au centre	6m

trée est faible. Le rapport entre les débits du flux conflictuel et du flux d'entrée permet d'évaluer les performances du rond-point en terme de capacité de circulation. Les auteurs comparent donc les débits réels avec ceux obtenus avec le simulateur de trafic Vissim [18].

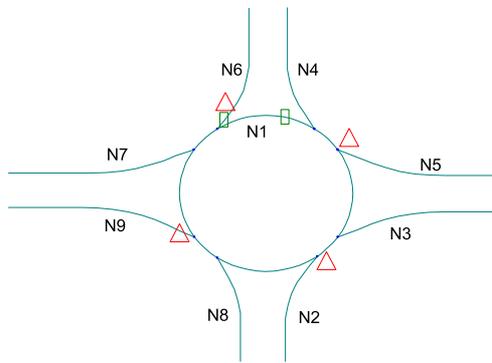


FIG. 6 – Représentation graphique du rond-point

Nous avons donc mené la même étude en utilisant ArchiSim. La géométrie du rond-point a été reproduite et des capteurs virtuels ont été positionnés sur les différentes routes N1 et N6 (figure 6) de manière à mesurer les débits à l'intérieur du rond-point et en entrée. Les véhicules sont générés en amont du rond-point sur les branches N5 et N6 avec des vitesses désirées<sup>3</sup> comprises entre 30mph et 36mph, soit une plage allant de 48km/h à 58km/h. La répartition des vitesses desirs entre les véhicules générés se fait suivant une gaussienne autour de 53km/h avec un écart-type maximum de 5km/h. Les débits à l'intérieur du rond-point augmentent toutes les 10min et varient de 120 véhicules par heure à 900 véhicules par heure. Les débits en entrée sont agrégés toutes les minutes. Le tableau 2 présente les résultats obtenus dans [2], ainsi que ceux obtenus avec ArchiSim.

Ces résultats sont reportés sur la courbe de la figure 7. L'abscisse correspond au débit à l'intérieur du rond-point et l'ordonnée au débit en

<sup>3</sup>Vitesse à laquelle les agents souhaitent rouler.

TAB. 2 – Comparaison des Résultats de Vissim/ArchiSim avec les données réelles

Débit intérieur du rond-point	Débit en entrée du rond-point		
	Réel	Vissim	ArchiSim
120	1020	1250	967
300	852	930	813
480	690	700	682
600	588	550	606
720	480	400	466
900	312	290	313

entrée du rond-point. La courbe correspondant aux données réelles indique une baisse de la capacité de circulation du rond-point ; lorsque les débits augmentent.

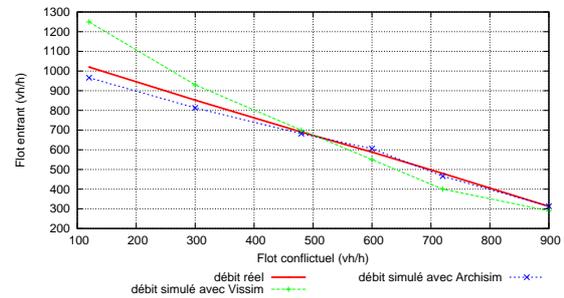


FIG. 7 – Comparaison ArchiSim/Vissim avec des données réelles

La figure 7 montre qu'ArchiSim permet de simuler de manière réaliste les débits entrants du rond-point. Outre les résultats meilleurs que ceux de Vissim, il est important de signaler que la phase de paramétrage de la simulation est plus simple. En effet, Vissim se base sur une approche plutôt mathématique du trafic utilisant des lois de poursuite pour le suivi de véhicule et appliquant le principe du "gap acceptance" pour la fusion ou le croisement de flux de véhicules. Vissim requiert ainsi de la part de son utilisateur un balisage du rond-point consistant à définir pour chaque panneau de céder-le-passage un ensemble de marqueurs de conflits [18]. Ces marqueurs sont ensuite utilisés par le moteur de simulation pour déterminer si un véhicule peut ou non entrer dans le rond-point. L'approche multi-agent utilisée dans ArchiSim permet de s'affranchir de cette phase de balisage et de paramétrage de la simulation.

## 5 Conclusion

La littérature récente en SMA propose de décrire des comportements non normatifs des agents, souvent dans le cadre d'applications

pour des institutions électroniques. Pour notre part, cette idée est également applicable à des problématiques de simulation de trafic routier. La différence entre notre approche et celle qui est généralement suivie réside dans la difficulté de proposer des "pénalités" liées au risque pris par ces agents.

Dés lors, il semble judicieux de proposer des agents ne respectant pas les règles de conduite (la norme) ; car les conducteurs humains violent ces règles, souvent à cause d'une perception différente de la réalité. Nous avons donc effectué un travail qui propose une modification intuitive des règles de priorités (règles empiriques décrites autorisant la violation de la norme). Enfin, d'un point de vue global, l'ensemble du trafic doit rester cohérent : notre proposition consiste donc à anticiper afin de maîtriser ces violations éventuelles de normes de certains agents.

Quelques validations ont été décrites dans ce papier. Nous avons en particulier insisté sur la cohérence du comportement global indépendamment du pas de simulation. L'intérêt des agents non normatifs est d'améliorer aussi les résultats par rapport à des mesures réelles de trafic. De plus, des comparaisons effectuées avec un autre outil (Vissim) dans le contexte du rond-point ont montré la pertinence du modèle. Enfin, d'autres validations antérieures [9] [15] ont donné de bons résultats, à savoir une amélioration nette des EQMR et une diminution importante du nombre de deadlocks. Actuellement, nous essayons de poursuivre les comparaisons avec d'autres outils existants et de valider ce modèle sur un axe urbain.

## Références

- [1] H. Aldewereld, D. Grossi, J. Vázquez-Salceda, F. Dignum, Designing Normative Behaviour by the Use of Landmarks, *International Workshop of AAMAS'05 on Agents, Norms and Institutions for Regulated Multi Agent Systems*, Utrecht, Pays-Bas, juillet, 2005.
- [2] J. G. Bared and P. K. Edara, Simulated Capacity of Roundabouts and Impact of Roundabout Within a Progressed Signalized Road, *Proceedings of the National Roundabout Conference*, Transportation Research Board, Vail, Colorado, may 2005.
- [3] A. L. C. Bazzan. A distributed approach for coordination of traffic signal agents, *Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 10, 131-164, 2005.
- [4] E. Bou, M. Lopez-Sanchez, and J. A. Rodriguez-Aguilar. Self-configuration in autonomic electronic institutions, *Coordination, Organization, Institutions and Norms in Agent Systems (COIN) Workshop at ECAI Conference*, Riva del Garda, Italie, p 1-9, 2006.
- [5] C. Carabelea, O. Boissier, Coordinating agents in organizations using social commitments, *Proceedings of the 1st International Workshop on Coordination and Organisation (CoOrg'05)*, Namur, Belgique, avril, 2005.
- [6] P. Davidsson, *Anticipatory Behavior in Adaptive Learning Systems : A Framework for Preventive State Anticipation*, Springer Verlag, 2003.
- [7] R. Dechter, *Constraint Processing*. Morgan Kaufmann, 2003.
- [8] F. Dignum, D. Morley, L. Sonenberg, L. Cavedon, Towards socially sophisticated BDI agents, *Proceedings of the 4th International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS'2000)*, Boston, USA, p. 111-118, juillet, 2000.
- [9] A. Doniec, R. Mandiau, S. Espié, S. Piechowiak, Comportements anticipatifs dans les systèmes multi-agents. Application à la simulation de trafic routier. *Revue d'Intelligence Artificielle*, vol. 21-2, pp. 185-223, 2007.
- [10] A. Doniec, R. Mandiau, S. Espié, S. Piechowiak, Non-normative behaviour in multi-agent system : some experiments in traffic simulation. *IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT) 2006*, Hong Kong, China, p 30-36, décembre 2006.
- [11] B. Gateau, Modélisation et Supervision d'Institutions multi-Agents, *Thèse de Doctorat*, Ecole Nationale Supérieure des Mines de St-Etienne, Juin 2007.
- [12] S. Espié, ARCHISIM, Multi-actor parallel architecture for traffic simulation, *Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Transport Systems*, Yokohama, Japan, 1995.
- [13] N. R. Jennings, Coordination techniques for distributed artificial intelligence, *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*, p 187-210, Wiley, 1996.
- [14] B. Lacroix, Ph. Mathieu, S. Picault, Une gestion réaliste du temps et de l'espace dans les simulations de foules, *Journées Francophones des systèmes multi-agent*, Hermès eds., pp. 77-80, 2006.
- [15] R. Mandiau, A. Champion, J-M Auberlet, S. Espié, C. Kolski, Behaviour based on decision matrices for a coordination between agents in urban traffic simulation, *Applied Intelligence*, sous presse.
- [16] Y. Shoham, M. Tennenholtz, On Social Laws for Artificial Agent Societies : Off-Line Design, *Journal of Artificial Intelligence*, vol. 1-2, 73, p. 231-252, 1995.
- [17] O. Simonin, J. Ferber, Modélisation des satisfactions personnelles et interactives d'agents situés coopératifs, *9ème journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et des Systèmes Multi-Agents (JFIADSMA'2001)*, Montréal, Canada, 2001.
- [18] Vissim. VISSIM 3.70 User Manual, *Technical Report*, PTV Planung Transport Verkehr AG : Karlsruhe, Germany, 2003.