



HAL
open science

Situations accidentogènes dans les générateurs de trafic routier

Philippe Mathieu, Antoine Nongaillard, Berenice Reffet

► **To cite this version:**

Philippe Mathieu, Antoine Nongaillard, Berenice Reffet. Situations accidentogènes dans les générateurs de trafic routier. 26èmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA'2018), Oct 2018, Métabief (France), France. pp.31-40. hal-01867957

HAL Id: hal-01867957

<https://hal.science/hal-01867957v1>

Submitted on 27 Sep 2018

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.

Situations accidentogènes dans les générateurs de trafic routier

P. Mathieu^a
philippe.mathieu@univ-lille.fr

A. Nongaillard^a
antoine.nongaillard@univ-lille.fr

B. Reffet^{a,b}
berenice.reffet@renault.com

^aUniv. Lille, CNRS, Centrale Lille, UMR 9189 - CRISAL - Centre de Recherche en Informatique Signal et Automatique de Lille, F-59000 Lille, France

^bTechnocentre Renault, 78280 Guyancourt

Résumé

Avec l'avènement du véhicule autonome et la mutation que va connaître le secteur automobile dans les dix prochaines années, la simulation de trafic routier a pris un nouvel essor. C'est notamment l'un des rares moyens pour tester un véhicule autonome in silico [7]. Pour y parvenir, les générateurs actuels doivent augmenter leur réalisme. Nous soutenons ici que l'un des points majeurs de ce réalisme concerne la capacité des générateurs à produire des accidents dans l'environnement du véhicule testé. À notre connaissance, aucun des générateurs existants ne prend en compte cette considération nécessitant une description plus fine que celle habituellement utilisée pour décrire le comportement de conduite. Nous décrivons dans cet article un modèle de comportement paramétrique permettant une telle performance, et montrons qu'il répond aux faits stylisés reconnus en accidentologie.

Mots-clés : Trafic, simulation, accidents, comportements, multi-agents

Abstract

The advent of autonomous vehicles is leading to deep changes in the automotive sector for the next decade. As one of the few ways to test an autonomous vehicle, road traffic simulators take a new lease of life. However, traffic generators do not consider crashes : the tested vehicle's behavior cannot face unforeseen cases. We state that it is a major issue and we propose a parametric model leading to traffic generation characterized by a wide behavioral spectrum. Instead of planned crashes, this model allows the emergence of crashes due to interactions among vehicles. After a description of the behavioral model, we show that simulations are able to exhibit stylized facts recognized in this field.

Keywords: Multiagent, traffic generator, behavioral model, simulation.

1 Introduction

En simulation de trafic comme dans tout autre domaine, toute simulation est une abstraction de la réalité. Cette abstraction peut-être plus ou moins détaillée. Concernant le trafic routier, à un faible niveau de détails, un flux de véhicules indifférenciés suffit : c'est le cas par exemple lorsque les véhicules ont un rôle simplement "décoratif". À un haut niveau de détails, selon l'objectif de l'étude, on souhaitera par exemple prendre en compte l'état de la chaussée, la capacité de freinage du véhicule ou l'état d'ébriété du conducteur. Nous nous positionnons ici, à l'instar de Scaner[2], Sumo[11], Vissim[4], Trafficgen[1], Movesim [18]... à un niveau intermédiaire où l'on prend en compte des véhicules individualisés, dotés de leur propre comportement, qui se déplacent sur une infrastructure routière plane et sans défaut (par exemple dont la topologie est fournie par un système d'information géographique comme *OpenStreetMap* ou *GoogleMaps*).

Ces dernières années, de nombreux générateurs de trafic et simulateurs de conduite ont été réalisés tant du point de vue recherche que du point de vue industriel avec des objectifs très différents du notre. Ces différents outils se sont principalement concentrés sur :

- *Le test d'infrastructures routières* : pour permettre l'étude de l'impact lié à l'ajout ou la suppression d'une route, pour l'aménagement des ronds-points ou des carrefours afin de vérifier si tout véhicule, notamment bus ou camion, est capable selon sa taille et son rayon de braquage de passer l'infrastructure étudiée sans soucis. Tester l'infrastructure nécessite des cartographies réelles et/ou des caractéristiques précises comme la taille de la route ou la taille des véhicules, mais celui-ci n'est qu'un décor ou un flux dans lequel bien souvent tous roulent à la même vitesse[4].

- *Le test du conducteur ou du cockpit d'un nouveau véhicule* : cette étude est souvent réalisée par une mise en condition de stress du conducteur humain grâce à un simulateur de conduite immersif. Ce dernier fournit alors les conditions nécessaires à l'étude de l'humain par des psychologues ou sociologues de la conduite ou de l'aménagement du véhicule par des ergonomes. Tester le conducteur nécessite avant tout un rendu visuel très réaliste et un avatar pour le véhicule piloté par l'humain. Un mécanisme de collision est généralement mis en place entre l'avatar et les véhicules simulés, mais les véhicules simulés n'ont jamais d'accidents entre eux. Là encore, on ne cherche pas à avoir des véhicules avec un comportement sophistiqué, mais simplement quelques véhicules "décor" pour mettre la pression sur l'humain [2]).
- *La mise en place de stratégies collectives* qui nécessitent une coordination intervéhicules et/ou des techniques d'apprentissage d'agents artificiels [1, 16]. Dans ces travaux, l'important n'est pas le véhicule en tant que tel, mais l'organisation collective, la coordination de l'ensemble ou les informations échangées. Les véhicules sont alors considérés parfaits, avec accélération et freinage instantanés ($v = 0$ peut être obtenue instantanément si nécessaire) pour faciliter les résolutions par des systèmes de gestion de contraintes[5].

En aucun cas ces objectifs ne sont liés à une simulation de comportement réaliste nécessitant une granularité fine du comportement du véhicule. Dans ces exemples, les véhicules doivent simplement être capables de rouler sur la route, et qu'ils roulent dans un monde parfait où tout le monde sait freiner à temps avec information complète, ou même instantanément, ne pose aucun problème. Les simulateurs *Movsim* [18] et *SUMO* [11] sont des outils parmi les plus complets puisqu'ils implémentent le modèle IDM [17] comme comportement longitudinal, associé au modèle MOBIL [8] pour le dépassement. Néanmoins, les véhicules raisonnent toujours avec une information totale, ce qui ne mène à aucun accident. La distance de perception cognitive est rarement prise en compte. Plus concrètement, aucun accident ne se produit jamais. Le plus souvent, les accidents ne sont pas traités en simulation car ils constituent un épi-phénomène au regard du nombre de trajets. Mais depuis l'avènement du véhicule au-

tonome, c'est le comportement du véhicule lui-même qui devient important. Le test du véhicule autonome nécessite des méthodes alternatives à la conduite sur route : tests accélérés [12], tests virtuels [3, 9, 14], analyse mathématique [6, 10], comportement scénarisés [13, 15]. Ces travaux ne visent pas à améliorer le réalisme des simulations.

Quand on étudie la taxonomie des accidents de la route, deux grandes catégories apparaissent, définies selon l'origine des accidents. La première catégorie regroupe les accidents dont l'origine provient uniquement d'un seul véhicule (le conducteur roule trop vite, il s'est endormi ou un pneu a éclaté) même si cela peut évidemment avoir des implications sur les autres. La caractéristique essentielle de ce type d'accident est que même si le conducteur avait été seul sur la route, l'accident se serait produit aussi. L'accident ne dépend pas d'un autre véhicule. Nous appelons cette catégorie *accident mono-source*. La seconde catégorie recense les accidents qui résultent des interactions entre plusieurs véhicules, et dépendent de chacun des comportements des véhicules présents dans la simulation (un freinage d'urgence ou un changement de voie intempestif a été effectué devant moi par exemple). La caractéristique essentielle de ce type d'accident est qu'on ne sait pas exactement ni où ni quand l'accident va se produire puisqu'il résulte d'une cascade d'interactions entre véhicules. On appellera cette catégorie *accident multi-véhicules*. Si la qualité d'une route ou d'un véhicule se détermine relativement facilement, la qualité d'un conducteur est plus délicate. L'humain fait ce qu'il peut selon ses moyens. Chacun a sa propre vision, ses propres réflexes et il est difficile d'incriminer un conducteur qui perçoit moins bien les obstacles qu'un autre. Par contre, ce que notre société lui demande, c'est d'avoir une conduite adaptée à ses capacités, à son véhicule et à l'infrastructure sur laquelle il conduit. C'est bien l'inadéquation entre le comportement du conducteur et les capacités de son véhicule qui, couplée aux interactions avec les autres, crée les accidents de type multi-véhicules. Toutes les autres situations rentrent dans la catégorie des accidents mono-source.

Différents modèles existent dans la littérature, principalement classifiés comme modèles de déplacement longitudinal ou latéral. Le modèle IDM (*Intelligent Driver Model*) [17] est un modèle de simulation microscopique qui permet d'examiner un trafic au niveau des individus qui

se focalise sur le véhicule les précédant. Initialement conçu pour les modèles de suivi de véhicules (*Car following model*) pour les régulateurs de vitesse, le modèle IDM est enrichi pour autoriser le changement de files [8]. D'autres études sont dédiées à l'introduction d'erreur d'estimation ou à l'anticipation [19]. Ces modèles microscopiques sont toujours basés sur la Physique et visent à rendre observable la dynamique d'un trafic. La plupart du temps, ces modèles ne peuvent être utilisés en simulation de trafic pour tester d'autres modèles comportementaux.

Notre objectif consiste donc, dans le cadre du test du véhicule autonome, à identifier un modèle permettant de simuler un trafic où les accidents multi-véhicules sont possibles, à le valider à travers des faits stylisés¹, et à l'étendre à des capacités complémentaires. Nous ne cherchons pas ici à créer des comportements parfaits, mais des ensembles de conducteurs couvrant le plus large spectre de comportements possibles afin d'amener à des situations non prévues par le véhicule autonome. Dans la section 2, nous présentons les modèles comportementaux paramétriques permettant l'apparition d'accidents et nous étudions la pertinence et l'impact des paramètres qui le caractérisent. Dans la section 3, nous présentons une extension du modèle de comportement en introduisant des paramètres supplémentaires dont nous montrons l'effet sur la simulation. La section 4 conclut cette étude et discute des perspectives futures.

2 Modèles de génération d'accidents

Un modèle est une abstraction de la réalité : il ne reflétera jamais parfaitement la situation réelle et pourra toujours être complexifié pour s'approcher un peu plus du monde réel. Notre objectif n'est pas de complexifier par plaisir le modèle mais plutôt d'identifier un modèle minimal de génération d'accidents, identifier l'essence du phénomène qui pourra être réutilisé par tous les simulateurs de ce type.

2.1 Génération d'accidents "mono-source"

On rappelle que dans ce travail l'accident mono-source correspond à un accident qu'un véhicule peut aussi avoir quand il est seul sur la route.

1. phénomènes macroscopiques reconnus dans le domaine

Parmi ces accidents mono-source, deux catégories se distinguent : (i) les accidents indépendants des actions du conducteur (le véhicule subit une défaillance brutale, un événement exogène survient inopinément); (ii) Les accidents qui dépendent d'une erreur de conduite (un excès de vitesse entraînant une perte de contrôle). Ces accidents sont immédiats et se produisent que le véhicule soit seul sur la route ou non.

Indépendants des actions du conducteur. À notre niveau de granularité, ces phénomènes ne nécessitent aucune interaction. Ils peuvent être déclenchés par un simple tirage aléatoire selon une loi statistique arbitraire. Dans notre modèle, une loi de Poisson est utilisée pour tirer avec une très faible probabilité un accident au niveau de chaque véhicule. Cette génération est relativement simple à simuler mais néanmoins nécessaire pour le réalisme du simulateur : parfois un pneu éclate ou un conducteur s'endort.

Les causes des accidents de type mono-source, indépendants des actions du conducteur, pourraient être détaillées à l'infini. Cependant, si on multiplie les causes d'accidents mono-source pris en compte, il faut alors introduire le nombre équivalent de conditions de déclenchement et les hiérarchiser, ce qui est d'autant plus difficile qu'elles sont nombreuses. L'absence de hiérarchisation des critères revient à leur indifférenciation, ce que nous faisons ici.

Dépendants des actions du conducteur. Dans nos travaux, nous prenons l'hypothèse que les limitations de vitesse représentent la dangerosité de la route. Un véhicule roulant à une vitesse inférieure ou égale à la limitation a un très faible risque d'accident. Par contre, plus le véhicule excède la vitesse limite, plus il a de risques d'accident.

Pour prendre en compte cet aspect dans notre modèle, nous avons mis en place un autre tirage aléatoire dépendant cette fois d'une exponentielle appliquée au rapport entre la vitesse du véhicule et la vitesse limite. Plus ce rapport est élevé, plus les risques d'accident augmentent (e.g., Fig. 1) où x représente la vitesse et z représente l'ampleur de l'impact de l'excès de vitesse :

$$\text{probabilité d'accident} = e^{-\frac{\log(100) * (x-z)}{200+z}}$$

Dans l'état actuel de notre environnement (qui ne prend pas en compte les largeurs de voies, l'adhérence, les hauteurs de bordure ou les

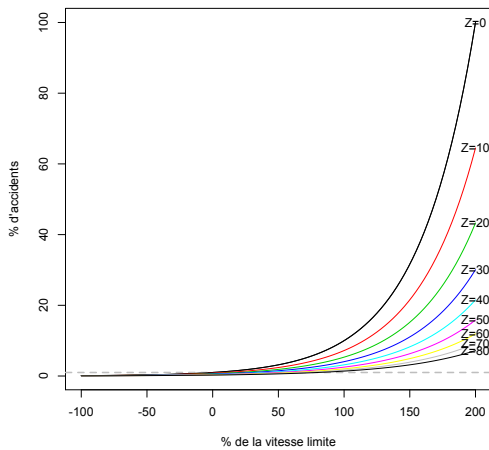


FIGURE 1 – Évolution du taux d'accident mono-source selon l'ampleur de l'excès de vitesse commis par un véhicule.

conditions météorologiques) il est difficile d'aller plus loin dans ce type d'accident. Néanmoins, ils relèvent tous de la même technique qui peut donc être généralisée.

Pour la prise en compte des accidents mono-source, nous avons donc mis en place les deux modèles précédemment décrits. Tous deux s'appuient sur un tirage aléatoire et tous deux se déclenchent en préambule de toute autre considération, l'un de ces tirages étant dépendant de l'environnement.

2.2 Génération d'accidents "multi-véhicules"

Un accident "mono-source" ne signifie pas que cet accident n'a pas de conséquence sur les autres véhicules, mais qu'il n'est pas causé par une interaction avec d'autres véhicules. Par contre, un accident "multi-véhicule" résulte d'une interaction entre plusieurs véhicules.

Un premier modèle : vitesses différenciées. Que les véhicules aient des vitesses différenciées est impératif pour générer des accidents de type multi-véhicules. En effet, si tous les véhicules roulent à la même vitesse, et ce quel que soit la vitesse, aucun accident multi-véhicule n'est possible (on rappelle qu'une perte de contrôle à 300km/h rentre dans la catégorie accident "mono-source"). On notera x un véhicule et $v(x)$ sa vitesse instantanée.

Des vitesses différenciées et un modèle de col-

lision assurent alors mais ce modèle complètement déterministe ne contient aucune interaction inter-véhicules (action d'un véhicule fonction d'un autre). De ce fait, aucune étude comportementale n'est possible. Ce modèle est donc insuffisant.

Un second modèle : perception et freinage. L'interaction inter-véhicules primordiale consiste à ralentir à la vue d'un autre véhicule. Cela nécessite donc une fonction de freinage $fr(v(x))$ ainsi qu'une distance de perception h_x , déclenchant le processus de freinage. On note que, associée à la vitesse instantanée $v(x)$, la fonction de freinage permet de calculer la distance nécessaire pour s'arrêter $d_0(v(x))$. Un accident peut survenir dès que cette distance est inférieure à la distance de perception du véhicule. Une fois qu'un véhicule prend conscience qu'un autre est devant lui, il est peut être trop tard pour freiner au regard des capacités de son véhicule. Notons que si tous les véhicules sont dotés de la même distance de perception, des accidents peuvent néanmoins survenir.

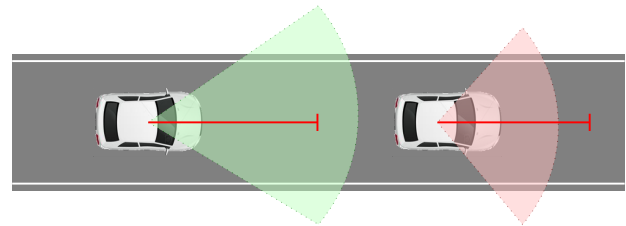


FIGURE 2 – Exemple de deux véhicules possédant des caractéristiques différentes : la distance de perception est représentée par un secteur angulaire et la distance d'arrêt est représentée en rouge.

La figure 2 illustre l'environnement le plus simple qui soit, à savoir une route à une voie, sur laquelle circulent deux véhicules ayant des caractéristiques différentes : la distance de perception (secteur angulaire) et la distance de freinage (trait rouge) sont représentées. Le véhicule le plus à gauche bénéficie d'une distance de perception suffisante par rapport à sa vitesse à l'inverse du véhicule de droite. Ce modèle est acceptable dans des cas très limités (tous les véhicules doivent être à vitesse nominale dès le départ) mais reste encore trop succinct.

Un troisième modèle : vitesse souhaitée et accélération. Le comportement précédent est insuffisant pour réaliser des études sur la régulation de la vitesse ou la formation de bouchons par exemple. Il est également insuffisant dès que plusieurs voies

sont disponibles : une interaction permettant le changement de voie est alors impérative, et implique une fonction d'accélération $acc(v(x))$ et donc une vitesse maximale $v_{max}(x)$. Il est enfin insuffisant pour observer certains phénomènes comme la formation de files de véhicules. En effet, quand apparaît un véhicule se déplaçant à vitesse très limitée, les autres véhicules qui ne peuvent/veulent pas dépasser fixent leur vitesse sur celui-ci. Chaque véhicule tend toujours à rouler à sa vitesse maximale, mais quand elle n'est pas atteignable, il suit le véhicule qui le précède. Lorsque le véhicule bloquant disparaît, en bifurquant par exemple, le véhicule accélère alors pour atteindre sa vitesse maximale. On introduit donc une variable $v_v(x)$ pour *vitesse visée* qui permet de mettre en place ce dispositif. Ce modèle est acceptable dans certains cas mais reste encore limité.

Quatrième modèle : changement de voies. Si pour une route mono-voie une distance de perception est suffisante, dès que la route comporte plusieurs voies, il faut généraliser cette distance à une surface. Nous choisissons de mettre en place un halo de perception circulaire que l'on découpe en différentes zones : $front(\cdot)$ et $back(\cdot)$ renvoient les véhicules respectivement présents devant et derrière le véhicule (quel que soit sa voie) alors que les primitives $myWay(\cdot)$, $rightWay(\cdot)$ et $leftWay(\cdot)$ permettent de spécifier précisément la voie que l'on surveille (que ce soit devant ou derrière).

Dans un trafic réel, on ne freine pas quand on perçoit un véhicule mais quand on pense être trop près. Si un véhicule bénéficie d'une grande distance de perception, il ne freinera que si sa distance avec le véhicule le précédant devient inférieure à sa distance d'arrêt. À l'opposé, si un véhicule roule à vive allure au regard de ses capacités de freinage et de perception, il ne ralentira que lorsqu'il percevra un autre véhicule, même si la collision est inévitable. Pour cela, nous introduisons la notion de zone critique $secu(x)$ d'un véhicule, représentant la zone requise pour pouvoir freiner suffisamment pour éviter l'accident, qui se calcule comme suit :

$$secu(x) = \min(d_0(v(x)), h_x)$$

L'algorithme 1 décrit le comportement d'un conducteur adapté à un environnement multi-voies. La première partie gère le changement de voie : quand un véhicule en rattrape un autre et que la voie de gauche est libre, il peut se déporter. Selon ce comportement, un véhicule

Algorithm 1: Comportement multi-voies

```

// Tirage aléatoire d'accident
mono-source
1 if  $random < \epsilon$  then
2    $\lfloor \dots$ 
// Changement de voie
3 if  $\exists x' \in myWay(secu(x)) \wedge \nexists x'' \in leftWay(x)$ 
   then
4    $\lfloor$  changement de voie à gauche
5 if  $\nexists x' \in rightWay(x)$  then
6    $\lfloor$  changement de voie à droite
// Vitesse visée
7 if  $\exists x' \in secu(x)$  then
8    $\lfloor v_v(x) \leftarrow 0$ 
9 else
10   $\lfloor$  if  $\exists x' \in myWay(front(x)) \wedge blocked$  then
11     $\lfloor v_v(x) \leftarrow v(x')$ 
12  else
13     $\lfloor v_v(x) \leftarrow v_{max}(x)$ 
14     $\lfloor blocked \leftarrow False$ 
// Gestion du freinage
15 if  $v(x) > v_v(x)$  then
16    $\lfloor v(x) \leftarrow fr(v(x))$ 
17    $\lfloor blocked \leftarrow True$ 
// Gestion de l'accélération
18 if  $v(x) < v_v(x)$  then
19    $\lfloor v(x) \leftarrow acc(v(x))$ 

```

cherche toujours à rouler à sa vitesse maximale si aucun véhicule n'est perçu devant lui ou à la vitesse du véhicule le bloquant sinon. Cet algorithme décrit un comportement de haut niveau basé sur des primitives cognitives (e.g., $front(\cdot)$, $myWay(\cdot)$...). L'implémentation de ces primitives est dérivée du modèle IDM [17]. On note que ce qu'on appelle communément "*le dépassement*" n'est pas une interaction mais la conséquence d'une suite d'interactions provoquant différents changements de voie (se déporter, accélérer...). Nous soutenons que ce modèle est suffisant pour permettre la reproduction de faits stylisés classiques en accidentologie.

2.3 Validation du modèle comportemental

On pourrait souhaiter valider un tel modèle à partir de données réelles, mais les bases de données en accidentologie ne possèdent que très rarement les causes des accidents : on ne sait pas dans le cas général si un accident est survenu à cause d'une inattention ou d'une queue-depoisson. Ces bases contiennent en général les dates, les lieux et le nombre d'accidents, ce qui ne permet pas de valider un modèle comportemental (e.g., base de données de l'Observa-

toire national interministériel de sécurité routière (ONISR)). Notre protocole d'évaluation vise donc à retrouver les faits stylisés classiques à partir de simulations, afin de valider empiriquement le bon fonctionnement du modèle que nous proposons.

En guise de protocole d'évaluation, l'environnement de simulation utilisé est une route de 20km dont le nombre de voies varie entre 1 et 4 selon les simulations. Pour nos expériences, l'apparition des véhicules suit une loi statistique uniforme par voie : un tirage aléatoire est effectué à chaque temps de simulation pour savoir si un nouveau véhicule apparaît sur cette voie (10% de chance d'apparition par unité de temps). Il est important de placer un générateur de véhicules par voie afin de conserver une même densité de trafic afin que la comparaison des résultats soit équitable. Dans nos expériences, nous mettons donc un générateur de véhicules par voie. Nous évaluons le taux de véhicules accidentés sur une fenêtre de temps de 12h.

Écart de vitesse. La différence de vitesse entre véhicules est la principale cause d'accident. En effet, deux voitures roulant à la même vitesse ne rentrent jamais en collision. C'est pourquoi nous étudions dans un premier temps son effet sur le taux d'accidents. Les véhicules sont générés uniformément avec une vitesse maximale comprise entre une borne inférieure donnée et 130km/h. Cette borne inférieure varie de 50km/h à 130km/h par pas de 1km/h entre les différentes simulations. L'accélération est fixée à 5km/h par seconde et le freinage à 5km/h par seconde. La distance de perception couvre une zone de 50 mètres.

La figure 3 montre que plus l'écart de vitesse est important, plus le taux d'accidents est élevé. L'ajout d'une deuxième voie sur la route fait diminuer drastiquement le nombre d'accidents. En effet, en cas de comportement inadéquat (vitesse trop importante au regard des capacités de freinage du véhicule), à densité de trafic égale, un changement de voie peut permettre d'éviter l'accident. En revanche, plus le nombre de voies augmente et plus l'écart avec la situation mono-voie se réduit : même si l'augmentation du nombre de voies permet plus de manœuvre d'évitement, il est également source d'accidents de nature différente. Un véhicule qui change de voie peut très bien ne pas percevoir un autre véhicule circulant sur cette voie en raison de distance de perception trop réduite. Si ce dernier n'a pas de capacité de freinage suffisante,

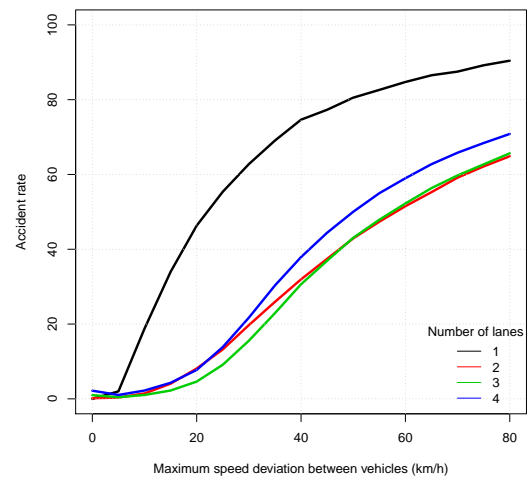


FIGURE 3 – Impact de l'écart de vitesse entre voitures sur le taux d'accidents, en fonction du nombre de voies de la route.

un accident survient : c'est la queue-de-poisson. Ajouter une deuxième voie à une route, fait diminuer le nombre d'accidents puisqu'il devient possible d'éviter les véhicules. À partir de deux voies, plus le nombre de voies disponibles est important, plus les possibilités d'accidents augmentent.

Accélération et décélération. L'objectif ici est de déterminer si les différences de capacité d'accélération et de freinage entre véhicules influent sur le nombre d'accidents qui peuvent survenir. Les véhicules sont générés uniformément avec une vitesse maximale possible comprise entre 50km/h et 130km/h. La distance de perception des véhicules est fixée à 100 mètres². Afin de mesurer l'effet de l'accélération et la décélération, nous avons respectivement lancé deux expériences : durant la première expérience la décélération est fixée à 5km/h par seconde alors que l'accélération varie de 1km/h par seconde à 15km/h par seconde par pas de 1 ; durant la seconde expérience, l'accélération est fixée à 5km/h par seconde alors que la capacité de décélération varie de 1km/h par seconde à 15km/h par seconde par pas de 1.

La figure 4 contient un histogramme bleu montrant l'évolution du taux de véhicules accidentés selon une accélération qui augmente mais une décélération fixe, alors que la courbe rouge

2. La calibration avec un individu réel est difficile. On ne sait pas vraiment à quelle distance un individu perçoit les obstacles : ça dépend de très nombreux paramètres (distance, taille, couleur, mouvements...)

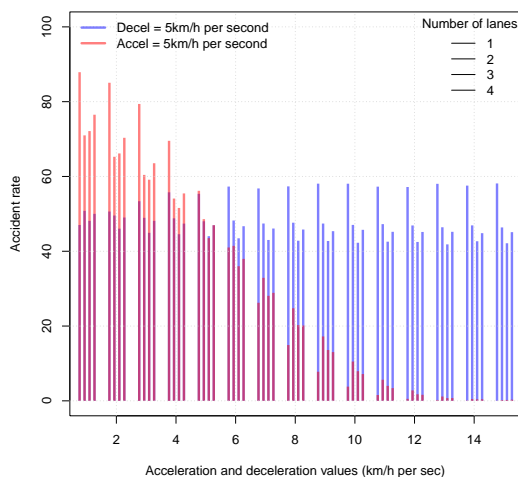


FIGURE 4 – Effet de l'accélération et de la décélération sur le taux d'accidents, en fonction du nombre de voies de la route.

montre l'évolution du taux de véhicules ayant un accident selon une accélération fixe mais une décélération qui varie. On constate que dans le cadre d'une route à une seule voie de circulation, pour un freinage de 8km/h par seconde, le taux d'accident est de 15% et pour une accélération de 8km/h par seconde le taux d'accident approche les 60%.

On constate que l'accélération n'a que peu d'influence (très peu de variations entre la valeur minimale et maximale de la courbe d'accélération) sur le nombre d'accidents. En revanche, la capacité de freinage d'un véhicule est primordiale et limite le nombre d'accidents. Le nombre de voies n'a le même impact que si la capacité de freinage est limitée. Une forte capacité de freinage en mono-voie se traduit par un taux d'accident plus faible car les possibilités d'accidents augmentent avec le nombre de voies. En d'autres termes, si un véhicule peut freiner très fort, l'ajout d'une nouvelle voie ne lui apporte pas grand chose, mais l'expose à de nouvelles possibilités d'accidents avec les changements de voies intempestifs.

Distance de perception. La distance de perception d'un véhicule représente la zone dans laquelle il perçoit de l'information. Les informations ainsi récupérées modifient les actions du véhicule selon son comportement : par exemple ralentir ou se déporter sur une autre voie à l'approche trop brusque d'un autre véhicule. Des véhicules dotés d'une distance de perception

réduite causeront logiquement beaucoup plus d'accidents que des véhicules dotés d'une distance de perception plus grande, leur permettant d'obtenir de l'information "plus tôt". Le but de cette expérience est donc d'illustrer l'influence de cette distance de perception sur le nombre d'accidents. Les véhicules sont générés uniformément avec une vitesse maximale possible comprise entre 50km/h et 130km/h . L'accélération est fixée à 5km/h par seconde et la décélération à 5km/h par seconde. La distance de perception varie de 0 à 200 mètres par pas de 5 mètres.

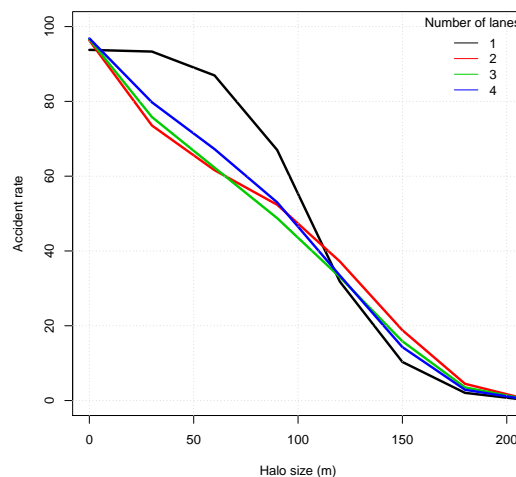


FIGURE 5 – Effet de la distance de perception sur le taux d'accidents, en fonction du nombre de voies.

La figure 5 montre que l'accroissement de la distance de perception réduit le taux d'accidents. L'augmentation du nombre de voies n'a un réel impact que lorsque la distance de perception est faible. Il n'y a plus de différence notable dès que la distance de perception atteint 125 mètres.

Dans cette section, nous avons étudié l'influence des différents paramètres de notre modèle sur le taux d'accidents générés comme l'écart de vitesse entre véhicule, l'accélération et la capacité de freinage ou la distance de perception des véhicules. L'ensemble des résultats obtenus montre que notre modèle permet la reproductibilité des phénomènes attendus, ce qui concourt à sa validation.

3 Comportement enrichi

Le comportement détaillé précédemment n'est pas suffisant pour observer tous les phénomènes que l'on pourrait imaginer. L'objectif de cette section n'est pas de fournir une liste exhaustive des paramètres qui pourraient être implémentés, mais de donner quelques exemples pour montrer comment généraliser le modèle initial et ajouter de nouveaux critères comportementaux que d'aucuns considèreraient comme naturel d'inclure.

L'un des phénomènes que l'on peut souhaiter étudier concerne la conservation des distances de sécurité. Certains conducteurs s'approchent fortement du véhicule les précédant, alors que d'autres laissent un espace conséquent. Un phénomène comportemental d'*impatience*, jouant donc sur le respect des distances de sécurité, a certainement un impact important sur le taux d'accidents. Un autre phénomène concerne l'*attention* plus ou moins accrue des conducteurs. On peut considérer par exemple que l'attention s'appuie sur le fait qu'un conducteur ne perçoit pas un changement dans l'environnement qu'il est sensé percevoir. Jusqu'à présent, les accidents disparaissent sitôt qu'ils surviennent mais on peut souhaiter étudier les phénomènes de sur-accidents qui dépendent du temps de *persistence* des accidents.

3.1 Impatience

Pour implémenter ce phénomène d'impatience, nous proposons d'introduire un facteur d'impatience, afin de simuler un conducteur qui ne respecterait pas les distances de sécurité $secu(x)$ entre les voitures. Ce phénomène facilement observé sur les routes influe directement sur le nombre d'accidents. Un facteur d'impatience de 1 représente un conducteur qui conserve rigoureusement ses distances de sécurité. Si un véhicule en changeant de voies rentre dans sa zone de sécurité, il ralentira tout de suite. À l'inverse, un facteur d'impatience élevé représentera un conducteur qui "*met la pression*" à tout véhicule le précédant en ne conservant qu'une partie de la distance de sécurité normalement attendue. Ce facteur noté imp intervient de ce fait dans le calcul de la taille de la zone critique $secu(x)$, mais n'a pas d'impact direct sur le modèle de comportement.

$$secu(x) = \frac{1}{imp} \times \min(d_0(v(x)), h_x)$$

Les conditions expérimentales sont les mêmes que précédemment (route de 20km, de 1 à 4 voies, 10% de chance d'apparition d'un nouveau véhicule par voie). Le halo de perception couvre une zone de 100 mètres, puis de 250 mètres. Dans ces expériences, nous faisons varier le facteur d'impatience entre 1 et 10 par pas de 0.5.

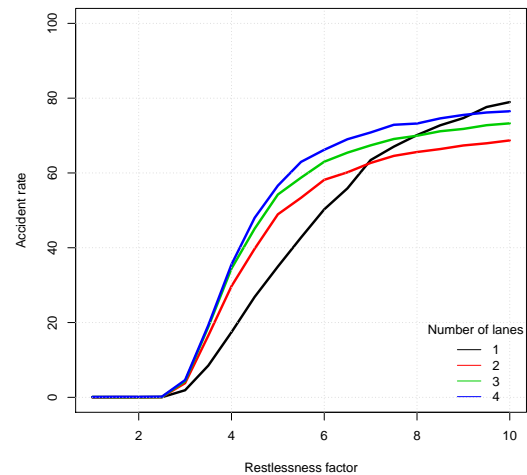


FIGURE 6 – Effet du facteur d'impatience sur la quantité d'accidents, en fonction du nombre de voies, avec un halo de 250 mètres.

La figure 6 montre qu'avec un facteur d'impatience inférieur à 2, il n'y a pas d'accident. En effet, par rapport à la vitesse des véhicules, la distance de perception est suffisamment importante et permet d'éviter les accidents tant que l'impatience reste faible. Au delà de 2, plus le facteur d'impatience augmente, plus le nombre d'accidents augmente. On observe aussi que plus le nombre de voies augmente, plus le taux d'accident augmente. Ce phénomène s'explique par l'augmentation du nombre de véhicules liée à l'augmentation du nombre de voies (afin de conserver une densité comparable), ce qui mène à l'accroissement du nombre de changements de voies intempestifs. La pente de la courbe correspondant à la situation de la route à une seule voie est clairement différente et met en lumière les accidents qui surviennent uniquement dus au problème de gestion de la distance de sécurité. Dans une telle situation, la distance de sécurité qu'un véhicule laisse ne peut être amputée à cause d'un autre qui s'y placerait brusquement.

3.2 Inattention

Pour implémenter le phénomène d'inattention, nous proposons d'introduire un facteur d'inattention, représentant la concentration du conducteur, dans notre cas, la prise en compte des informations du halo. À 0%, un conducteur sera parfaitement concentré et prendra en compte toutes les informations disponibles. Un taux d'attention de 50% représente un conducteur qui rate une fois sur deux l'information par inattention. Il lui faudra en moyenne deux fois plus de temps qu'un conducteur concentré pour percevoir son environnement correctement et prendre des décisions en conséquence.

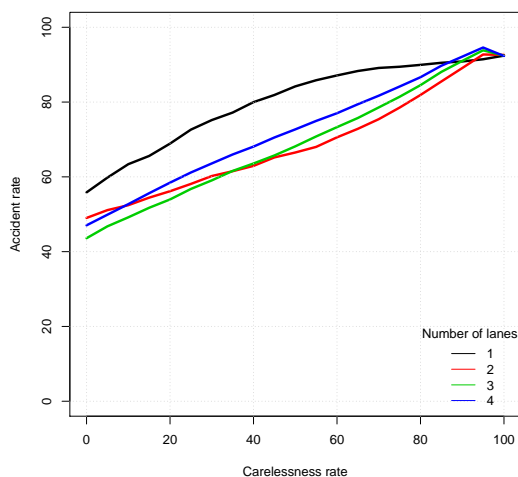


FIGURE 7 – Effet du facteur d'inattention sur le nombre d'accidents, en fonction du nombre de voies.

D'un point de vue implémentation, cela revient à rajouter à l'algorithme 1 un test de prise en compte :

```
If (random() > inattention)
then Algo 1 else continue.
```

Nous utilisons les mêmes conditions expérimentales que celles décrites Section 3.1. Dans nos expériences, le facteur d'inattention varie entre 0% et 100% par pas de 5%. On constate Figure 7 que l'effet de l'inattention sur le nombre d'accidents est presque linéaire. À 0% d'inattention, donc attention parfaite des conducteurs, le taux d'accidents de 58%. À 100% d'inattention, le taux d'accidents arrive à 90%³. Le phénomène attendu (plus d'inattention implique plus

3. La densité de véhicules et la durée du trajet étudiée ne sont pas suffisantes pour arriver à un taux de 100% d'accidents

d'accidents) est bien obtenu, ce qui confirme le bon fonctionnement du modèle.

3.3 Persistance des accidents

Pour étudier les phénomènes de sur-accident et leur impact sur le taux d'accidents, nous introduisons un temps de persistance des accidents. Les mêmes conditions expérimentales que celles décrites Section 3.1 sont utilisées. Le temps de persistance varie de 0 à 60 minutes par pas de 5 minutes.

On constate Figure 8 que l'effet de la persistance est presque linéaire. Plus un accident persiste, plus il y a de risque de sur-accidents. L'élargissement de la route à deux voies fait radicalement diminuer le taux d'accidents, alors que l'ajout de chaque voie supplémentaire implique l'augmentation du nombre d'accidents. Chaque nouvelle voie offre des possibilités de déport aux véhicules circulant sur la voie sur laquelle survient l'accident, mais qui sont également liés à des risques d'accidents de changements de voie intempestifs, créant eux-mêmes d'autres accidents. Ces observations concourent à la validation du modèle.

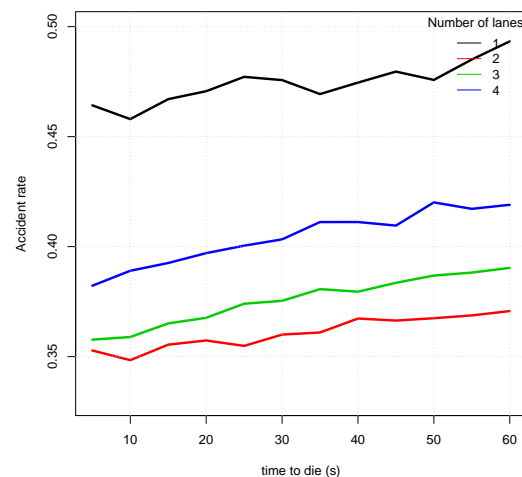


FIGURE 8 – Effet de la persistance des accidents sur le taux d'accidents, selon le nombre de voies de la route.

Dans cette section, nous avons montré que l'enrichissement du comportement décrit dans l'algorithme 1 peut se faire très facilement, avec très peu de modifications. Bien évidemment, cela amène à de nouveaux paramètres qui complexifient l'évaluation. Plus il y aura de paramètres, plus il sera difficile d'identifier celui ou

ceux parmi eux qui sont la cause du phénomène observé. La complexification d'un modèle est une course sans fin qui n'est limitée que par la granularité de la simulation.

4 Conclusion

Avec l'avènement du véhicule autonome et suite aux normes de sécurité qui s'imposent à lui, le test *in silico* du véhicule autonome est devenu un complément impératif du test *in vivo*. C'est la technique utilisée à l'heure actuelle par les grandes entreprises du domaine comme *Waymo* ou *Tesla*. Pour mener à bien ces tests les simulateurs doivent permettre de mettre le véhicule en situation de stress afin de tester ses réactions. De nombreux générateurs de trafic existent d'ores et déjà, mais il semble que peu d'entre eux se soient intéressés au réalisme du modèle comportemental des véhicules. Ces systèmes se basent sur des scripts qui ne permettent au véhicule testé que de faire face à un nombre de situations prévues à l'avance. Notre objectif consiste à améliorer le test du véhicule autonome par la génération d'accidents dans les simulateurs de trafic, ce que nous faisons ici grâce à l'approche multi-agents et ses modèles comportementaux paramétriques qui offrent une expressivité remarquable pour y parvenir. Notamment, nous soutenons ici que la capacité à générer des accidents entre véhicules artificiels est un impératif pour ces simulateurs, permettant de créer dans l'environnement des accidents que l'on ne peut pas prévoir. Nous proposons dans cet article un modèle permettant d'exprimer des comportements réalistes et paramétrables qui collectivement constituent un système complexe source d'accidents. Nous montrons que ce modèle est nécessaire et permet d'exhiber les faits stylisés classiquement reconnus en conduite et en accidentologie. Après avoir décrit précisément le modèle, nous montrons le résultat des différentes expériences que nous avons réalisées et décrivons comment les différents phénomènes couramment rencontrés en situation réelle, comme les queues de poissons, les dépassements intempestifs, les créations de files ou les véhicules qui suivent de trop près sont identifiables dans ces expériences.

Références

- [1] Alexandre Bonhomme, Philippe Mathieu, and Sébastien Picault. A versatile multi-agent traffic simulator framework based on real data. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 25(1) :20, 2016.
- [2] A. Champion, R. Mandiau, C. Kolski, A. Heidet, and A. Kemeny. Traffic generation with the SCANer™ simulator : towards a multi-agent architecture. In *DSC*, pages 311–324, 1999.
- [3] S. Chen and F. Chen. Simulation-based assessment of vehicle safety behavior under hazardous driving conditions. *Journal of Transportation Engineering*, 136(4) :304–315, 2010.
- [4] Martin Fellendorf. Vissim : A microscopic simulation tool to evaluate actuated signal control including bus priority. In *64th Institute of Transportation Engineers Annual Meeting*, pages 1–9. Springer, 1994.
- [5] G.Picard, F.Balbo, and O.Boissier. Approches multi-agents pour l'allocation de courses à une flotte de taxis autonomes. In *25es JFSMA*, Caen, France, July 2017.
- [6] K. Hojjati-Emami, B.S. Dhillon, and K. Jenab. Reliability prediction for the vehicles equipped with advanced driver assistance systems (adas) and passive safety systems (pss). 3(5) :731–742, 10 2012.
- [7] N. Kalra and S.M. Paddock. *Driving to safety*, 2016.
- [8] Arne Kesting, Martin Treiber, and Dirk Helbing. General lane-changing model mobil for car-following models. *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board*, (1999) :86–94, 2007.
- [9] S. Khastgir, S. Birrell, G. Dhadyalla, and P. Jennings. Development of a drive-in driver-in-the-loop fully immersive driving simulator for virtual validation of automotive systems. In *IEEE VTC 2015*, pages 1–4, 2015.
- [10] R. Kianfar, P. Falcone, and J. Fredriksson. Safety verification of automated driving systems. 5 :73–86, 12 2013.
- [11] D. Krajzewicz, J. Erdmann, M. Behrisch, and L. Bieker. Recent development and applications of SUMO - Simulation of Urban MObility. *Int. J. on Advances in Systems and Measurements*, 5(3–4) :128–138, December 2012.
- [12] W.B. Nelson and N.J. Hoboken. *Accelerated Testing : Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*. 2009.
- [13] California Department of Motor Vehicles. Express terms, 2016. Division 1, chapter 1, article 3.7-Autonomous Vehicles.
- [14] S. Olivares, N. Rebernik, A. Eichberger, and E. Stadlober. *Virtual Stochastic Testing of Advanced Driver Assistance Systems*, pages 25–35. 2016.
- [15] M. Sivak and B. Schoettle. Should we require licensing tests and graduated licensing for self-driving vehicles ?, October 2015.
- [16] M. Tlig, O. Buffet, and O. Simonin. Cooperative behaviors for the self-regulation of autonomous vehicles in space sharing conflicts. In *IEEE 24th IC-TAI*, pages 1126–1132. IEEE, 2012.

- [17] Martin Treiber, Ansgar Hennecke, and Dirk Helbing. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical review E*, 62(2) :1805, 2000.
- [18] Martin Treiber and Arne Kesting. An open-source microscopic traffic simulator. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2(3) :6–13, 2010.
- [19] Martin Treiber, Arne Kesting, and Dirk Helbing. Delays, inaccuracies and anticipation in microscopic traffic models. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 360(1) :71–88, 2006.