Les boucles d'hystérésis comme outil d'analyse des comportements de conducteurs

Lancelot Six, Sio Song Ieng, Julien Saunier, Zahia Guessoum

▶ **To cite this version:**

Lancelot Six, Sio Song Ieng, Julien Saunier, Zahia Guessoum. Les boucles d'hystérésis comme outil d'analyse des comportements de conducteurs. Journées Francophones sur les systèmes multi-agents, Oct 2012, Honfleur, France. pp.181–190. hal-00749726

HAL Id: hal-00749726
https://hal.science/hal-00749726

Submitted on 23 Nov 2012

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.

Les boucles d'hystérésis comme outil d'analyse des comportements de conducteurs

L. Six[ab] lancelot.six@ifsttar.fr
S. Ieng[a] sio-song.ieng@ifsttar.fr
J. Saunier[a] julien.saunier@ifsttar.fr
Z. Guessoum[b] zahia.guessoum@lip6.fr

[a] IFSTTAR, 58 boulevard Lefebvre, 75 015 Paris

[b] Laboratoire d'Informatique de Paris 6 (Lip6), 4 place Jussieu, 75 005 Paris

Résumé

L'approche multi-agents se montre particulièrement intéressante pour modéliser, simuler et comprendre les systèmes particulaires. Elle permet, via la modélisation d'entités individuelles, d'étudier leurs interactions ainsi que les phénomènes macroscopiques émergents qui en résultent. Cela pose alors deux difficultés en terme d'analyse. La première est de caractériser le comportement d'un agent au sein d'une simulation, quelle que soit sa formalisation, pour pouvoir mener des études comparatives ; et la seconde est d'étudier la façon dont ce comportement peut influencer, voire générer, un phénomène macroscopique. Pour cela, nous proposons d'étudier le phénomène d'hystérésis apparaissant dans le comportement des agents, lesquels sont considérés comme des boîtes noires. L'observation de l'hystérésis permet de caractériser la réaction d'un système à des stimulis perturbateurs. Nous étudions comment cette perturbation se propage dans une population et aboutit à l'apparition de propriétés macroscopiques remarquables. L'étude est menée en comparant différents modèles d'agents conducteurs utilisés à des fins de simulation du trafic routier.

Mots-clés : *Trafic, Hystérésis, Simulation, Comportement de conducteur, Agent*

Abstract

Multi-agent systems are useful to model particular systems. Modeling individual entities allows to study their interactions and the resulting emergent phenomenon at macroscopic level. Two questions are raised : How do we characterize individual behavior of agents to compare them together, and how can individual behavior influence the emergence of macroscopic phenomenon. We propose to study the hysteresis phenomenon in the behavior of individual agents when a perturbation is applied. We study how this perturbation propagates along a population of agents and how it can lead to the emergence of significant macroscopic properties. This study is conducted on various driver models used to simulate traffic flow.

Keywords: *Traffic, Hysteresis, Simulation, Driver behavior, Agent*

1 Introduction

La communauté scientifique a étudié depuis les années cinquante les phénomènes du trafic routier [12]. Pour ce faire, deux grandes approches ont été utilisées : 1) l'approche macroscopique visant à étudier l'évolution spatio-temporelle de variables associées au flux de véhicules telles que la densité ou le débit et 2) l'approche microscopique s'intéressant aux variables propres à chaque véhicule telles que la position ou la vitesse. L'hypothèse des modèles microscopiques est que des comportements individuels cohérents font émerger un trafic cohérent.

Cette vision est très proche de celle portée par les systèmes multi-agents, c'est pourquoi leur utilisation est pertinente et a permis d'enrichir le corpus de modèles disponibles pour la simulation de trafic [5, 7, 14, 15, 17]. Cependant, la différence de formalisation entre les modèles « classiques » — à base d'équations — et les modèles à base d'agents, faisant intervenir des concepts de plus haut niveau, rend difficile la compréhension et la comparaison de l'ensemble des modèles disponibles. Bien que tous ces modèles aient vocation à représenter le même phénomène, classifier les comportements et identifier le modèle le plus adéquat pour l'étude d'une situation donnée n'est donc pas chose aisée. De plus, les outils d'analyse utilisés pour étudier les modèles d'une famille (étude de stabilité pour les modèles à base d'équation par exemple) ne sont pas ré-utilisables pour étudier les modèles d'une autre famille. La co-existence de ces deux types de modélisation a été pointée dans la littérature des systèmes multi-agents [18].

La difficulté posée est de savoir comment comparer des comportements d'entités ou d'agents sans avoir à se référer à l'expression du modèle sous-jacent, comment capter leur essence en s'abstrayant des théories sur lesquelles ils sont conçus.

Pour palier ce problème, nous proposons de nous baser sur l'étude du phénomène d'hystérésis apparaissant dans le comportement d'agents soumis à différentes contraintes. Nous utilisons d'une part des modèles à base d'équations et d'autre part un modèle à base d'agents et montrons comment l'étude du phénomène d'hystérésis permet de mettre en avant certaines propriétés fondamentales de ces modèles.

La partie 2 présente le phénomène d'hystérésis et comment nous adaptons son étude au cas d'agents conducteurs. La partie 3 présente les modèles que nous étudions ainsi que les différents scénarios mis en place, et enfin la partie 4 montre comment nous utilisons les boucles d'hystérésis et ce qu'elles nous permettent de déduire des modèles étudiés.

2 Le phénomène d'hystérésis

L'hystérésis, du grec *hysteros* signifiant « le retard », peut être définie en première approximation comme étant le retard de l'effet sur la cause. Cette notion a été introduite par le physicien James Alfred Ewing pour décrire le retard de magnétisation de métaux ferromagnétiques. Si nous considérons un système quelconque $\mathcal{S}$ soumis à un effet extérieur $\mathcal{E}$ et dont nous pouvons observer une propriété conséquence $\mathcal{C}$, nous parlerons de phénomène d'hystérésis si la valeur $\mathcal{C} = f(\mathcal{E})$ n'est pas la même selon que l'effet soit croissant ou décroissant. Ce phénomène provient d'une non linéarité de la relation entre l'effet et la cause et peut de manière générale être observé dans tout système non markovien (c'est-à-dire exhibant un effet mémoire ou de *path-dependence*).

L'hystérésis peut naturellement être observée dans beaucoup de SMA à un niveau macroscopique. Elle rend compte à la fois de l'histoire du système et de son adaptation à une perturbation qui peut être l'ajout de ressources, l'insertion de nouveaux agents... Elle est d'ailleurs étudiée dans de nombreux champs disciplinaires, allant de l'économie [10] à la sociologie [3] en passant par la gestion du trafic routier [19], pour lesquels les SMA fournissent des outils de simulation. Il est important de vérifier que ces outils de simulation permettent l'émergence des phénomènes de mémoire systémiques. En particulier, il est intéressant d'étudier comment les comportements individuels peuvent influencer voire générer cette émergence. Cette adaptation, ou effet mémoire du système, peut provenir d'un grand nombre de phénomènes sous-jacents tels que par exemple l'apparition d'hystérésis dans les comportements individuels des agents.

Dans le cas de notre étude, nous nous focalisons donc sur l'étude de l'apparition de phénomènes d'hystérésis dans les comportements des conducteurs étudiés, ainsi que sur les conséquences de ces phénomènes sur l'émergence de propriétés macroscopiques. Nous choisissons d'étudier le retard apparaissant entre une contrainte appliquée à des agents et la réaction de ces derniers. La contrainte qui leur est appliquée, et qui est susceptible de varier, est le véhicule qui les précède. Il force les conducteurs à réguler leur vitesse pour évoluer sur l'infrastructure routière en toute sécurité. La contrainte peut donc être associée à l'espace libre entre l'avant du véhicule étudié et l'arrière du véhicule le précédant. Cette grandeur, que nous appellerons le gap est notée Δx. La grandeur conséquence retenue pour qualifier l'adaptation de l'agent est sa vitesse, notée $\dot{x}$.

L'étude du comportement des conducteurs pourrait être faite via une analyse précise des trajectoires de ces derniers. Cette étude permettrait de faire apparaître l'ensemble des éléments observables du comportement, mais certaines limites existent. La comparaison de deux comportements observés dans des situations analogues est délicate étant donné qu'ils se produisent à des positions distinctes dans l'espace et le temps. L'étude des boucles d'hystérésis ne faisant pas apparaître ces grandeurs, il devient aisé de comparer deux comportements, comme nous le montrerons dans la suite de cet article.

Dans la littérature du trafic, Bando [2] a remarqué que dans certaines conditions, le tracé de $\dot{x} = f(\Delta x)$ fait apparaître une boucle d'hystérésis. Ce constat a été repris par plusieurs autres auteurs [1, 6, 11, 13] qui ont évalué l'impact des différents paramètres du modèle sur la taille de cette boucle.

En plus de l'étude de la boucle seule, nous y associons l'étude des états d'équilibres. Un état $(\Delta x, \dot{x})$ est dit d'équilibre si un agent soumis à une contrainte Δx constante ne modifie pas (ou plus) sa vitesse $\dot{x}$. Une connaissance de l'ensemble des états d'équilibre permet de détermi-

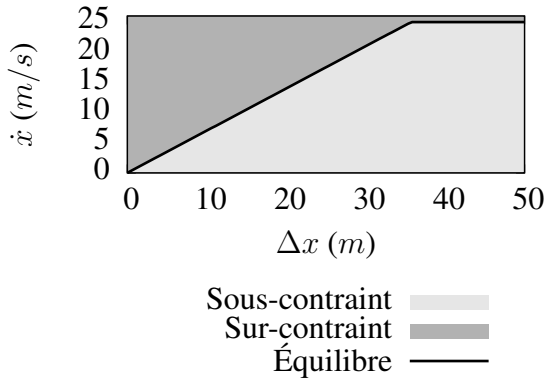


FIGURE 1 – Zones dans lesquelles un agent est considéré comme étant sur-contraint ou sous-contraint

ner comment le phénomène observé évolue par rapport à celui-ci.

En particulier, nous pourrons considérer un agent comme étant *sur-contraint* quand ce dernier est soumis à une contrainte trop grande (i.e. au dessus d'un état d'équilibre) et *sous-contraint* quand il est soumis à une contrainte faible (i.e. au dessous de l'équilibre). Cette interprétation graphique est illustrée par la figure 1.

3 Protocole d'étude

3.1 Les modèles sélectionnés

Pour cette étude, nous avons choisi trois modèles du comportement d'un conducteur. Ces modèles ne s'intéressent qu'à l'aspect longitudinal de la conduite et ne prennent pas en compte les changements de voie. Nous présentons ici les principales propriétés de ces modèles et déterminons analytiquement les états d'équilibre qui leurs correspondent.

Le premier est un modèle formalisé à l'aide d'une équation différentielle simple. Le second est également formulé à l'aide d'une équation mais fait intervenir explicitement des grandeurs physiques similaires à celles utilisées par des conducteurs réels dans leur prise de décision. Enfin le troisième modèle est un modèle agent faisant intervenir des concepts de haut niveau. Chacun de ces modèles peuvent servir pour réaliser la prise de décision d'agents localisés simples.

Optimal Velocity. Le premier modèle que nous avons retenu est Optimal Velocity (OV)[2]. Il est fondé sur le principe qu'à un gap correspond une vitesse optimale et que toute déviation de cet optimal entraîne une accélération proportionnelle à cet écart. Le modèle est décrit par l'équation suivante :

$$\ddot{x}_n = a_n \left(V\left(\Delta x_n\right) - \dot{x}_n \right)$$

où $V\left(\Delta x_n\right)$ est la fonction donnant la vitesse optimale à adopter pour le gap courant. Afin de pouvoir comparer ce modèle avec d'autres, nous utilisons une version modifiée de la fonction V fournie par l'auteur, dans laquelle nous ajoutons un paramètre v_0^n permettant de spécifier la vitesse désirée tout en gardant les propriétés principales de la fonction initiale :

$$V\left(\Delta x_n\right) = \frac{v_0^n \left(tanh\left(\frac{2\Delta x_n}{v_0^n} - 2 \right) + tanh\left(2\right) \right)}{2}$$

Pour OV, un état d'équilibre est atteint quand l'accélération à un pas de temps est nulle, donc quand $OV\left(\dot{x}_n, \Delta x_n\right) = 0$. Cette propriété est atteinte lorsque

$$\dot{x}_n\left(\Delta x_n\right) = \frac{v_0^n \left(tanh\left(\frac{2\Delta x_n}{v_0^n} - 2 \right) + tanh\left(2\right) \right)}{2}$$

Intelligent driver model. Le modèle « Intelligent Driver Model » (IDM) [16] est construit comme l'agrégation de deux sous-comportements concurrents : le premier fait accélérer le véhicule jusqu'à ce qu'il atteigne sa vitesse désirée tandis que le second le fait ralentir pour maintenir une distance de sécurité acceptable. L'équation suivante décrit le modèle :

$$\ddot{x}_n = a_n \left[1 - \left(\frac{\dot{x}_n}{v_0^n} \right)^{\delta} - \left(\frac{s_n^*\left(\dot{x}_n, \Delta v_n\right)}{\Delta x_n} \right)^2 \right] \quad (1)$$

où a_n est l'accélération maximale du véhicule n, v_0^n sa vitesse désirée, δ l'exposant d'accélération et $\Delta v_n = \dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}$ la vitesse de rapprochement du véhicule leader. s^* est une fonction donnant le gap à maintenir pour le couple (vitesse, vitesse d'approche) donné :

$$s^*\left(\dot{x}_n, \Delta v_n\right) = s_0^n + s_1^n \sqrt{\frac{\dot{x}_n}{v_0^n}} + T_n \dot{x}_n + \frac{\dot{x}_n \Delta v_n}{2\sqrt{a_n b_n}}$$

où T_n représente le temps de réaction du conducteur, b_n la plus grande décélération confortable pour le conducteur, s_0^n et s_1^n sont les distances inter-véhiculaires en situation congestionnée.

L'équation 1 est bien construite autour de deux sous-comportements : $a_n\left(1-\left(\dot{x}_n/v_0^n\right)^\delta\right)$ correspond à la situation où le véhicule accélère pour atteindre sa vitesse désirée, et $-a\left(s^*\left(\dot{x}_n,\Delta v_n\right)/\Delta x_n\right)^2$ génère un comportement freinant pour respecter une distance de sécurité.

Pour déterminer l'équilibre de ce modèle, nous devons faire l'hypothèse que $\Delta v_n = 0$. En effet, si cette valeur est non nulle, la contrainte appliquée Δx à l'agent est en cours de variation. Nous obtenons que les états d'équilibre sont décrits par l'équation suivante :

$$\Delta x_n\left(\dot{x}_n\right) = \frac{s_0^n + s_1^n\sqrt{\frac{\dot{x}_n}{v_0^n}} + T_n\dot{x}_n}{\sqrt{1-\left(\frac{\dot{x}_n}{v_0^n}\right)^\delta}} \qquad (2)$$

Archisim. Le dernier modèle que nous avons retenu est le modèle Archisim [9]. Il s'agit d'un modèle d'agent réalisé à partir de l'expertise de psychologues de la conduite. Contrairement aux deux modèles présentés ci-dessus, un agent Archisim perçoit et intègre l'état de l'ensemble du trafic avoisinant et des véhicules le composant.

A chaque pas de simulation, un agent reçoit la liste de ses accointances (agents et objets routiers géographiquement proches). De cette liste, l'agent engendrant la contrainte la plus importante est identifié (i.e. qui entraîne la décélération la plus importante), et cette contrainte est classifiée comme étant temporaire ou durable [8]. Une contrainte temporaire est une contrainte dont l'agent qualifie la persistance dans le temps faible et qui réduira sans qu'aucune action particulière ne doive être entreprise. Enfin, à chaque type de contrainte est associée une stratégie de gestion.

La stratégie associée à une contrainte courte consiste à maintenir un petit temps inter véhiculaire — temps nécessaire pour que l'avant de l'agent courant atteigne la position de l'arrière de l'agent qui le précède — jusqu'à ce que la contrainte ait disparu ou qu'elle soit devenue une contrainte longue. Le temps inter véhiculaire est donné par le paramètre S_{bbt}. Nous pouvons déduire le gap visé par l'agent donné par : $\Delta x_{min} = S_{bbt} * \dot{x}_n$. Si la stratégie correspond à une contrainte de long terme, le temps inter véhiculaire retenu est donné par

$$E_{bbt} = \alpha_n S_{bbt} + 1\left(1-\alpha_n\right)L_{bbt}$$

où α_n et L_{bbt} sont des paramètres du modèle.

L'équilibre pour le modèle Archisim n'est atteint que lorsque l'agent a atteint l'objectif d'une stratégie de suivi à long terme. La stratégie de suivi d'une contrainte temporaire n'étant par définition pas stable dans le temps. Nous pouvons donc écrire que l'équilibre du modèle Archisim comme suit :

$$\dot{x}_n\left(\Delta x_n\right) = Min\left(\frac{\Delta x_n}{\alpha_n S_{bbt} + \left(1-\alpha_n\right)L_{bbt}}, v_0^n\right) \qquad (3)$$

3.2 Simulations

Afin d'étudier et de comparer les modèles d'agents conducteurs, nous les mettons chacun en jeu dans une même plateforme de simulation et les exposons aux mêmes contraintes. Nous avons retenu la plateforme de simulation Archisim [1] car elle permet de :

- implémenter chacun des modèles que nous désirons étudier,
- enregistrer une trace précise du déroulement de la simulation incluant la trajectoire des agents. Cette trace peut ensuite être utilisée afin de construire et étudier la boucle d'hystérésis de chaque agent,
- définir des scénarios répétables dans lesquels le comportement de certains agents sont préprogrammés pour appliquer une contrainte sur les agents suiveurs. Ainsi l'ensemble des modèles étudiés le sont dans les mêmes conditions.

La plateforme est utilisée pour mettre en jeu les trois scénarios suivant :

Étude de la réaction d'un agent. Le premier scénario que nous étudions ne fait entrer en jeu que deux agents : un leader et un suiveur. Le leader opère durant la simulation des variations de vitesse d'une intensité de $3m.s^{-2}$, faisant passer sa vitesse de $4m.s^{-1}$ à $22m.s^{-1}$ et vice et versa. Ces variations sont assimilées à des perturbations que le modélisateur impose aux agents en

1. Le terme Archisim désigne à la fois le modèle d'agent développé par [9] et la plateforme de simulation le mettant en jeu. Dans la suite de l'article, la dénomination Archisim se réfère au modèle d'agent.

cours d'étude. Chaque changement de vitesse survient toutes les deux minutes afin de s'assurer que le suiveur puisse rejoindre un point d'équilibre avant qu'une nouvelle perturbation n'apparaisse.

Propagation d'une perturbation dans un peloton. Le second scénario met en jeu 30 agents conducteurs formant un peloton. L'agent leader du peloton est le même que celui utilisé dans le scénario précédent, son comportement est inchangé et tous les suiveurs utilisent le même modèle. L'objectif de cette simulation est de pouvoir étudier la propagation de la perturbation imposée par l'agent leader le long du peloton.

Cas de l'insertion. Enfin, le troisième scénario étudié met en jeu un peloton d'agents évoluant sur une infrastructure de type autoroute. Un agent utilise une voie d'insertion et s'insère à faible vitesse devant le peloton étudié. L'objectif de cette simulation est de confronter les résultats issus des deux scénarios précédents et d'évaluer leur pertinence sur un cas pratique d'étude.

Pour chacune de ces simulations, tous les agents sont dotés du même jeu de paramètres. La vitesse désirée a la même valeur quel que soit le modèle étudié, et les paramètres spécifiques à chaque modèle sont mis aux valeurs proposées par les auteurs originaux.

4 Résultats

Nous présentons maintenant les boucles observées pour les agents mis en situations dans les scénarios décrits précédemment.

4.1 Anticipation et retard

Le premier scénario ne met en jeu qu'un seul agent suiveur et vise à étudier ses capacités d'adaptation lorsque la contrainte qui lui est appliquée varie.

La figure 2 représente l'adaptation d'un agent OV lorsque le leader effectue des changements de vitesse entre $4m/s$ et $22m/s$. Le tracé de la boucle obtenu est très proche des phénomènes d'hystérésis « classiques ». Nous pouvons observer que durant la phase d'accélération du leader (relaxation de la contrainte), le tracé de la boucle d'hystérésis de l'agent suiveur se trouve en dessous de la ligne d'équilibre. L'agent se trouve donc dans une situation où la contrainte qui lui est appliquée est plus faible

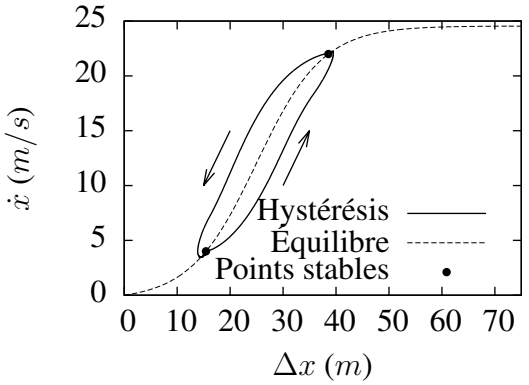


FIGURE 2 – Hystérésis pour le modèle OV

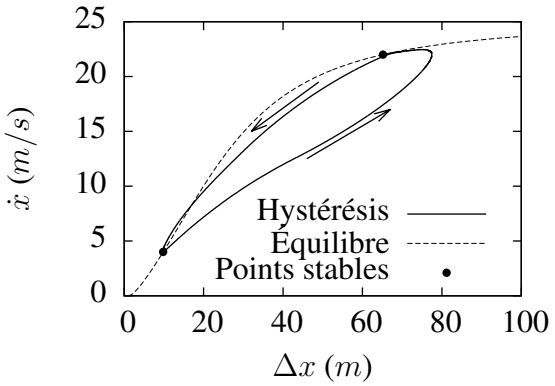


FIGURE 3 – Hystérésis pour le modèle IDM

que ce qu'il pourrait accepter, le laissant ainsi libre d'accélérer tout en restant en sécurité. La situation est tout à fait analogue lors de la décélération et l'agent ne décélère que lorsqu'il est sur-contraint. Il doit alors ralentir pour faire baisser la contrainte et revenir à une situation acceptable.

De manière générale, nous pouvons voir que l'agent ne réagit, dans un sens ou dans un autre, qu'après avoir subi un changement de contrainte. Il s'agit d'une forme de retard de sa réaction comparée à la variation de contrainte qu'il subit. Cette propriété est en adéquation avec la description purement réactive du modèle que nous avons faite dans la section 3.1 où une accélération n'apparaît qu'en réaction à un déséquilibre.

La figure 3 présente la réaction d'un agent IDM soumis à la même variation de contrainte que l'agent précédent. Tout comme pour la figure précédente, nous pouvons observer une forme de boucle. Cependant, une distinction est à faire : la grande majorité du tracé de la boucle d'hystérésis se trouve sous le tracé de la courbe

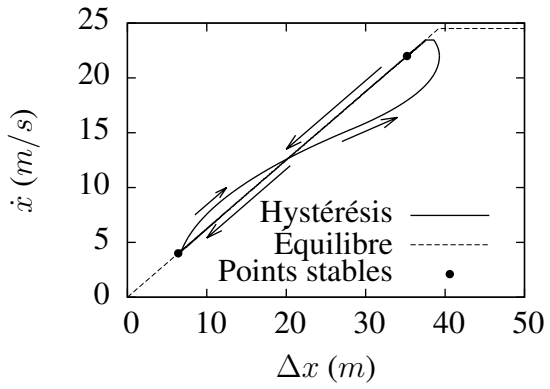


FIGURE 4 – Hystérésis pour le modèle Archisim

d'équilibre. De plus, lorsque la variation de la contrainte cesse (quand le leader atteint une vitesse de 4 ou $22m/s$), nous pouvons observer que l'agent suiveur regagne une position d'équilibre.

La partie inférieure de la boucle correspond à la phase de relaxation de la contrainte. Elle a des propriétés similaires à celle que nous avons pu observer pour OV dans le sens où nous observons un retard de la réaction par rapport au stimulus. Au contraire, dans la partie supérieure de la boucle (correspondant à la phase d'augmentation de la contrainte), l'agent parvient à se maintenir sous l'état d'équilibre. Il maintient une vitesse réduite par rapport à l'équilibre en anticipation de l'augmentation de la contrainte. Nous pouvons dire que l'agent est en mesure d'anticiper l'évolution à venir de la contrainte qui lui est appliquée durant la phase de décélération.

L'étude de la boucle d'hystérésis nous montre clairement deux comportements distincts selon que l'agent est dans une phase d'augmentation de la contrainte, ou au contraire de réduction de celle-ci. Cette observation est bien cohérente avec l'expression du modèle que nous avons faite dans l'équation 1 qui est composée de deux sous-comportements : un qui accélère, et un qui maintient une distance de sécurité.

La figure 4 montre la boucle d'hystérésis pour un agent Archisim. Cette boucle a une forme singulière en "8", très différente des boucles d'hystérésis usuelles. Tout d'abord, nous remarquons que l'une des moitiés de la boucle, qui correspond à la phase d'augmentation de la contrainte (décélération), se trouve coïncider parfaitement avec les états d'équilibre. La réaction de l'agent Archisim se fait donc sans aucun retard lorsque le véhicule le précédent ralenti. Par contre, dans la phase d'accélération nous pouvons observer que la première partie de la courbe est au dessus de l'équilibre et que la seconde est en dessous. Dans le début de sa phase d'accélération, l'agent se trouve dans une situation où le gap disponible devant lui est trop faible comparativement à sa vitesse courante, situation qui se résorbe par la suite.

Nous avons encore une apparition de ce que nous pourrions qualifier d'anticipation dans laquelle l'agent accepte une situation surcontrainte s'il sait que cette contrainte va s'estomper rapidement. Cela correspond au fonctionnement que l'on connaît d'un agent Archisim qui adopte une stratégie de court terme si la gêne qu'il subit est qualifiée de courte durée. C'est le cas lorsque le véhicule précédent est lui-même en phase d'accélération.

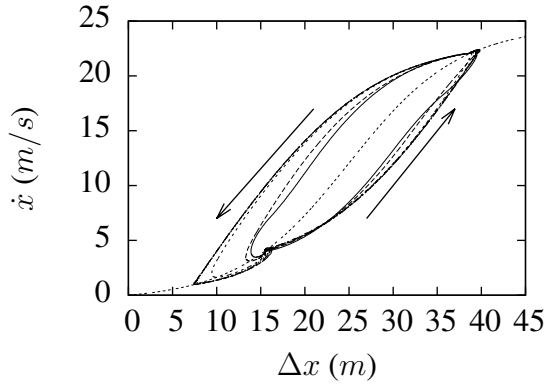
Cette première analyse des boucles d'hystérésis a permis de mettre en avant la capacité de certains agents à anticiper l'évolution de la contrainte à laquelle ils sont soumis. Nous pouvons donc opérer une classification des modèles sélectionnés selon qu'ils soient « réactifs » ou « anticipatifs ». Une classification plus précise des capacités d'anticipations des agents tel que proposée par Butz et al. [4] nécessite une connaissance interne des modèles, ce qui exclut l'approche boîte noire.

4.2 Propagation d'une perturbation

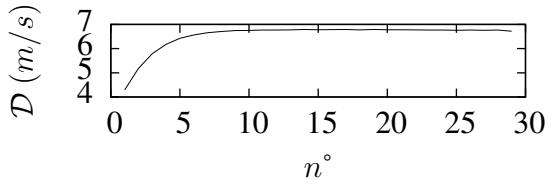
La première expérience que nous venons de montrer a permis de caractériser le comportement de différents agents conducteurs soumis à une contrainte variable. Nous étudions maintenant comment une population d'agents réagit à un stimulus, et comment la perturbation que le véhicule leader peut générer se propage le long de notre population et est transmise de proche en proche.

Pour ce faire, nous introduisons un opérateur $\mathcal{D}$ de pseudo distance entre une courbe d'hystérésis et la ligne d'équilibre. Cet opérateur donne la plus grande différence de vitesse qui existe entre les deux tracés, et ce sur l'ensemble des gaps parcourus par la boucle d'hystérésis.

La figure 5a montre les boucles d'hystérésis de différents agents Optimal Velocity impliqués dans la simulation (un agent sur 4 pour des raisons de lisibilité). Nous pouvons observer que sur les premiers agents, la boucle n'est pas la même de proche en proche (elle se dilate), mais elle semble atteindre une forme limite une fois la tête du peloton passée. Ceci est confirmé par



(a) Boucles d'hystérésis



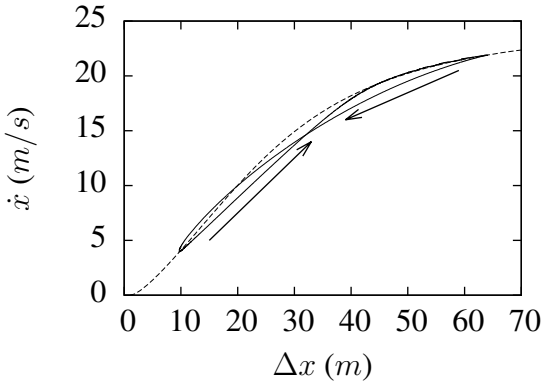
(b) Distance à l'équilibre

FIGURE 5 – Évolution de la boucle d'hystérésis dans une population d'agents OV (agent n°1, 2, 6, 10, 14, 18, 22, 26)

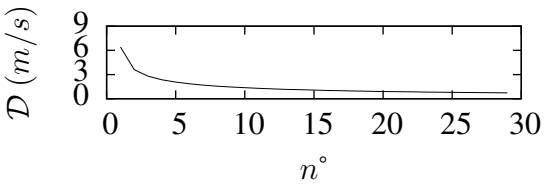
la figure 5b qui montre une forte augmentation de la distance entre la boucle et l'équilibre sur les 10 premiers véhicules. Au delà, la distance se stabilise. Ces deux éléments mettent en avant l'apparition d'un comportement limite qui est reproduit d'un véhicule à l'autre.

Par ailleurs, nous remarquons l'apparition de points singuliers sur la boucle finale observée. L'ensemble de ces points se trouvent sur la courbe d'équilibre. Nous retrouvons tout d'abord des points aux vitesses 4 et $22m/s$ qui correspondent à l'intensité des contraintes appliquées, mais également d'autres à 0.9 et $22.4m/s$ qui émergent naturellement. La contrainte qui se propage de proche en proche dans la population est différente de celle que nous lui appliquons. Nous observons une perturbation émergente liée au modèle et non à la situation. Elle correspond à la boucle initialement observée par Bando [2], dont les bornes inférieures et supérieures ne dépendent pas de la contrainte appliquée, mais du modèle de comportement et de ses paramètres.

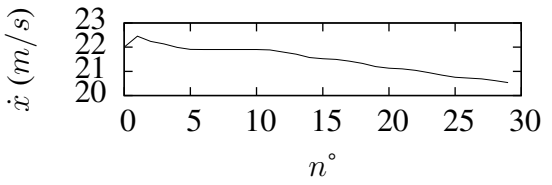
Enfin, notons que la boucle d'hystérésis permet d'étudier le comportement d'agents indépendamment du facteur temporel. Le même graphique nous permet de superposer et confronter différentes réactions qui ne se produisent pas



(a) Boucle d'hystérésis de l'agent n° 10. Les boucles d'hystérésis des autres agents du peloton ne sont pas reportées sur cette fiture afin de maintenir la lisibilité qui serait génée par un fort niveau de chevauchement



(b) Distance à l'équilibre

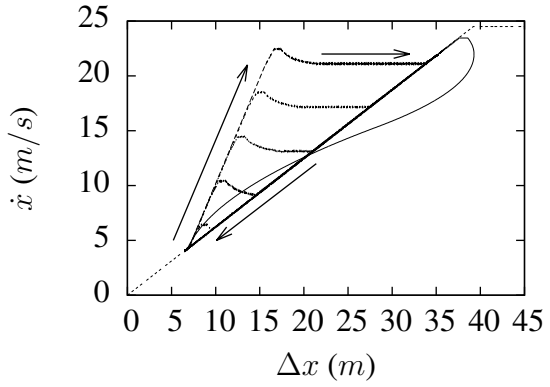


(c) Vitesse maximum durant la simulation

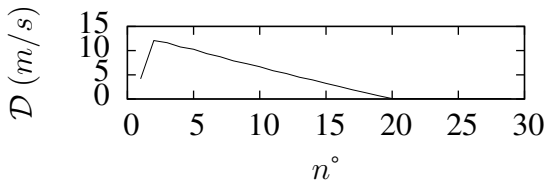
FIGURE 6 – Évolution de la boucle d'hystérésis dans un population d'agents IDM

au même instant de la simulation, ni même au même endroit.

La figure 6 montre la propagation de la perturbation dans une population IDM. Cependant, pour des raisons de lisibilité, et étant donné que l'ensemble des boucles ont des propriétés similaires, seule la boucle du véhicule n°10 a été reportée sur la figure 6a. Cette dernière montre une boucle en forme de "8". La phase de décélération est similaire à celle observée dans la figure 3 et exhibe la même capacité d'anticipation. La différence majeure provient de la phase d'accélération qui a une forte pente au début, coupe la courbe de décélération puis rejoint la courbe d'équilibre tôt (à environ $19m/s$). Une fois l'équilibre rejoint, le véhicule "glisse" dessus pour atteindre sa vitesse maximale. La figure 6c montre que d'un véhicule à l'autre, la



(a) Boucles d'hystérésis



(b) Distance à l'équilibre

FIGURE 7 – Évolution de la boucle d'hystérésis dans une population d'agents Archisim (agent n°1, 2, 6, 10, 14, 18, 22, 26)

vitesse maximale atteinte est de plus en plus faible. Les derniers agents du peloton n'arrivent pas à rejoindre la vitesse de l'agent contraignant avant que ce dernier ne décélère, ce qui atteste d'une convergence très lente dans la dernière phase d'accélération. Par ailleurs, la distance entre la boucle d'hystérésis et la courbe d'équilibre décroît clairement le long du peloton (comme montré par la figure 6b) attestant d'une certaine absorption de la contrainte appliquée. Ce phénomène est opposé à celui observé avec des agents OV qui accentuaient la contrainte subie.

Enfin, la figure 7 montre la réaction d'une population d'agents Archisim. Tout d'abord, nous pouvons remarquer une nette différence entre la boucle de l'agent n°1 (identique à celle de la figure 4) et les autres, et ce malgré que les comportements d'agents soient les mêmes. Cette différence reflète le fait que la boucle dépend d'une part du comportement de l'agent suiveur, mais également de l'agent leader. En effet, $\Delta x = x_{n-1} - x_n$ est une grandeur influencée par le couple suiveur / suivi. Nous pouvons donc dire que la boucle d'hystérésis reflète une interaction plutôt qu'un comportement seul.

Ensuite, il apparaît clairement que, hormis pour le premier, tous les agents se trouvent dans la zone sur-contrainte durant la phase d'accélération. La forme de la boucle d'hystérésis de chacun de ces agents est triangulaire et son aire réduit régulièrement d'un agent à l'autre. La figure 7b fait clairement apparaître qu'après 20 agents, l'aire de ce triangle devient nulle. La forme triangulaire de l'accélération reflète le fait que dans un premier temps, les agents acceptent une sur-contrainte. Dans un second temps (correspondant au côté horizontal du triangle), les agents régulent leur vitesse afin de rejoindre un état d'équilibre.

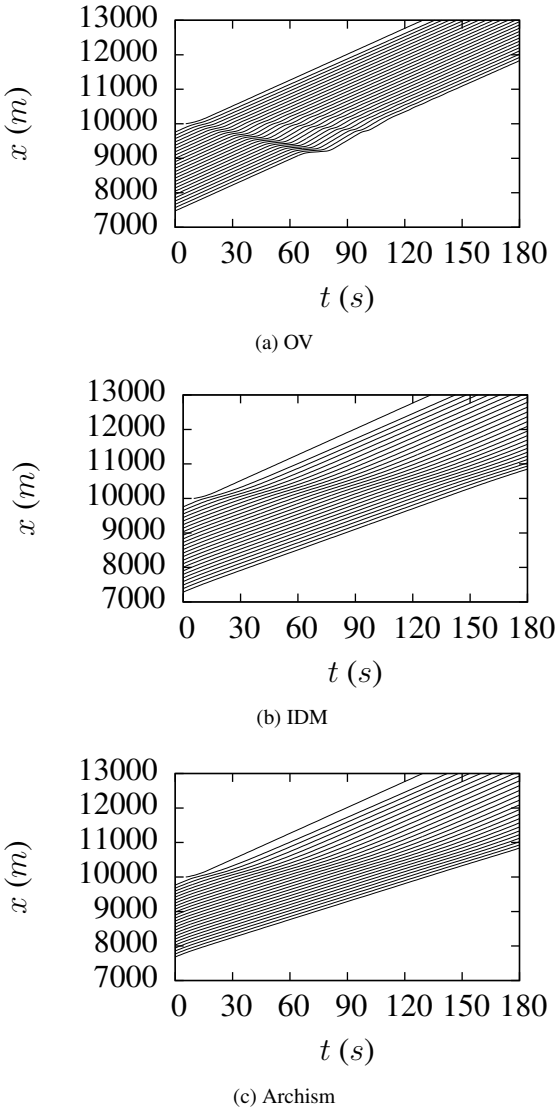
Ce changement de comportement montre que les agents changent de stratégie à un moment de l'accélération, et passent d'une gestion d'une contrainte courte à une gestion de contrainte longue. Ce moment coïncide avec le moment où le leader a atteint sa vitesse maximale ($22m/s$) et a cessé d'accélérer. La contrainte qu'il exerce alors sur le peloton devient stable et ne peut plus être considérée comme temporaire par les agents Archisim.

Dans ce scénario, nous avons des agents qui réagissent à un stimulus externe, la fin de la relaxation de la contrainte appliquée au peloton, que nous ne pouvons représenter directement sur la boucle d'hystérésis. Cet élément montre que le choix de la grandeur retenue pour caractériser la contrainte appliquée à un agent n'est pas anodin et peut cacher une partie de la situation dans laquelle l'agent est plongé. L'étude des phénomènes d'hystérésis permet de caractériser un comportement, mais l'analyse fine d'une réaction peut requérir une analyse de données issues de la simulation qui n'apparaissent pas sur le tracé de l'hystérésis.

4.3 Extension au cas d'insertion

Les résultats précédents nous ont permis de dégager deux groupes de modèles basés sur leurs capacités d'anticipation : OV d'un côté qui a un comportement purement réactif, et IDM et Archisim de l'autre qui montrent des capacités d'anticipations. Nous avons également vu que ces deux derniers modèles avaient un effet d'atténuation sur une perturbation lorsque celle-ci se propage dans une population d'agents.

Nous voulons maintenant étudier quel est l'effet de ces propriétés sur le déroulement d'une simulation en général, et sur l'écoulement du trafic en particulier. Pour ce faire, nous étudions une situation dans laquelle nous avons un peloton de véhicules qui évolue à l'équilibre sur une infrastructure de type autoroutière, et devant lequel



(a) OV

(b) IDM

(c) Archism

FIGURE 8 – Diagramme (t,x) représentant les trajectoires de l'ensemble des véhicules dans le scénario d'insertion

un véhicule va s'insérer à vitesse faible, forçant le peloton à s'adapter pour éviter la collision. L'infrastructure n'est dotée que d'une seule voie afin que les résultats ne soient pas perturbés par d'éventuels changements de voie.

La figure 8 montre les trajectoires de l'ensemble des véhicules impliqués dans le scénario, et ce pour l'ensemble des modèles sélectionnés. Nous voyons que dans chacune des simulations, à $t = 0$, le peloton évolue à vitesse constante et à l'équilibre (la vitesse de chacun des membres du peloton est constante). Au temps $t = 5s$, un nouveau véhicule s'insère forçant le peloton à s'adapter. Nous distingons clairement deux cas :

– 8a où nous observons l'apparition de vagues dites de sur-congestion remontant le long du flot de véhicules,
– 8b et 8c où l'insertion du nouveau véhicule provoque une réduction temporaire de la vitesse moyenne du flot de véhicules à proximité du point d'insertion.

Or, nous savons de par notre connaissance des modèles, que l'information se propage de manière analogue dans les deux premières simulations (perception de l'adaptation de proche en proche) tandis que dans la troisième chaque agent peut percevoir l'état du trafic en aval et adapte sa stratégie. Le mode de transmission de l'information ne peut donc être retenu comme élément explicatif des différents phénomènes observés dans les simulations. La capacité des modèles à anticiper, telle que mise en avant par l'étude des boucles d'hystérésis, permet donc d'opérer une classification des modèles plus pertinente dans le cas applicatif que nous avons développé.

5 Conclusion

Dans cet article, nous utilisons l'étude du phénomène d'hystérésis pour caractériser et comprendre différents modèles de comportement avec une approche « boîte noire ». Cet outil permet de mettre en avant des propriétés fondamentales des modèles étudiés et le lien que ces propriétés ont avec l'émergence de phénomènes macroscopiques. L'étude des phénomènes d'hystérésis permet notamment de caractériser la capacité des agents à anticiper l'évolution de la contrainte à laquelle ils sont soumis afin de s'y adapter. Cette caractérisation ouvre la voie à une classification des modèles quelle que soit l'approche de modélisation ou de formalisation utilisée.

L'étude que nous menons est fondée sur une comparaison de la position de la boucle d'hystérésis par rapport aux états d'équilibre. Dans les cas retenus, ces équilibres peuvent être déterminés aussi bien analytiquement qu'expérimentalement, mais rien n'assure cette propriété dans le cas général. Par exempleles modèles stochastiques auront une probabilité d'équilibre. Une attention particulière devra donc être portée au problème de l'estimation des états stables dans le cas général, en conservant l'approche « boîte noire » qui caractérise l'étude des phénomènes d'hystérésis.

Ce type d'approche est applicable à d'autres domaines utilisant des systèmes multi-agents que

celui que nous avons retenu, et peut par exemple permettre d'étudier la propagation d'états émotionnels dans une population soumise à un environnement stressant. Une difficulté sera de pouvoir identifier quelle grandeur influence le comportement étudié, et quelle est la réaction retenue. Le couple de grandeurs (cause, effet) retenu a évidement un impact sur la compréhension du phénomène étudié et peut ne refléter qu'un aspect de celui-ci. C'est pourquoi nous nous basons sur les dires d'experts du domaine concerné afin d'identifier le(s) couple(s) pertinent(s). Une investigation plus poussée sur la manière d'identifier le lien de causalité entre deux grandeurs sans le recours à une connaissance du domaine permettrait une plus grande généricité de l'approche, et devra être traitée ultérieurement.

Références

[1] M. Bando, K. Hasebe, K. Nakanishi, and A. Nakayama. Analysis of optimal velocity model with explicit delay. *Arxiv preprint patt-sol/9805002*, 1998.

[2] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, and Y. Sugiyama. Structure stability of congestion in traffic dynamics. *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 11(2) :203–223, 1994.

[3] P. Bourdieu. Avenir de classe et causalité du probable. *Revue française de sociologie*, pages 3–42, 1974.

[4] M.V. Butz, O. Sigaud, and P. Gérard. *Anticipatory behavior in adaptive learning systems : foundations, theories, and systems*, volume 2684. Springer Verlag, 2003.

[5] A. Champion, S. Espié, R. Mandiau, J.M. Auberlet, and C. Kolski. A game-based, multi-agent coordination mechanism-application to road traffic and driving simulations. In *Summer Computer Simulation Conference*, pages 644–649. Society for Computer Simulation International ; 1998, 2003.

[6] LC Davis. Modifications of the optimal velocity traffic model to include delay due to driver reaction time. *Physica A : Statistical Mechanics and its Applications*, 319 :557–567, 2003.

[7] A. Doniec, S. Espié, R. Mandiau, and S. Piechowiak. Multi-agent coordination and anticipation model to design a road traffic simulation tool. In *4th European Workshop on Multi-Agent Systems*, 2006.

[8] S. Espié, J.M. Auberlet, et al. Archisim : a behavioral multi-actors traffic simulation model for the study of a traffic system including its aspects. 2007.

[9] S. Espié, F. Saad, B. Schnetzler, F. Bourlier, and N. Djemane. Microscopic traffic simulation and driver behaviour modelling : the archisim project. *Road Safety in Europe and Strategic Highway Research Program*, pages 22–31, 1994.

[10] M. Göcke. Various concepts of hysteresis applied in economics. *Journal of Economic Surveys*, 16(2) :167–188, 2002.

[11] D. Helbing and B. Tilch. Generalized force model of traffic dynamics. *Physical Review E*, 58(1) :133, 1998.

[12] S.P. Hoogendoorn and P.H.L. Bovy. State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I : Journal of Systems and Control Engineering*, 215(4) :283–303, 2001.

[13] R. Jiang, Q. Wu, and Z. Zhu. Full velocity difference model for a car-following theory. *Physical Review E*, 64(1) :017101, 2001.

[14] U.G. Ketenci, E. Grislin, R. Bremond, and J.M. Auberlet. Simulation de perception humaine limitee : etude de l'influence d'un parametre de seuil. *Journées francophones sur les systèmes multi-agents (JFSMA)*, pages 169–178, 2011.

[15] S. Kikuchi and P. Chakroborty. *Car-following model based on fuzzy inference system*. Number 1365. 1992.

[16] M. Treiber, A. Hennecke, and D. Helbing. Microscopic simulation of congested traffic. In *Traffic and Granular Flow*, volume 99, pages 365–376, 2000.

[17] J.P. Treuil, A. Drogoul, and J.D. Zucker. *Modélisation et simulation à base d'agents : exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques*. Dunod, 2008.

[18] H. Van Dyke Parunak, R. Savit, and R. Riolo. Agent-based modeling vs. equation-based modeling : A case study and users' guide. In *Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation*, pages 277–283. Springer, 1998.

[19] H.M. Zhang. A mathematical theory of traffic hysteresis. *Transportation Research Part B : Methodological*, 33(1) :1–23, 1999.