

# Modélisation du trafic routier par des automates cellulaires

Cécile Appert <sup>(1)</sup>, Ludger Santen <sup>(2)</sup>,

(1) CNRS-Laboratoire de Physique Statistique, Ecole Normale Supérieure,  
24, rue Lhomond, F-75231 Paris Cedex 05, France  
appert@lps.ens.fr

(2) Fachrichtung Theoretische Physik, Univ. d. Saarlandes, Postfach  
151150 - Gebaeude 38, 66041 Saarbruecken, Germany  
santen@lusi.uni-sb.de

## Résumé

*Les automates cellulaires appliqués au trafic routier se sont beaucoup développés au cours des 15 dernières années, et permettent aujourd'hui des comparaisons directes avec des mesures empiriques. Nous présentons quelques modèles récents, et discutons la possibilité de développer des bancs d'essai en vue de la validation de ces modèles.*

*Mots clés: modèle, automate cellulaire, banc d'essai, trafic synchronisé*

## 1 Introduction

Le trafic routier est un phénomène très non-linéaire, ce qui rend difficile les prédictions et les simulations. Parmi les méthodes employées, on peut distinguer deux approches. D'une part, l'approche microscopique vise à décrire le comportement individuel des véhicules. Cette approche est réservée aux petits systèmes. D'autre part, l'approche macroscopique - inspirée de la mécanique des fluides - modélise le trafic comme l'écoulement d'un fluide continu, décrit par les variables macroscopiques que sont la densité, le débit. La dynamique est donnée par des équations de conservation dont la forme exacte varie d'un modèle à l'autre. Ces modèles comportent en général un grand nombre de paramètres ajustables.

Dans les années 90 est apparue une nouvelle approche, basée sur les

automates cellulaires [1, 2], avec le modèle de Nagel et Schreckenberg [3]. Les automates cellulaires peuvent être vus comme intermédiaire entre approches microscopiques et macroscopiques. L'espace et le temps y sont discrétisés, ainsi que la vitesse des véhicules. Ceux-ci sont décrits comme des entités bien séparées, mais leur dynamique est définie de façon à rester très simple, ne retenant que quelques traits essentiels en vue d'un bon comportement macroscopique. La simplicité des règles permet de traiter de grands systèmes [4] et donc de faire le lien entre les échelles micro et macroscopiques. La discrétisation permet de travailler sur des valeurs entières et renforce l'efficacité numérique des modèles. Elle génère aussi un bruit intrinsèque, qui modélise naturellement les variations de comportement des conducteurs.

Les automates cellulaires peuvent être employés dans plusieurs perspectives. L'une, tournée vers la compréhension des mécanismes de base du trafic plutôt que vers la simulation réaliste des écoulements, consiste à prendre des modèles simplifiés à l'extrême, pour lesquels la plupart des caractéristiques peuvent être calculées analytiquement, et d'étudier l'effet d'un choix particulier pour la dynamique. C'est dans cette perspective que se situait notre article précédent [5], où nous montrions comment l'ajout d'un temps de réaction des conducteurs permettait l'émergence d'un comportement métastable - ce qui semble souhaitable pour des simulations plus réalistes.

Cet ingrédient - ainsi que d'autres - peuvent être incorporés dans des modèles plus complets, qui ont vocation à simuler des écoulements de trafic réel, et c'est ce type de modèles qui nous intéressera dans cet article. Après avoir rappelé la définition du modèle de Nagel et Schreckenberg (section 3.1), nous montrerons comment l'ajout d'un temps de réaction modifie effectivement le comportement (section 3.2), puis nous sauterons dans le temps pour présenter deux modèles récents (sections 3.3 et 3.4). Ces modèles atteignent aujourd'hui un degré de réalisme suffisant pour que des comparaisons avec des mesures réelles soient possibles.

Dès lors qu'on prétend à des simulations réalistes, il est indispensable de se donner des outils pour valider la méthode numérique, ou pour comparer diverses approches entre elles. C'est pourquoi dans une première partie, nous mentionnerons quelques résultats expérimentaux et présenterons une série de tests - évidemment non exhaustive - qui nous permettront de contrôler la qualité des divers modèles d'automates cellulaires. Il est bien connu que définir de bons tests dans le domaine du trafic routier n'est pas facile, en raison de la variabilité des mesures et de la difficultés à en extraire des lois générales. Cependant, nous pensons que les progrès réalisés

ces dernières années doivent inciter la communauté à développer des bancs d'essai, et nous espérons que les pistes proposées ici stimuleront la réflexion sur ce qu'on attend d'un test, et participeront au développement d'une méthodologie.

Dans le cas des automates cellulaires, on peut tirer parti de ce que l'on a accès non seulement à des grandeurs macroscopiques mais aussi aux caractéristiques individuelles des véhicules, pour tester les modèles à l'échelle macroscopique *et* sur les propriétés statistiques de quantités attachées à chaque véhicule. Nous présenterons les modèles dans une deuxième partie, en les discutant à la lumière des résultats expérimentaux, selon une démarche largement inspirée de [6]. Cependant, ne pouvant reproduire ici tous les détails de cette étude, nous renvoyons le lecteur à cet article pour plus de détails, en particulier en ce qui concerne le test des caractéristiques individuelles.

## 2 Données expérimentales

Nous allons commencer par présenter quelques données expérimentales, à partir desquelles des tests pourront être élaborés.

### 2.1 Données expérimentales portant sur des grandeurs macroscopiques

Nous commençons comme d'habitude par le **diagramme fondamental, qui donne le flux en fonction du taux d'occupation** (fig. 1). Les données ont été obtenues grâce à des boucles magnétiques noyées dans la chaussée. Chaque point de mesure correspond à une moyenne temporelle sur une minute.

On distingue trois régimes :

- L'écoulement libre, pour lequel le flux est proportionnel à la densité, et où les vitesses des véhicules sont importantes,
- Le régime embouteillé, à fortes densités, où la vitesse des véhicules est quasiment nulle,
- L'écoulement synchronisé, mis en évidence par B. Kerner et al [7], pour lequel le flux reste important bien que les vitesses soient moindres que pour l'écoulement libre. Le flux devient décorrélé de la densité, et on obtient une surface bidimensionnelle dans le diagramme fondamental au lieu d'une simple courbe.

Il n'est en fait pas très fiable de distinguer régimes synchronisé et embouteillé à partir du diagramme fondamental seul. En effet, le résultat obtenu dépend largement de la procédure de moyenne utilisée. Il est plus pertinent [8, 7, 9] de calculer la fonction de corrélation croisée entre le flux  $j$  et la densité  $\rho$  calculée comme  $\rho = j/v$  :

$$cc(\rho, j) = \frac{\langle \rho(t)j(t + \tau) \rangle - \langle \rho(t) \rangle \langle j(t + \tau) \rangle}{\sqrt{\Delta \rho(t)} \sqrt{\Delta j(t + \tau)}} \quad (1)$$

avec

$$\Delta A = \langle A^2 \rangle - \langle A \rangle^2. \quad (2)$$

Cette corrélation sera proche de zéro pour un écoulement synchronisé et proche de un pour un embouteillage.

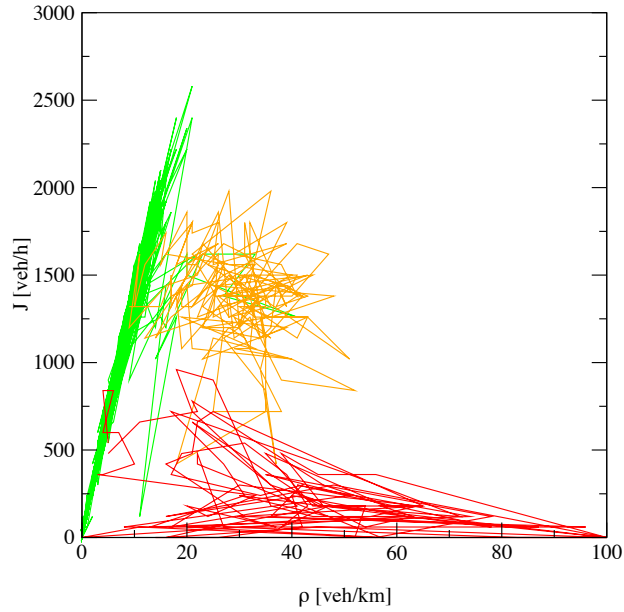


Figure 1: Diagramme fondamental empirique. En abscisse,  $\rho$  indique ici le taux d'occupation, mesuré directement (ce qui permet de prendre en compte les véhicules au repos).

Dans un second temps, il est intéressant d'étudier les interactions entre les différents types d'écoulements. Les mesures de B.S. Kerner [10] illustrent en particulier comment un embouteillage se comporte dans différents

environnements. Tout d'abord, s'il est immergé dans une zone d'écoulement libre, un embouteillage remonte l'écoulement avec une vitesse relativement constante, comprise entre 15 et 18 km/h. Si ce même embouteillage rencontre alors une zone d'écoulement synchronisé, il s'avère que sa vitesse n'en est pas perturbée pour autant, et l'embouteillage traverse la zone d'écoulement synchronisé sans en être le moins du monde affecté.

## 2.2 Données expérimentales sur les caractéristiques individuelles

Puisque les automates cellulaires donnent accès également à des caractéristiques individuelles des véhicules, nous allons maintenant présenter quelques résultats liés aux véhicules, là aussi à titre d'illustration sans aucune prétention d'exhaustivité.

L'une des mesures possibles est celle de la distribution des distances temporelles entre véhicules. Il est utile de distinguer les distributions obtenues dans les différents modes de trafic. La figure 2 présente des résultats obtenus sur des autoroutes allemandes [11]. Dans le cas de l'écoulement libre, la distribution dépend de la densité, sauf aux temps courts où elle devient invariante. La distribution s'annule pour des temps de 0.2 s, ce qui correspond au temps de réaction d'un chauffeur - mais sans inclure le temps de réaction du véhicule. Ces temps sont beaucoup trop courts pour réagir si un obstacle surgit brutalement et correspondent donc à des conduites à risques. Les mesures ont porté sur environ 1.5 millions de véhicules en 19 jours.

Dans le cas de l'écoulement synchronisé, l'ensemble de la distribution est modifiée et décalée vers des temps plus longs lorsque la densité augmente. Comme dans l'écoulement libre, on observe des distances temporelles relativement courtes, mais une analyse plus fine montre que les véhicules correspondants sont regroupés en paquets beaucoup moins longs que dans le cas de l'écoulement libre. Dans l'écoulement synchronisé, les vitesses entre véhicules successifs sont fortement corrélées, alors que les distances intervéhiculaires le sont très peu.

D'autre part, Neubert et al. [8] ont également mesuré la relation vitesse-distance. On observe sur la figure 3 un comportement différent selon le type d'écoulement (libre, synchronisé) avec une nette dépendance en densité. La vitesse ne dépend donc pas uniquement de la distance au véhicule précédent mais aussi du mode de trafic global.

Certains modèles prennent cette fonction - également appelée fonctionnelle de vitesse optimale - directement comme un paramètre d'entrée (cf.

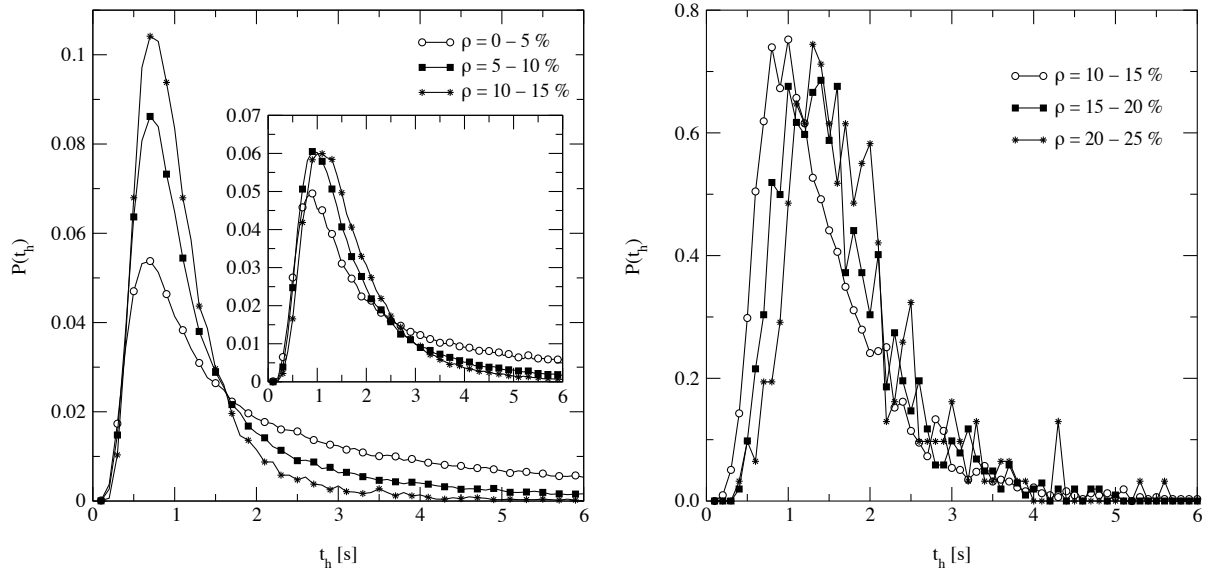


Figure 2: Distribution des distances temporelles pour divers types d'écoulement (à gauche : écoulement libre, à droite : synchronisé). Tiré de [11].

[12, 13]). Nous préférons ici considérer des modèles partant de règles simples et pour lesquels la fonction vitesse-distance est un résultat et non une donnée.

### 2.3 Qu'est-ce qu'un bon test?

D'emblée, deux propriétés semblent requises pour définir un bon test. D'une part, la mise en oeuvre de ce test doit rester simple, et ce pour le plus grand nombre possible de modèles. D'autre part, le test doit cependant être assez pointu pour permettre de différencier les modèles entre eux.

Un troisième point - peut-être plus difficile à obtenir - est que la propriété testée soit largement reconnue par la communauté des personnes travaillant sur le trafic comme étant bien une caractéristique du trafic réel. Dans bien des cas, les discussions sont encore ouvertes. Cependant, les progrès successifs grâce à l'acquisition de nouvelles données devrait permettre de dégager un consensus sur au moins quelques caractéristiques de base.

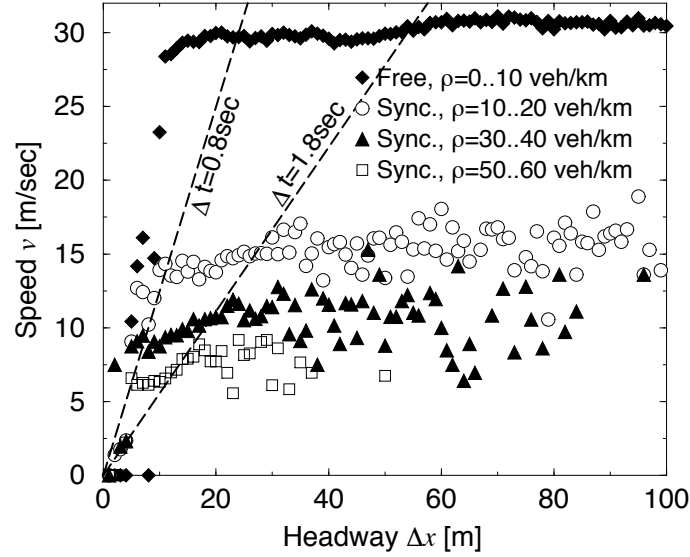


Figure 3: Vitesse en fonction de la distance intervéhiculaire. Tiré de [8].

### 3 Des modèles d'automates cellulaires appliqués au trafic routier

#### 3.1 Le modèle de Nagel-Schreckenberg (NaSch):

Nous ne pouvons commencer la description de modèles d'automates cellulaires sans commencer par rappeler les règles du modèle pionnier proposé par Nagel et Schreckenberg [3]. Chaque véhicule a une position  $X_n$  et une vitesse entière  $v_n = 0, 1, \dots, v_{max}$ . La distance entre véhicules est notée  $d_n = X_{n+1} - X_n$ . La dynamique est effectuée en parallèle pour tous les véhicules.

- *Étape 1: Accélération.* Si  $v_n < v_{max}$ , la vitesse du  $n^{ieme}$  véhicule est augmentée d'une unité, mais  $v_n$  demeure inchangée si  $v_n = v_{max}$ , i.e.

$$v_n \rightarrow \min(v_n + 1, v_{max}).$$

- *Étape 2: Décélération (dûe aux autres véhicules).* Si  $d_n \leq v_n$ , la vitesse du  $n^{ieme}$  véhicule est réduite à  $d_n - l$ , i.e.,

$$v_n \rightarrow \min(v_n, d_n - l).$$

Dans le modèle original,  $l$  vaut 1, mais des variantes ultérieures permettent de considérer des véhicules occupant plusieurs cases, et donc des discrétisations plus fines.

- *Étape 3: Facteur aléatoire.* Si  $v_n > 0$ , la vitesse du  $n^{ième}$  véhicule est réduite d'une unité avec probabilité  $p$  mais  $v_n$  demeure inchangée si  $v_n = 0$ , i.e.,

$$v_n \rightarrow \max(v_n - 1, 0) \quad \text{avec proba } p.$$

- *Étape 4: Mouvement des véhicules.* Chaque véhicule avance selon

$$X_n \rightarrow X_n + v_n.$$

Le diagramme fondamental de ce modèle, obtenu pour des conditions aux limites périodiques et en régime stationnaire, est reproduit sur les figures 4 et 5.

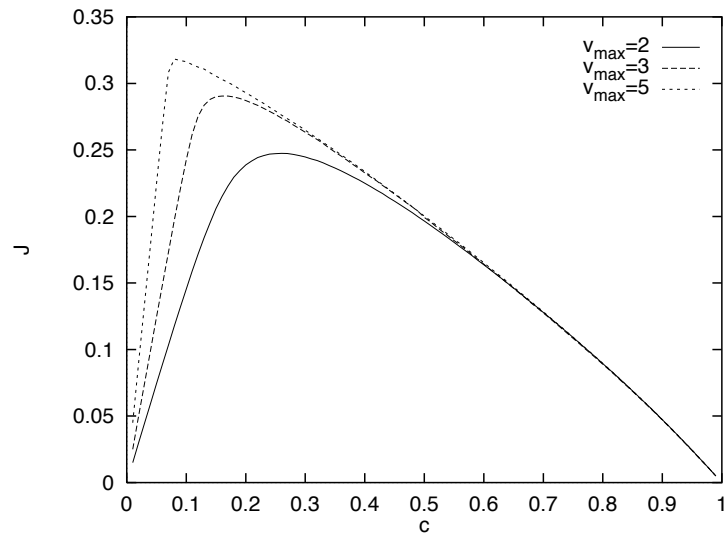


Figure 4: Diagramme fondamental pour le modèle de Nagel-Schreckenberg pour diverses vitesses maximales ( $v_{max} = 2, 3, 5$ ). Tiré de [1].

On dispose de quelques paramètres ajustables. L'une des façons possibles de déterminer ces paramètres consiste à choisir  $v_{max}$  pour avoir la pente souhaitée pour la branche d'écoulement libre du diagramme fondamental, et  $p$  pour avoir le maximum souhaité du diagramme fondamental. Il reste



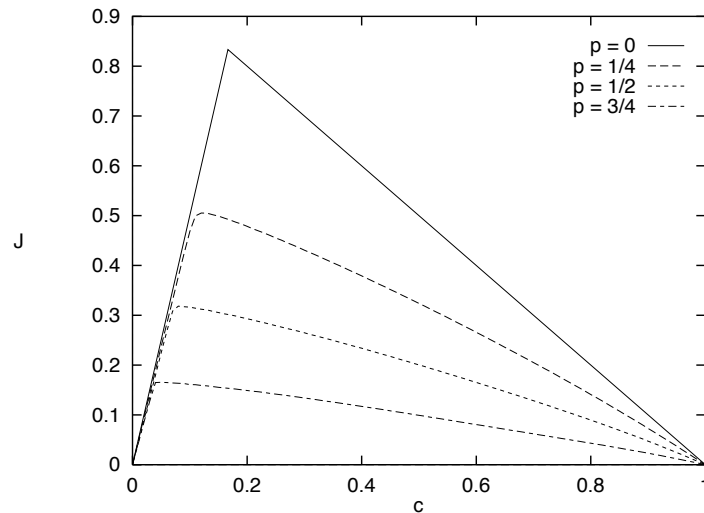


Figure 5: Diagramme fondamental pour le modèle de Nagel-Schreckenberg pour différents choix du paramètre de freinage ( $v_{max} = 5$ ). Tiré de [1].

encore à choisir le pas de temps  $\Delta t$  qui permet d'ajuster la vitesse vers l'amont des embouteillages se propageant dans un écoulement libre, et la taille d'une cellule élémentaire  $\Delta x$ . Dans le cas où on a une seule voiture par cellule ( $l = 1$ ), on prend classiquement  $\Delta x$  égal à l'écart entre voitures dans un embouteillage (en incluant l'espace intervéhiculaire).

Typiquement, ces valeurs vaudront par exemple

- $\Delta x = 7.5$  m
- $\Delta t = 1.2$  s (qui peut s'interpréter aussi en temps de réaction conducteur + véhicule)
- $v_{max} = 5$  cellules/pas de temps = 112.5 km/h avec la discrétisation ci-dessus
- $p = 0.16$

Comme on le voit, tous les paramètres sont déterminés par des propriétés macroscopiques. Le test des propriétés individuelles des véhicules donne des résultats très peu réalistes [6], ce qui n'est pas très étonnant pour ce premier modèle. Par exemple, les véhicules peuvent freiner instantanément jusqu'à la vitesse nulle, ce qui n'est évidemment pas réaliste. D'autres

propriétés macroscopiques ne sont également pas bien représentées, comme par exemple le flux en aval d'un embouteillage, ou la fréquence de formation spontanée d'embouteillages, qui sont trop élevés.

Nous allons maintenant présenter quelques variantes de ce modèle qui ont été proposées par la suite.

### 3.2 Ajout d'un temps de réaction (modèle VDR)

Le modèle VDR (Velocity dependant randomization), en ajoutant un temps de réaction du conducteur, permet d'introduire dans le modèle de la métastabilité [14, 5]. Ce temps de réaction est introduit en faisant dépendre la probabilité de freinage  $p$  de la vitesse du véhicule. Il est à noter que la dénomination de  $p$  peut porter à confusion. Ce paramètre correspond en fait selon les cas à une probabilité de freinage ou à une probabilité de ne pas accélérer. Essentiellement, il introduit une composante stochastique dans le comportement du conducteur et du véhicule.

On prend en général une fonction  $p$  de la forme

$$p(v) = \begin{cases} p_0 & \text{si } v = 0 \\ p & \text{si } v > 0 \end{cases} \quad (3)$$

avec  $p_0 < p$ .

Le diagramme fondamental met bien en évidence la métastabilité du modèle, par la présence d'une double branche (fig. 6).

Il est important de remarquer que les diagrammes fondamentaux tels qu'ils sont représentés sur les figures 4 et 6 ne peuvent pas être directement comparés aux résultats expérimentaux. En effet, ces derniers représentent des grandeurs moyennées sur des durées fixes - typiquement de l'ordre de quelques minutes. Une première étape pour se rapprocher des mesures empiriques consiste donc à effectuer une telle opération de moyenne dans les simulations. Par exemple, pour le modèle VDR et pour des moyennes sur une minutes, le diagramme fondamental devient celui de la figure 7.

Il faut noter de plus que les diagrammes fondamentaux numériques sont obtenus pour des conditions aux limites périodiques - et donc à densité fixée. Seuls les embouteillages se formant spontanément dans l'écoulement contribuent au diagramme. Par contre, dans le trafic réel, l'écoulement se fait bien sûr en géométrie ouverte. On n'observe quasiment jamais des embouteillages avec un taux d'occupation égal à 100%. De plus, les embouteillages ne sont pas seulement spontanés, mais souvent ils se forment au voisinage d'une perturbation (resserrement, entrée, etc). Une comparaison précise nécessiterait donc de prendre les mêmes conditions aux limites dans les simulations que dans la situation réelle observée.

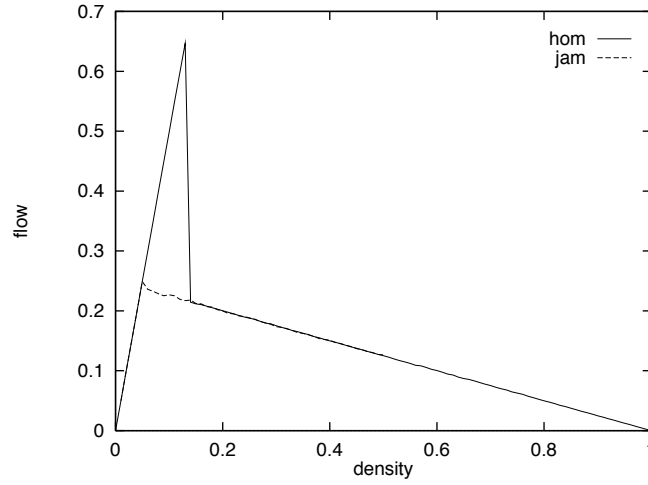


Figure 6: Diagramme fondamental pour le modèle VDR. La ligne continue correspond à des conditions initiales homogènes, et la ligne en pointillés à une initialisation avec présence d'embouteillages. Tiré de [14].

Dans le modèle VDR, le paramètre supplémentaire  $p_0$  permet d'ajuster séparément la vitesse et le flux en aval des embouteillages. Cela conduit à une meilleure description des embouteillages, avec un flux en aval réduit à des valeurs réalistes, mais aussi une fréquence de formation spontanée plus conforme à la réalité.

### 3.3 Modèle BLM (modèle avec anticipation et feux de freinage)

Le modèle BLM (break light model) introduit par Knospe et al [15] comporte deux ingrédients essentiels. D'une part, les véhicules interagissent à distance, par l'intermédiaire de feux de freinage. D'autre part, les véhicules anticipent la vitesse que peut prendre le véhicule qui les précède. De plus, le modèle conserve le temps de réaction du modèle VDR.

Plus précisément, on introduit donc une variable indiquant si les feux de freinage d'une voiture sont allumés ou éteints:

$$b_n = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} \quad (4)$$

Les règles d'évolution sont les suivantes:

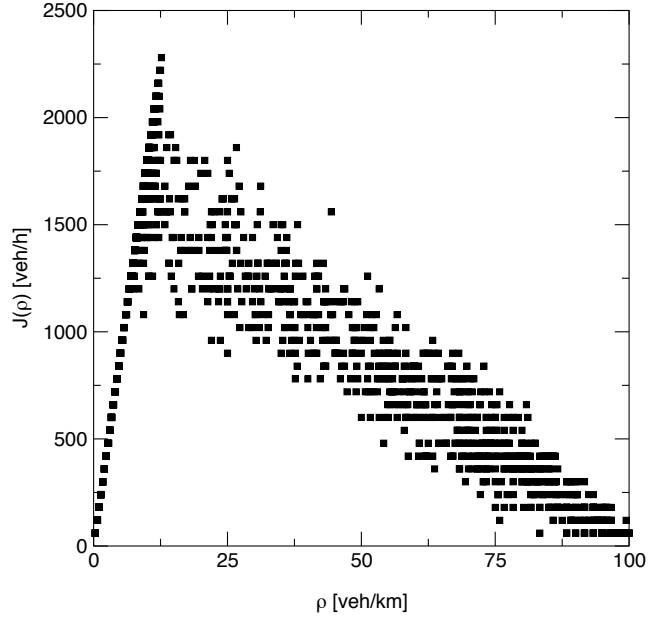


Figure 7: Diagramme fondamental pour le modèle VDR, après moyennes sur une minute. L'abscisse correspond au taux d'occupation.

- *Étape 0: Détermination du paramètre de freinage.*

$$p = p(v_n(t), b_{n+1}(t)) = \begin{cases} p_b & \text{si } b_{n+1} = 1 \text{ et } t_h < t_s \\ p_0 & \text{si } v_n = 0 \\ p_d & \text{sinon.} \end{cases} \quad (5)$$

i.e. le paramètre  $p$  dépend de la vitesse du véhicule  $n$  et de l'état des feux de freinage de la voiture  $n + 1$  qui le précède, à condition que celle-ci ne soit pas trop loin ( $t_h$  et  $t_s$  seront définis plus bas). Si on est dans le premier cas ( $p = p_b$ ), on allume en plus les feux de la voiture considérée, i.e.  $b_n(t+1) = 1$ . Le choix du paramètre  $p_0$  permet toujours de fixer le flux en sortie d'un embouteillage.

- *Étape 1: Accélération.* Si le véhicule est loin de celui qui le précède ( $t_h > t_s$ ) ou si les deux véhicules ne freinent pas ( $b_n = b_{n+1} = 0$ ), alors

$$v_n(t+1) = \min(v_n(t) + 1, v_{max}).$$

- *Étape 2: Décélération.*

$$v_n(t+1) = \min(d_n^{eff}, v_n(t))$$

où, à la différence du modèle de Nagel et Schreckenberg,  $d^{eff}$  est maintenant une distance intervéhiculaire effective qui permet d'introduire de l'anticipation, comme cela sera expliqué plus loin. Si le véhicule freine, i.e. si  $v_n(t+1) < v_n(t)$ , alors les feux de freinage s'allument, i.e.  $b_n(t+1) = 1$ .

- *Étape 3: Facteur aléatoire.* Si  $v_n > 0$ , la vitesse du  $n^{ieme}$  véhicule est réduite d'une unité avec probabilité  $p$ , i.e.

$$v_n(t+1) = \max(v_n(t) - 1, 0) \quad \text{avec proba } p.$$

- *Étape 4: Mouvement des véhicules.* Chaque véhicule avance selon

$$X_n(t+1) = X_n(t) + v_n(t+1).$$

Les règles 1 à 3 servent à déterminer la nouvelle vitesse du véhicule.

Pour définir la portée des feux rouges, on compare  $t_h = d_n/v_n$ , le temps pour atteindre la voiture qui précède, avec la portée dépendant de la vitesse  $t_s$ . Il est à noter que d'après les résultats empiriques, la distance de coupure  $t_s$  est plutôt une distance temporelle que spatiale, qui vaut typiquement entre 6 et 11 secondes. Prendre une distance temporelle constante permet d'avoir l'adaptation des vitesses recherchée aux longues distances. Par contre, une dépendance de  $t_s$  en vitesse est nécessaire pour éviter des pathologies en trafic dense. Il y a plusieurs choix possibles, et la réflexion n'est pas encore close sur la forme la plus adéquate.

Enfin, la distance effective est définie par

$$d_n^{eff} = d_n + \max(v_{anti} - gap_{securite}, 0),$$

où  $v_{anti} = \min(d_{n+1}, v_{n+1})$  est la vitesse à laquelle on s'attend pour le véhicule qui précède. L'anticipation peut être rendue plus ou moins importante selon la valeur du paramètre  $gap_{securite}$ . Cependant, il faut que ce dernier soit supérieur ou égal à 1 pour assurer l'absence d'accidents.

L'introduction de l'anticipation permet d'obtenir des distances temporelles plus courtes (les véhicules peuvent se suivre de plus près). La distribution des distances temporelles peut alors mieux se comparer aux résultats expérimentaux même aux temps courts. Il est à noter que pour obtenir le

bon comportement de cette distribution dans le cas de l'écoulement libre, il est important d'avoir un mélange de véhicules lents et rapides [15]. Ceci n'est pas vrai en régime congestionné où tous les véhicules sont amenés à réduire leur vitesse.

Ce modèle est généralement simulé avec une discrétisation spatiale plus fine que celle du modèle de Nagel et Schreckenberg, i.e. une voiture occupe plusieurs cellules. Les auteurs ont choisi [15] des cellules de longueur 1.5 m, ce qui permet de retomber sur des accélérations plus proches de celles rencontrées en réalité.

Ce modèle permet de retrouver un diagramme fondamental réaliste - ce qui n'est pas un test très fin en soi -, mais surtout il reproduit les 3 phases d'écoulement, i.e. en particulier on observe des écoulements synchronisés (cf fig. 8).

Il est plus remarquable encore qu'on retrouve la bonne fonction vitesse-distance. On dispose d'un seul paramètre ajustable pour l'ensemble de toutes les courbes (le paramètre de freinage  $p_b$ ). Ainsi, le comportement qualitatif et l'écart relatif entre les courbes n'est pas ajustable, c'est un résultat du modèle, qui s'avère tout à fait satisfaisant [6].

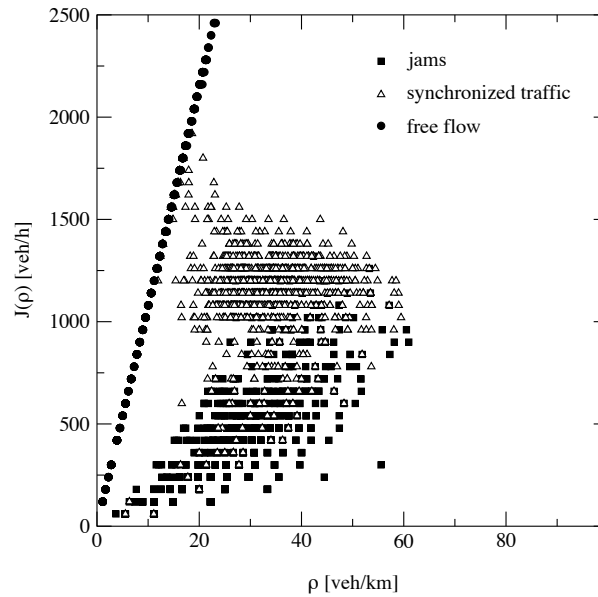


Figure 8: Diagramme fondamental. Les diverses phases ont été identifiées grâce à des mesures de corrélations. Tiré de [6].

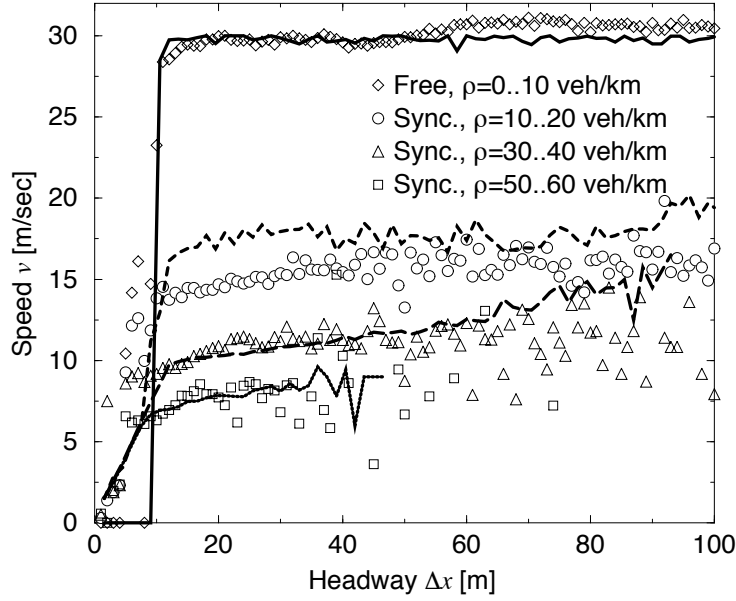


Figure 9: Fonction vitesse-distance, selon le type d'écoulement et la densité. Les symboles correspondent aux données empiriques, et les lignes aux résultats des simulations. Tiré de [6].

Le modèle a été étendu à plusieurs files, et il a été vérifié qu'un embouteillage qui remonte l'écoulement garde une vitesse constante, indépendamment du fait qu'il traverse une zone d'écoulement libre ou d'écoulement synchronisé [16]. Ceci confirme qu'un modèle ayant de bonnes propriétés à l'échelle microscopique a toutes les chances de reproduire correctement les phénomènes macroscopiques.

### 3.4 Modèle de Kerner

Plus récemment, Kerner et al. [17] ont proposé un autre modèle d'automates cellulaires. On retrouve l'idée de faire interagir les véhicules sur des distances plus grandes que le plus proche voisin. Le modèle emploie comme le précédent une discrétisation spatiale telle qu'une voiture occupe plusieurs cellules.

La dynamique peut se résumer de la façon suivante:

$$v_n \rightarrow \max(0, \min(v_{max}, v_{sn}, v_{cn}))$$

où  $v_{max}$  est la vitesse maximale des véhicules, supposée être la même pour tous les véhicules dans [17]. Ne pas dépasser la vitesse de sécurité  $v_{sn}$  permet

d'éviter les collisions. Elle dépend en général de la distance au véhicule précédent. C'est dans le mode d'accélération des véhicules que le modèle se différencie le plus des modèles précédents. Les auteurs introduisent une distance de synchronisation  $D_n$  qui dépend de  $v_n$ . Si la distance entre un véhicule et celui qui le précède est supérieure à  $D_n$ , ce véhicule accélère avec l'accélération  $a$  comme d'habitude. Mais en deçà de  $D_n$ , le véhicule essaye de synchroniser sa vitesse avec celle du véhicule qui le précède : il ralentit avec une décélération  $b$  ou accélère avec une accélération  $a$  selon que sa vitesse est supérieure ou inférieure au véhicule le précédant.

Cette règle découple vitesse et distance intervéhiculaire. Ainsi ce modèle ne pourra pas reproduire des courbes telles que celles de la figure 3. Les auteurs en effet ne croient pas que ces courbes aient une pertinence. Ils préfèrent un modèle pour lequel le diagramme fondamental stationnaire présente une zone bidimensionnelle plutôt qu'une ligne pour l'écoulement synchronisé.

Comme nous l'avons montré, il n'est pourtant pas nécessaire que le diagramme fondamental stationnaire comporte cette région bidimensionnelle pour que le diagramme fondamental obtenu pour des moyennes sur une durée de quelques minutes - celui qu'on peut comparer avec les données expérimentales - présente cette zone bidimensionnelle. Le modèle BLM en est une bonne illustration.

Par contre, les données expérimentales nous semblent conforter l'existence d'une fonctionnelle vitesse(distance intervéhiculaire), et il nous semble que l'absence d'une telle fonctionnelle est un réel inconvénient pour un modèle.

Ce modèle ne comporte pas d'anticipation comme le modèle précédent. Il en résulte que la distribution des distances temporelles n'est pas bien reproduite non plus aux temps courts, car elle est tronquée pour les temps inférieurs à une unité de temps. Il ne serait sans doute pas très difficile d'introduire de l'anticipation comme en section 3.3 pour améliorer le modèle.

Le modèle de Kerner et al [17] permet par contre lui aussi d'observer les 3 phases de trafic - il a été conçu spécialement pour pouvoir reproduire l'écoulement synchronisé. De plus, son extension à plusieurs files a permis à Kerner et al. d'observer diverses transitions entre les types d'écoulement. On retrouve bien en particulier qu'un embouteillage remonte l'écoulement avec une vitesse constante, indépendamment du fait qu'il traverse une zone d'écoulement libre ou d'écoulement synchronisé.

La possibilité de nucléer ou non des embouteillages dans des écoulements synchronisés est également étudiée en détails.

Ce modèle peine donc à reproduire les propriétés individuelles des véhicules, mais a des propriétés intéressantes au niveau macroscopique. Dans l'esprit,



on pourrait dire qu'il est plus proche d'une approche macroscopique.

## 4 Conclusion

Les automates cellulaires permettent aujourd'hui de simuler le trafic routier - ou plus particulièrement autoroutier - avec un niveau de réalisme qui permet une comparaison plus poussée avec les données empiriques. Il est crucial de se définir de bons critères pour valider ces modèles. Certaines études systématiques commencent à être effectuées. Il nous semble important, avant de réaliser des comparaisons sur des écoulements complexes, de valider d'abord les modèles sur des propriétés simples, qui permettent soit de valider le modèle, soit de progresser dans la compréhension des mécanismes de base des automates cellulaires [6]. Évidemment, cela ne dispense pas ensuite de comparaisons à une échelle plus macroscopique, dans l'esprit de Kerner et al. [17].

## Bibliographie

- [1] D. Chowdhury, L. Santen, and A. Schadschneider. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems. *Phys. Reports*, 329:199, 2000.
- [2] D. Helbing. Traffic and related self-driven many-particle systems. *Reviews of Modern Physics*, 73:1067–1141, 2001.
- [3] K. Nagel and M. Schreckenberg. A cellular automaton model for free-way traffic. *J. Phys. I*, 2:2221–2229, 1992.
- [4] J. Esser and M. Schreckenberg. Microscopic simulation of urban traffic based on cellular automata. *Int. J. Mod. Phys.*, C8:1025–1036, 1997.
- [5] C. Appert and L. Santen. Introduction d'un temps de réaction dans un modèle simplifié de trafic : Emergence de la métastabilité. *Actes INRETS n° 90, Modélisation du trafic, 2001*, pages 9–22.
- [6] W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg. Cellular automaton models for traffic flow : How do they reproduce the reality? *preprint*, 2003.
- [7] B. S. Kerner and H. Rehborn. Experimental features and characteristics of traffic jams. *Phys. Rev. E*, 53:R1297–R1300, 1996.

- [8] L. Neubert, L. Santen, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg. Single-vehicle data of highway traffic: A statistical analysis. *Phys. Rev. E*, 60:6480, 1999.
- [9] B. S. Kerner. Experimental features of self-organization in traffic flow. *Phys. Rev. Lett.*, 81:3797, 1998.
- [10] B. S. Kerner. Experimental features of the emergence of moving jams in free traffic flow. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 33:L221, 2000.
- [11] W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg. Single-vehicle data of highway traffic: microscopic description of traffic phases. *cond-mat/0203347*, 2002.
- [12] D. Helbing and M. Schreckenberg. Cellular automata simulating experimental properties of traffic flow. *Phys. Rev. E*, 59:R2505, 1999.
- [13] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, and Y. Sugiyama. Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation. *Phys. Rev. E*, 51:1035, 1995.
- [14] R. Barlović, L. Santen, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg. Metastable states in cellular automata for traffic flow. *Eur. Phys. J.*, B5:793, 1998.
- [15] W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg. Towards a realistic microscopic description of highway traffic. *J. Phys. A: Math. Gen.*, 33:L477, 2000.
- [16] W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, and M. Schreckenberg. Human behavior as origin of traffic phases. *Phys. Rev. E*, 65:015101, 2002.
- [17] B.S. Kerner, S.L. Klenov, and D.E. Wolf. Cellular automata approach to three-phase traffic theory. *preprint cond-mat/0206370*, 2002.