

MODELE D'INTERSECTIONS POUR LA SIMULATION DES RÉSEAUX DE TRAFIC ROUTIER

MAMMAR Salim^(a), LEBACQUE Jean-Patrick^(b), KHOSHYARAN Megan^(c), HAJ SALEM Habib^(b)

(a) SETRA, Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes, 46 av Aristide Briand, F 92225 BAGNEUX, Cedex-France. salim.mammar@equipement.gouv.fr

(b) INRETS Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité, 2 Av. du Général Malleret - Joinville, Arcueil, F-94114, France. lebacque@inrets.fr, haj-salem@inrets.fr

(c) ETC Economics Traffic Clinic, 34 av des Champs-Élysées, F 75008 PARIS, France. megan.khoshyaran@wanadoo.fr

RESUME : *Les gestionnaires des réseaux autoroutiers sont demandeurs d'outils de simulation du trafic pour expliquer et comprendre les phénomènes de congestion, étudier la gêne occasionnée dans le cas de travaux, d'opérations de fermeture de voies ainsi que le gain et l'impact de nouveaux aménagements de l'infrastructure. La simulation de la dynamique du trafic routier nécessite la modélisation des différents éléments qui constituent le réseau. Dans ce papier, nous nous intéressons à la mise en évidence des phénomènes de trafic au niveau des intersections. Pour cela, on propose un modèle d'intersections basé sur un modèle générique macroscopique du second ordre GSOM (generic second order macroscopic model). La validation du modèle d'intersections que nous proposons se fera à travers une étude en simulation d'une intersection composée de deux entrées et trois sorties.*

MOTS-CLEFS : *Modèle de trafic, Intersection, Problème de Riemann, Conditions aux limites*

1. INTRODUCTION

La progression des moyens informatiques a permis une avancée considérable dans le domaine de la modélisation du trafic routier en termes de dimension des réseaux modélisés et du degré de finesse auquel on reproduit les phénomènes du trafic.

La mise en évidence des phénomènes du trafic sur le plan théorique est une tâche assez délicate car elle nécessite une étude particulière des différents éléments constituant le réseau routier. D'une manière générale, un réseau de trafic routier est assimilé à un graphe orienté dont les arcs représentent les tronçons et les sommets dénotant soit des changements du nombre de voies, des bifurcations (rampes de sorties) soit des fusions de voies (rampes d'accès).

On retrouve dans la littérature plusieurs modèles physico-mathématiques qui permettent de reproduire la dynamique du trafic routier sur un tronçon (Payne, 1971; Ross, 1988 ; Zhang, 1998; Zhang, 2000; Aw and Rascle, 2002). Malheureusement, ceci n'est pas le cas pour les modèles d'intersections. Ce constat est souvent dû à la complexité du modèle macroscopique sur lequel est basé le modèle d'intersections ainsi qu'à la résolution analytique du modèle d'intersections. Dans ce papier,

nous proposons un modèle d'intersections basé sur le modèle générique macroscopique du second ordre GSOM (*generic second order macroscopic model*) proposé par Lebacque (Lebacque *et al*, 2007).

Notre article est structuré comme suit. La section suivante rappelle quelques notions fondamentales sur la modélisation des intersections et les différentes approches proposées dans la littérature. Dans la section 3, nous donnons quelques grandes lignes du modèle macroscopique sur lequel est basé le modèle d'intersection que nous proposons. La théorie du modèle d'intersections que nous proposons et la résolution numérique de ce modèle par le schéma de Godunov sont présentées dans la section 4. Nous présenterons ensuite un exemple particulier d'intersections composé de deux entrants et trois sortants. La vérification de la consistance du schéma numérique proposé et la bonne transmission des conditions aux limites se fera à travers l'étude en simulation de la propagation d'une congestion à travers l'intersection. Nous terminons par une conclusion.

2. MODÉLISATION DES INTERSECTIONS

La modélisation du trafic au niveau d'une intersection est un problème très délicat. Il a fait l'objet de nombreuses

recherches très actives. Il existe différentes échelles de représentation du trafic au niveau des singularités de contact tels que les bretelles d'accès, les péages et les carrefours. L'échelle la plus répandue est l'échelle macroscopique. Cette approche est principalement basée sur des modèles mathématiques de trafic qui peuvent être des modèles de premier ordre ou du second ordre. Cette approche est principalement utilisée pour des applications de régulation de trafic tels que le control d'accès isolé ou coordonné. Comparé aux modèles de trafic microscopiques, l'intérêt de la modélisation macroscopique des intersections réside dans la simplicité du calibrage des modèles avec des données réelles. En effet, les modèles de trafic microscopiques ont l'avantage de décrire le trafic beaucoup plus finement qu'un modèle macroscopique. Cependant, le calibrage d'une loi de poursuite microscopique est loin d'être aisé car il nécessite une quantité de données et un temps de calcul très élevés. Cette difficulté limite fortement le champ d'application des modèles microscopiques.

Pour surmonter cette difficulté, la communauté du trafic s'est intéressée à la définition de modèles hybrides combinant les modèles microscopiques et macroscopiques. On peut citer les travaux de Magne (Magne *et al.*, 2000), de Treiber (Treiber et Helbing, 2001), de Poschinger (Poschinger *et al.*, 2002), de Bourrel (Bourrel et Henn, 2002), et de Mammam (Mammam *et al.*, 2006b ; 2006c). Les résultats de simulations obtenus par ces différents travaux sont assez concluants. À l'heure actuelle, ces modèles hybrides font l'objet de recherches sur le plan théorique notamment dans la prise en compte des changements de voies et la distinction des catégories de véhicules.

Dans cet article, nous nous intéressons à la première approche c'est à dire la modélisation des intersections à l'échelle macroscopique. Le principe de base des modèles d'intersections les plus répandus dans la littérature consiste à considérer que la dimension physique de l'intersection est négligée par rapport à la dimension des tronçons. On parlera alors de modèles d'intersections ponctuelles. Dans le cas des intersections ponctuelles, il existe un autre niveau de simplification qui dépend de la prise en compte ou non de la dynamique des véhicules à l'intérieur de l'intersection. On parlera alors d'intersections ponctuelles avec état interne (resp. sans état interne) si la dynamique des véhicules est prise en compte (resp. non prise en compte) dans la modélisation.

Pour comprendre la notion de modélisation des intersections ponctuelles, considérons l'exemple de l'intersection composée de (i) arcs entrants et (j) arcs sortants comme le montre la Figure 1 :

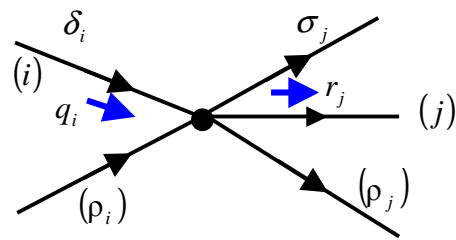


Figure 1. Configuration géométrique d'une intersection

Dans le cas d'un modèle d'intersections ponctuelles sans état interne, les données du problème d'intersection sont les conditions aux limites en amont du nœud, c.à.d, les demandes δ_i des tronçons amont (i) et les conditions aux limites en aval du nœud qui représentent les offres σ_j des tronçons aval (j) . Par conséquent, le modèle d'intersection consiste à déterminer, à chaque instant, les débits entrants que l'on note $q_i(t)$ et les débits sortants notés $r_j(t)$ en fonction des conditions aux limites des tronçons amont et aval. On retrouve cette approche de modélisation des intersections sans état interne dans les travaux de Lebacque et Khoshyaran (1998-2002 et 2005), Coclite (Coclite and Piccoli, 2002), Garavello (Garavello and Piccoli, 2006) et Mammam (Mammam *et al.*, 2006a).

La seconde approche de modélisation des intersections (ponctuelles avec état interne) a été introduite pour la première fois par Lebacque (Lebacque and Khoshyaran, 1998-2002, 2005). Cette approche consiste à considérer que la jonction entre les arcs entrants et sortants définie comme un sous tronçon avec une quantité de véhicules.

Le modèle d'intersections que nous proposons dans cet article est principalement basé sur cette dernière approche qui sera présentée en détails dans la section suivante.

3. MODELE D'INTERSECTION BASÉ SUR LE MODELE GSOM

Comme nous l'avons souligné précédemment, la complexité du modèle d'intersections est fortement liée au modèle du trafic par lequel on simule le reste du réseau (les tronçons). Dans notre cas, nous avons opté pour le modèle macroscopique du second ordre GSOM proposé par Lebacque (Lebacque *et al.*, 2007). Notre choix pour ce modèle de trafic est justifié par la simplicité de la méthodologie de calcul des solutions analytiques et numériques qui est similaire à celle d'un modèle du premier ordre LWR (Lighthill et Whitham 1955).

3.1. Modèle GSOM

Le modèle GSOM proposé par Lebacque (Lebacque *et al.*, 2007) est un modèle macroscopique du second ordre qui permet de généraliser les modèles proposés par Aw-Rascle (Aw and Rascle, 2000) et Zhang (Zhang, 2002). Le modèle GSOM est basé sur le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} \partial_t \rho + \partial_x (\rho v) = 0 \\ \partial_t y + \partial_x p = -\frac{1}{T} y \\ v = \mathfrak{V}(\rho, I) \end{cases} \quad (1)$$

avec $y = \rho I$, $p = \rho v I$ dénote la pression du trafic et T le temps de relaxation.

I est un invariant qui est lié au comportement des conducteurs. On rappelle que dans le modèle ARZ (Aw-Rascle-Zhang), l'invariant I_{ARZ} est défini comme le différentiel entre la vitesse actuelle et la vitesse en régime d'équilibre:

$$I_{ARZ} = v - V_e(\rho) \quad (2)$$

Par conséquent, la variable y représente un écart de débit entre le débit réel et le débit en régime d'équilibre (Voir Figure 2):

$$y = \rho I_{ARZ} = q - q_e(\rho) \quad (3)$$

L'intérêt du modèle GSOM est qu'il permet une meilleure adaptation du modèle de simulation à travers l'invariant I en fonction des données de mesures.

Dans le cas homogène (sans changement du nombre de voies), On a montré que la résolution du modèle d'un point de vue analytique est principalement basée sur les propriétés fondamentales de l'invariant I (Mammar *et al.*, 2005). Lebacque (Lebacque *et al.*, 2005) a démontré le même résultat pour le cas hétérogène.

Considérons le problème de Riemann avec comme condition initiale un état de trafic amont $U_g(\rho_g, I_g)$ et un état de trafic aval $U_d(\rho_d, I_d)$. D'après l'équation (1), si on néglige le terme de relaxation, l'invariant I est alors conservé le long des trajectoires véhiculaires:

$$\dot{I} = \partial_t I + v \partial_x I = 0 \quad (4)$$

En utilisant la relation de Rankine-Hugoniot, on peut montrer que les discontinuités de l'invariant I se propagent à la vitesse du trafic. Par conséquent et sous l'hypothèse que la condition initiale de la variable I est cons-

tante par morceaux, avec des valeurs $I = I_i$, la résolution analytique du modèle GSOM est équivalente à la résolution du modèle du premier ordre LWR par morceaux. Notons que $i = g, d$ dans le cas du problème de Riemann. Le système (1) s'écrit alors comme suit, sur chaque domaine du plan où I est constante $I = I_i$:

$$\partial_t \rho + \partial_x \mathfrak{R}(\rho, I_i, x) = 0 \quad (5)$$

avec un diagramme fondamental attaché aux usagers défini par:

$$\mathfrak{R}(\rho, I_i, x) = \rho \mathfrak{V}(\rho, I_i, x) \quad (6)$$

La figure 2 représente deux exemples de tels diagrammes fondamentaux variables: le modèle de ARZ et le modèle proposé par Colombo (Colombo, 2002).

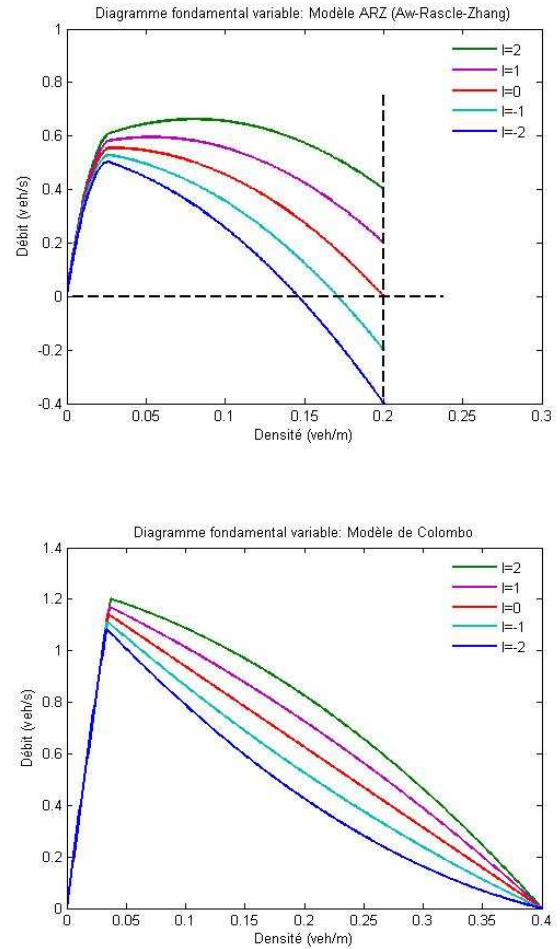


Figure 2. Exemple de diagrammes fondamentaux variables

Comme on peut le remarquer, le système (5) est équivalent à un modèle du premier ordre avec un diagramme

fondamental translaté d'une quantité I_g , sur un secteur contenant le demi-plan gauche et le secteur $x \leq v_d t$ du demi-plan droit. Par conséquent, la méthodologie de résolution analytique et numérique proposée par Lebacque (Lebacque, 1996) dans le cas d'un modèle du premier ordre LWR est applicable. Cette résolution est basée sur la notion d'offre et de demande. On rappelle que la fonction offre (resp. demande) correspond au nombre maximum de véhicules qui peuvent entrer dans une cellule (resp. qui souhaitent sortir d'une cellule) par unité de temps. Dans le cas du modèle GSOM, ces fonctions ont pour expressions:

$$\begin{aligned} \Delta_i(\rho, I) &= \text{Max}_{0 \leq r \leq p} \mathfrak{R}_i(\rho, I) \quad \forall i = g, d \\ \Omega_i(\rho, I) &= \text{Max}_{r \geq p} \mathfrak{R}_i(\rho, I) \quad \forall i = g, d \end{aligned} \quad (7)$$

Le débit q et la pression p sont alors obtenus par la formule du Min:

$$\begin{cases} q = \text{Min}[\Delta_g, \Omega_d] \\ p = q \cdot I_g \end{cases} \quad (8)$$

La principale différence avec un modèle du premier ordre est que l'offre en aval du tronçon dépend de l'invariant I_g du tronçon amont. Comme on le verra dans la suite, cette dépendance constitue la principale difficulté du modèle d'intersections.

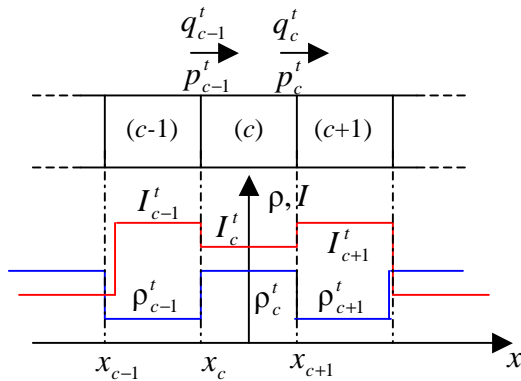


Figure 3. Discretisation du modèle GSOM.

Les solutions analytiques du modèle GSOM restent assez complexes à déterminer. Ceci nous mène à résoudre numériquement le modèle. La résolution numérique de ce type d'équations correspond à la discrétisation des solutions analytiques en utilisant un schéma de Godunov (Kröner, 1997). Le schéma de Godunov est basé sur les principes suivants :

- On décompose une section d'autoroute en cellules $(c) = [x_{c-1}, x_c]$. De même, on décompose le temps $(t) = [t\Delta t, (t+1)\Delta t]$ avec un pas égal à Δt comme le montre la Figure 3.

- La densité ρ et le débit relatif y sont supposés homogènes sur chaque cellule (c) au début de chaque pas de temps (t) . Ils sont égaux à ρ_c^t et y_c^t respectivement. Ainsi, la densité $\rho(x, t)$ et le débit relatif $y(x, t)$ sont approximés au début de chaque pas de temps par des fonctions constantes par morceaux.
- On calcule par la suite la solution exacte du modèle GSOM pendant un pas de temps.

Finalement, les équations du modèle GSOM discrétisé selon le principe du schéma de Godunov s'écrivent:

$$\begin{aligned} \rho_c^{t+1} &= \rho_c^t + \frac{\Delta t}{\Delta x} (q_{c-1}^t - q_c^t) \\ y_c^{t+1} &= y_c^t + \frac{\Delta t}{\Delta x} (p_{c-1}^t - p_c^t) \end{aligned} \quad (9)$$

Le débit q_c^t est défini comme le minimum de l'offre de la cellule aval $(c+1)$ et de la demande de la cellule amont (c) :

$$q_c^t = \text{Min}[\Delta_c(\rho_c^t, I_c^t), \overline{\Omega}_{c+1}(\rho_{c+1}^t, I_{c+1}^t, I_c^t)] \quad (10)$$

avec :

$$\overline{\Omega}_{c+1}(\rho_{c+1}^t, I_{c+1}^t, I_c^t) \stackrel{\text{def}}{=} \Omega_{c+1}^t(\mathfrak{S}_{c,p}^{-1}(\rho_{c+1}^t, I_c^t), I_{c+1}^t)$$

Comme la vitesse relative est conservée le long des trajectoires véhiculaires, la pression p_c^t est donnée par:

$$p_c^t = q_c^t I_c^t \quad (11)$$

Pour limiter l'effet de la viscosité numérique, il est nécessaire de respecter la condition de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) qui s'exprime pour le modèle GSOM comme suit:

$$\Delta x = \Delta t \cdot \text{Max}_{\rho \geq 0} \mathfrak{S}(\rho, I) \quad (12)$$

3.2. Modèle d'intersections basé sur le modèle GSOM

D'une manière générale, on distingue principalement deux types d'intersections :

- Convergent: une intersection avec deux entrées et une seule sortie (fusion de deux autoroutes).
- Divergent: un nœud avec une entrée et deux sorties (bifurcation de deux autoroutes).

Dans le cas d'une intersection complexe, la méthode de résolution consiste à décomposer l'intersection en plu-

sieurs nœuds simple. La figure 4 constitue un exemple d'une intersection avec une entrée et plusieurs sorties.

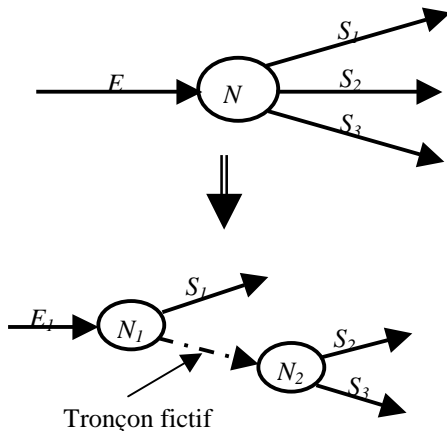


Figure 4. Décomposition d'un nœud complexe.

Dans le cas d'une intersection avec un entrant et plusieurs sortants, le problème est assez simple à résoudre. En effet, comme l'invariant I est conservé le long des trajectoires véhiculaires, ce dernier est transmis aux tronçons aval. Par conséquent, les offres des tronçons sortants sont fonction de l'invariant I du tronçon entrant.

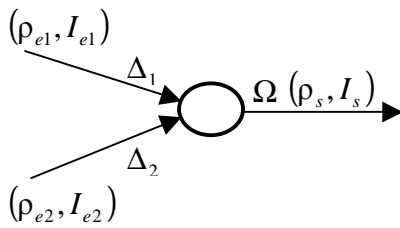


Figure 5. Cas d'un convergent.

Considérons maintenant le cas d'une intersection avec deux entrants et un sortant (convergent) comme le montre la Figure 4 ci dessous:

Comme nous l'avons souligné lors de notre présentation du modèle GSOM, l'offre du tronçon sortant de l'intersection dépend des invariants des deux entrants en amont de l'intersection, d'où la difficulté majeure du modèle d'intersections. Pour déterminer cette offre, considérons le cas général, c.à.d, le cas d'une intersection composée de (i) tronçons entrants et de (j) tronçons sortants comme le montre la Figure 6. Les conditions aux limites de l'intersection (Lebacque *et al*, 2007) sont définies par la donnée de l'offre des tronçons aval et la demande des tronçons amont :

$$\sigma_j = \Omega_j \left(\mathfrak{S}_{j,p}^{-1} \left(v_j, \tilde{I}_j \right), \tilde{I}_j \right) = \Omega_j \left(\mathfrak{S}_{j,p}^{-1} \left(\mathfrak{S}_j(\rho_j, I_j), \tilde{I}_j \right), \tilde{I}_j \right)$$

$$\delta_i = \Delta_i(\rho_i(t), I_i)$$

avec $\mathfrak{S}_{j,p}^{-1}$ représentant la fonction inverse de la relation d'équilibre, v_j la vitesse des tronçons aval et \tilde{I}_j la valeur de l'invariant entrant en (j) .

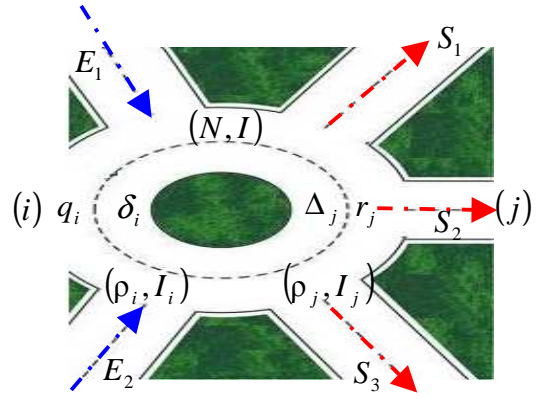


Figure 6. Intersection ponctuelle avec état interne.

Dans le but de calculer l'offre des tronçons aval, on propose de considérer que l'intersection est ponctuelle mais avec un état interne. L'intérêt de cette approche est qu'elle permette de définir un invariant équivalent noté \tilde{I} qui servira pour le calcul des offres des tronçons aval de l'intersection. Cet état interne est défini par:

- Le nombre de véhicules total $N(t)$.
- le nombre de véhicules $N_j(t)$ à destination des arcs sortants (j) avec $N(t) = \sum_j N_j(t) \quad \forall t$
- l'invariant $\tilde{I} = I$
- l'offre et la demande globales $\Omega \left(N(t), \tilde{I}(t) \right)$ et $\Delta \left(N(t), \tilde{I}(t) \right)$ qui dépendent de l'invariant \tilde{I} de l'intersection et du nombre de véhicules présents à l'intérieur de l'intersection.

L'offre et la demande globales vont nous servir dans le calcul des offres et des demandes partielles associées respectivement aux tronçons entrants et sortants.

Pour déterminer les offres partielles au niveau de chaque tronçon amont, on utilise une répartition linéaire de l'offre globale de l'intersection:

$$\Omega_i = \beta_i \Omega \left(N(t), \tilde{I}(t) \right) \quad (13)$$

avec β_i des coefficients de répartition proportionnels au nombre de voies.

Les travaux présentés dans (Lebacque, 2002) ont permis la validation de cette méthode de répartition sur des données expérimentales.

De même, la demande partielle de l'intersection associée au tronçon sortant (j) est définie en utilisant un modèle de répartition FIFO (First In, First Out) :

$$\Delta_j(t) = \left(\frac{N_j(t)}{N(t)} \right) \Delta(N(t), \tilde{I}(t)) \quad (14)$$

Le calcul de la variation du nombre $N_j(t)$ à chaque instant est réalisé en faisant le bilan des véhicules entrants et sortants (équation fondamentale de conservation des véhicules):

$$\begin{aligned} q_i(t) &= \text{Min}[\delta_i(t), \Omega_i(t)] \\ r_j(t) &= \text{Min}[\Delta_j(t), \sigma_j(t)] \\ \dot{N}_j(t) &= -r_j(t) + \sum_i \gamma_{ij} q_i(t) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt}(NI) = \sum_i q_i I_i - \sum_j r_j I$$

avec γ_{ij} les proportions d'usagers sortant du tronçon (i) et choisissant le tronçon (j) à l'instant t (coefficients des mouvements tournants).

Concernant la résolution numérique du modèle d'intersection que nous proposons et compte tenu de l'extension spatiale de l'intersection, l'application du schéma de discrétisation de Godunov est la méthode la plus adaptée à la seule différence que le pas de discrétisation temporelle des tronçons est multiple du pas de discrétisation temporelle de l'intersection:

$$\delta t = \frac{\Delta t}{\alpha}, \alpha \in \mathbb{N},$$

Finalement, les équations discrétisées du modèle d'intersection sont données par:

$$N_j(t + \delta t) = N_j(t) - r_j(t) \delta t + \sum_i \gamma_{ij} q_i(t) \delta t$$

$$N(t + \delta t) = \sum_j N_j(t + \delta t)$$

$$\tilde{I}(t + \delta t) = \tilde{I}(t) + \frac{2}{N(t) + N(t + \delta t)} \cdot \left(\sum_i q_i(t) I_i(t) - r(t) \tilde{I}(t) \right) \delta t$$

$$\text{avec } r(t) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_j r_j(t)$$

4. ÉTUDE EN SIMULATION

Afin de valider en simulation le modèle d'intersections que nous proposons, on considère la même configuration géométrique que celle donnée par la figure 6 de la section 3.2. Nous choisissons à titre d'exemple comme forme fonctionnelle de l'invariant I le différentiel entre la vitesse actuelle et la vitesse en régime d'équilibre (vitesse relative): $I = v - V_e(\rho)$. Par conséquent, le modèle GSOM se réduit au modèle ARZ (Aw-Rascle-Zhang).

Ce choix est dû au fait que ce modèle soit considéré comme le plus aboutis des modèles macroscopiques du second ordre. Les deux entrées E_1 et E_2 de l'intersection sont alimentées respectivement par une demande constante et une demande variable dans le temps. Cette variation est fonction de la variation de la vitesse relative I à l'entrée du réseau (Voir Figure 7).

Pour cette étude, on considère comme expression fonctionnelle pour l'invariant I la différentielle entre la vitesse actuelle et la vitesse en régime d'équilibre (le modèle Aw-Rascle-Zhang).

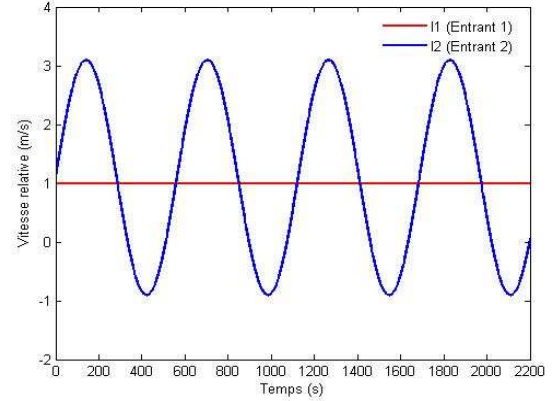


Figure 7. Profil des vitesses relatives en fonction du temps au niveau des entrants.

Par ailleurs, on considère que les coefficients de répartition sont constants et égaux à $\beta_1 = 0.75$ et $\beta_2 = 0.25$. De même, les valeurs numériques des proportions des mouvements tournants pour chaque tronçon sont égales à: $\gamma_{e1s1} = 0.25$, $\gamma_{e1s2} = 0.20$, $\gamma_{e1s3} = 0.55$, $\gamma_{e2s1} = 0.3$, $\gamma_{e2s2} = 0.6$, $\gamma_{e2s3} = 0.1$.

Les figures 8 et 9 montrent l'évolution en fonction du temps de l'état du trafic en termes de vitesse relative et du nombre de véhicules à l'intérieur de l'intersection.

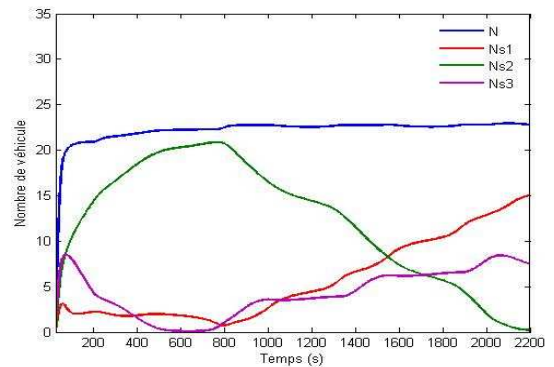


Figure 8. Evolution du nombre de véhicules à l'intérieur du nœud en fonction du temps.

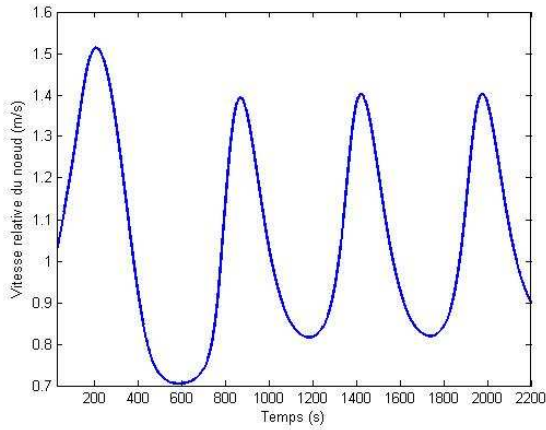


Figure 9. Evolution de la vitesse relative à l'intérieur du nœud en fonction du temps.

La Figure 10 représente l'évolution de la densité au niveau de chaque entrant de l'intersection. Comme on peut le remarquer au niveau du second entrant, la remontée de congestion est plus importante comparée à celle du premier entrant. Ce phénomène s'explique par le fait que le coefficient de répartition de ce dernier est plus élevé par conséquent le débit de trafic sortant est plus important.

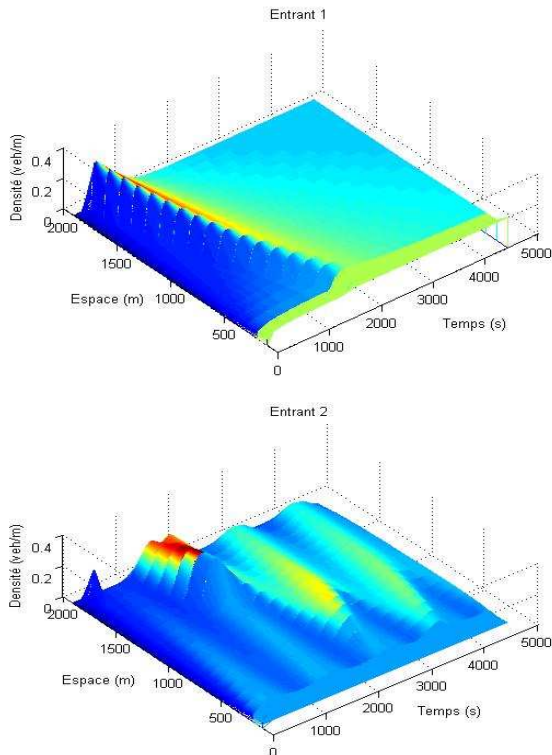


Figure 10. Evolution de la densité au niveau des entrants.

La figure 11 représente l'évolution de la densité au niveau de chaque sortant. Comme on peut le remarquer, le profil de variation de la densité au niveau des sortants est quasi identique avec le profil de variation de la vitesse relative I de l'état interne de l'intersection.

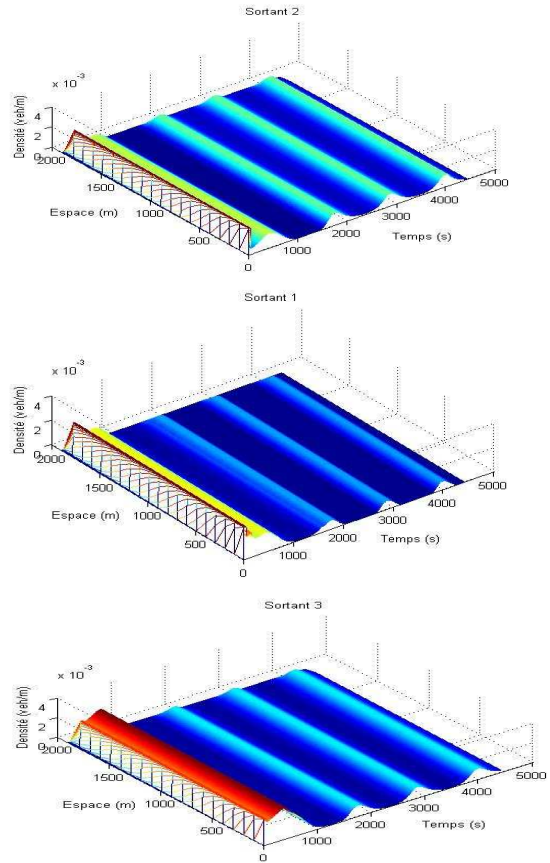


Figure 11. Evolution de la densité au niveau des sortants.

Etudions à présent l'impact de la fermeture d'une sortie d'intersection sur le comportement global de l'intersection (figure 12).

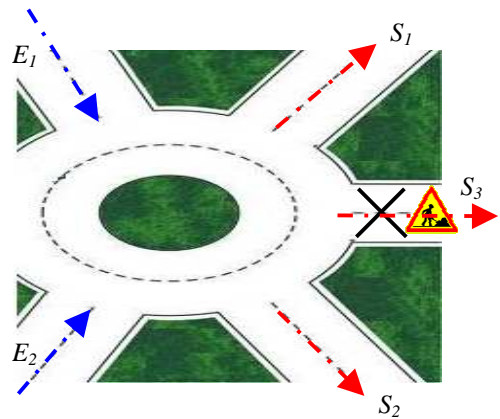


Figure 12. Impact de travaux d'aménagement sur le flux.

On considère que le réseau est toujours alimenté avec le même profil de demande qu'auparavant. Afin de reproduire le phénomène de remontée de congestion, on considère que le trafic en provenance des entrées de l'intersection et en direction de la sortie, maintenant fermée, décide de se rediriger vers la sortie 1. Les figures 13 et 14 donnent l'évolution de l'état interne de l'intersection en terme de la vitesse relative et du nombre de véhicules.

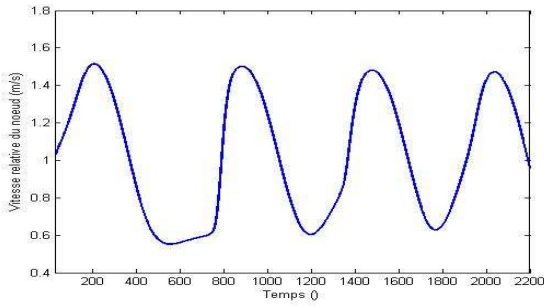


Figure 13. Evolution de la vitesse relative à l'intérieur du nœud en fonction du temps.

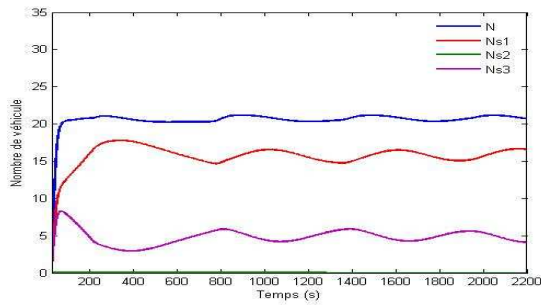


Figure 14. Evolution du nombre de véhicules à l'intérieur du nœud en fonction du temps.

L'évolution de la densité en fonction du temps au niveau des entrants illustre bien le phénomène de remontée de congestion à travers l'intersection. Ce phénomène est plus accentué au niveau de l'un des entrants dont le coefficient de répartition est le moins élevé.

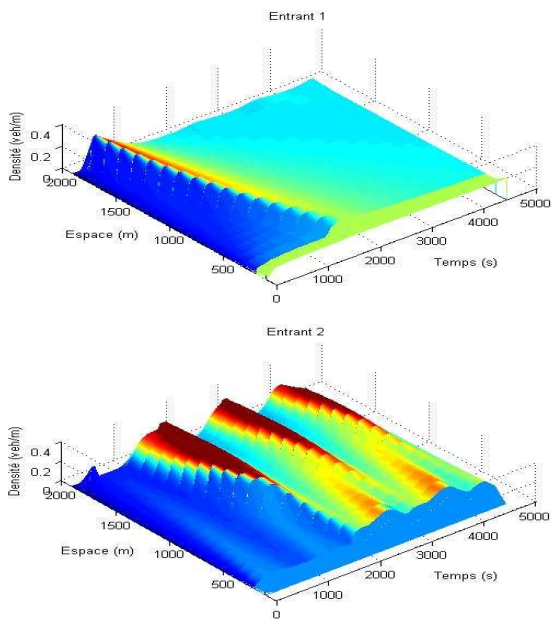


Figure 15. Influence des travaux d'aménagement sur la densité de trafic.

La figure 16 illustre la propagation de la congestion à travers les deux sortants. Comparée à la figure 11, la congestion est nettement plus forte.

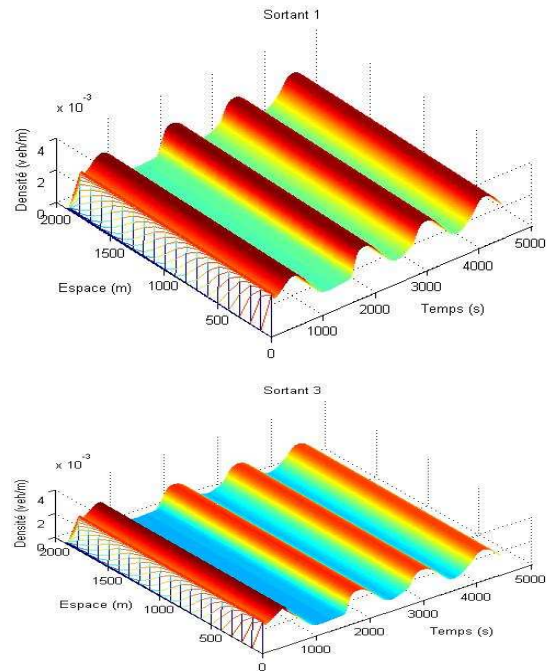


Figure 16. Propagation de la congestion au niveau des sortants.

5. CONCLUSION

Les modèles d'intersections sont très utiles non seulement pour la simulation des réseaux routiers de grandes tailles mais également pour l'élaboration de stratégies de contrôle du trafic tel que le contrôle d'accès. Le modèle d'intersections basé sur le modèle macroscopique du second ordre GSOM que nous proposons est à la fois simple et robuste. La démarche de modélisation d'intersections basée sur le modèle GSOM et les notions d'offre et de demande permet une bonne formulation des conditions aux limites. Actuellement, ce modèle fait l'objet d'une intégration dans la plateforme de simulation multi-modèles de trafic MAGISTER développée par l'Institut National de Recherche sur les Transports et leurs Sécurité (INRETS).

REFERENCES

- Aw and M. Rasclé, 2000. Resurrection of Second Order Models of Traffic flow. *SIAM J. Appl. Math.*, 60(3):916-938.
- Bourrel, E. and V. Henn, 2002. Mixing micro and macro representation of traffic flow : a first theoretical step. *Proceeding of the 9th Meeting of the Euro Working Group on transportation, Polytechnic of Bari, Italy.*

- Coclite G.M. and B. Piccoli, 2002. Traffic flow a road network. Technical Report, SISSA.
- Colombo, R, 2002 Hyperbolic phase transitions in traffic flow. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, **63**(2), 708-721.
- Garavello, M. and B. Piccoli, 2006. Traffic flow on road network using the Aw-Rascle model. *Communications on Partial Differential Equations*, vol. 31, p. 243-275.
- Kröner, D, 1997. Numerical schemes for conservation laws. *Wiley Teubner*.
- Lebacque J.P, 1996. The Godunov scheme and what it means for first order traffic flow models. In: *Transportation and Traffic Theory, proceeding of the 13 ISTTT* (J.B. Lesort ed.). 647-677, Elsevier.
- Lebacque J.P, 2002. A two phase extension of the LWR model based on the boundedness of traffic acceleration, dans Taylor M.A.P. (dir.), *Transportation and Traffic Theory in the 21st Century*, Pergamon Press, New York, p. 697-718, 2002.
- Lebacque, J.P., Khoshyaran, M.M. (1998-2002). Macroscopic flow models. Presented at the *6th Meeting of the EURO Working Group on Transportation*. Published in "*Transportation planning: the state of the art*" (Editors: M. Patriksson, M. Labbé), 119-139. Kluwer Academic Press.
- Lebacque J.P. and M. M. Khoshyaran, 2005. First order macroscopic traffic flow models: Intersection modeling, network modeling. *Transportation and Traffic Theory*, Flow, Dynamics and Human Interaction, Elsevier, Amsterdam.
- Lebacque J.P., S. Mammar and H. Haj-Salem, 2005. Second order traffic flow modeling: the Riemann problem resolution using supply/demand based approach. *Proceedings of the Euro Working Group on Transportation*. Poznan.
- Lebacque, J.P, S. Mammar and H. Haj-Salem, 2007. Generic second order traffic flow modeling. *Proceeding of ISTTT (International Symposium on Transportation and Traffic Flow theory)*, London.
- Lighthill, M.H. and G.B. Whitham, 1955. On kinematic waves II: A theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of Royal Society of London*, vol. A229, P. 317-345.
- Magne, L., S. Rabut, and J. F. Gabard, 2000. Toward an hybrid macro and micro traffic flow simulation model. *INFORMS spring 2000 meeting, Salt Lake City, Utah, U.S.A.*
- Mammar, S., J.P. Lebacque and H. Haj-Salem, 2005. Second order traffic flow modeling: the Riemann problem resolution in homogeneous case without relaxation term. *Proceedings of the Euro Working Group on Transportation*. Poznan.
- Mammar, S., J.P. Lebacque and H. Haj-Salem, 2006a. Intersection modeling based on the second order traffic flow model (ARZ). *Proceedings of the 11th Euro Working Group on Transportation (EWGT)*, Italie-Bari.
- Mammar, S., J. P. Lebacque, and H. Haj-Salem, 2006b. A hybrid Model Based on a Second Order Traffic Model. *Transportation Research Board*.
- Mammar, S., J. P. Lebacque, and H. Haj-Salem, 2006c. Highway traffic hybrid macro-micro simulation model. *11th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems*, 2006.
- Payne, H.J., 1971. Models of freeway traffic and control. *Simulation Council Proceedings* 1, chapter 6.
- Poschinger, A., R. Kates, and H. Keller, 2002. Coupling of concurrent macroscopic and microscopic traffic flow models using hybrid stochastic and deterministic disaggregation. *Transportation and Traffic Theory for 21st century : Proceeding of the 15th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, M.A.P Taylor ed., Pergamon, Oxford.
- Ross, P., 1988. Traffic Dynamics. *Transportation Research Part B*, Vol 22B, n°6, p. 421-435.
- Treiber, M. and D. Helbing, 2001. Microsimulations of Freeway Traffic Including Control Measures. *Automatisierungstechnik*, 49 :478-484.
- Zhang, H.M., 1998. A Theory of Nonequilibrium Traffic Flow. *Transportation Research Part B*, Vol 32, p. 485-498.
- Zhang, H.M., 2002. A Non-Equilibrium Traffic Model Devoid of Gas-Like Behaviour. *Transportation Research Part B*, Vol 36, p. 275-290.