



UNIVERSITÉ NATIONALE SUPÉRIEURE DE TECHNOLOGIE, INGÉNIERIE ET MATHÉMATIQUES

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE GÉNIE MATHÉMATIQUE ET MODÉLISATION

MÉMOIRE DE FIN DU CYCLE D'INGÉNIEUR

SPÉCIALITÉ : INFORMATIQUE, LOGISTIQUE ET RECHERCHE OPÉRATIONNELLE

Modélisation du Trafic Routier au Bénin : Approche Macroscopique et Extension du Modèle ARZ



Présenté par :
AHOUANYE Eloum

Sous la direction de :
Pr. Directeur de mémoire

Cotonou, 6 mai 2025

Table des matières

Table des figures

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte et Problématique Générale

La modélisation du trafic routier est devenue un outil essentiel pour la planification et la gestion des infrastructures de transport à travers le monde. Elle permet notamment d'anticiper les congestions, d'optimiser les flux de véhicules, d'évaluer les impacts des politiques de transport et d'améliorer la sécurité routière [placeholder_traffic_modeling_importance]. Dans un contexte de croissance urbaine rapide et de ressources souvent limitées, comme celui du Bénin, ces outils sont particulièrement précieux pour guider un développement durable et efficace des systèmes de transport.

Cependant, la modélisation du trafic dans les économies en développement présente des défis uniques [Chao4]. Le réseau routier béninois, en particulier, est caractérisé par des spécificités qui rendent l'application directe des modèles de trafic classiques, souvent développés pour des contextes de pays industrialisés, particulièrement difficile :

Chapitre 2

Revue de la Littérature

2.1 Vue d'ensemble des approches de modélisation du flux de trafic

L'étude de la dynamique du trafic routier repose sur diverses approches de modélisation, classées principalement en trois catégories selon leur niveau de granularité : **microscopiques**, **macroscopiques** et **mésoscopiques**.

Les modèles **microscopiques** se concentrent sur le comportement individuel des véhicules et de leurs conducteurs, simulant les interactions directes telles que le suivi de véhicule (car-following) et les changements de voie¹. Ils offrent un niveau de détail élevé, permettant d'analyser l'impact des comportements individuels sur le flux global, mais deviennent computationnellement coûteux pour les grands réseaux². Des exemples incluent les modèles stimulus-réponse, les modèles basés sur des points d'action, et les modèles d'automates cellulaires [Dago07]. Le modèle **Lighthill-Whitham-Richards** (LWR), développé indépendamment dans les années 1950, est le pionnier des approches macroscopiques³. Il repose sur le principe fondamental de la **conservation du nombre de véhicules** [Leb93], exprimé par l'équation de continuité :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = 0$$

où $\rho(x, t)$ est la densité et $q(x, t)$ est le débit à la position x et au temps t ⁴.

Une hypothèse clé est l'existence d'une relation d'équilibre statique entre le débit, la densité et la vitesse moyenne v , souvent appelée **diagramme fondamental** : $q = \rho v$ et $v = V_e(\rho)$, où $V_e(\rho)$ est la vitesse d'équilibre, fonction décroissante de la densité [Leb93]. L'équation du modèle devient alors :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_e(\rho))}{\partial x} = 0$$

⁵.

Limitations critiques : Malgré sa simplicité et sa capacité à décrire les ondes de choc, le modèle LWR présente des limitations majeures :

-
1. https://en.wikipedia.org/wiki/Traffic_flow
 2. https://en.wikipedia.org/wiki/Traffic_flow
 3. https://en.wikipedia.org/wiki/Traffic_flow
 4. https://www.civil.iitb.ac.in/tvm/nptel/541_Macro/web/web.html
 5. https://www.civil.iitb.ac.in/tvm/nptel/541_Macro/web/web.html

Chapitre 3

Caractéristiques du Trafic Routier au Bénin

Ce chapitre présente les caractéristiques uniques du trafic routier au Bénin, en mettant l'accent sur le contexte socio-économique, l'état des infrastructures, la composition du parc automobile dominé par les motos, leurs comportements spécifiques, et les défis qui en découlent pour la modélisation mathématique.

3.1 Contexte Socio-Économique et Défis du Transport

Le Bénin, comme de nombreux pays d'Afrique de l'Ouest, connaît une urbanisation rapide et une croissance démographique soutenue. Selon les données agrégées de la Banque Mondiale, basées sur les statistiques de l'Institut National de la Statistique et de l'Analyse Économique (INSAE), la population urbaine du Bénin représentait **47.86%** de la population totale en 2019 [Wor19], avec une concentration particulière dans les villes du littoral comme Cotonou, Porto-Novo, Abomey-Calavi, ainsi que Parakou dans le nord.

Cette urbanisation s'accompagne d'une demande croissante en mobilité, dans un contexte où les infrastructures peinent à suivre le rythme de développement. Le Bénin doit faire face à plusieurs défis majeurs dans le secteur des transports :

Chapitre 4

Extended Multiclass ARZ Model Formulation for Benin

Ce chapitre est dédié à la formulation mathématique détaillée du modèle macroscopique de trafic routier proposé pour le contexte béninois. Comme établi dans la revue de la littérature (Chapitre ??), les modèles de premier ordre comme le LWR sont insuffisants pour capturer la complexité dynamique observée, notamment les phénomènes hors équilibre et l'hétérogénéité marquée du parc de véhicules. Le modèle Aw-Rascle-Zhang (ARZ) [Aw+00; ZLZ03] a été identifié comme une base théorique plus appropriée en raison de ses propriétés mathématiques avantageuses et de sa capacité intrinsèque à modéliser l'anisotropie, l'hystéresis et les ondes *stop-and-go* [FHS14; YK24].

L'objectif de ce chapitre est de construire une *extension multi-classes* de ce cadre ARZ, spécifiquement conçue pour intégrer les caractéristiques distinctives du trafic au Bénin, telles que décrites au Chapitre ?. Cela inclut la prédominance écrasante des motocyclettes (Zémidjans), leurs comportements spécifiques (gap-filling, interweaving, creeping), et l'impact de la qualité variable de l'infrastructure routière.

4.1 Base Multiclass ARZ Framework Selection

La première étape cruciale dans la formulation du modèle est de reconnaître l'impératif d'une approche **multi-classes**. Le trafic au Bénin, comme démontré au Chapitre ??, est caractérisé par une **hétérogénéité extrême**, où les motocyclettes constituent la majorité écrasante du flux (souvent plus de 70-80% en milieu urbain [Djo]) et coexistent avec des voitures particulières, des camions, des bus et des tricycles. Les différences fondamentales en termes de taille, de capacités dynamiques (accélération, freinage), de manœuvrabilité, et surtout de comportements de conduite (voir Section ??) entre les motos et les autres véhicules rendent tout modèle homogène (qui suppose un seul type de véhicule ou des comportements moyennés) intrinsèquement incapable de reproduire fidèlement la dynamique observée [WW02]. L'utilisation d'un modèle multi-classes permet de distinguer explicitement les propriétés et les interactions de différents groupes de véhicules.

Plusieurs approches existent pour étendre le modèle ARZ à un cadre multi-classes [BCo3;

[[FW15](#); [CM20](#)]. Pour ce travail, nous adoptons une formulation courante qui consiste à écrire un système d'équations ARZ pour chaque classe de véhicules, où les interactions entre les classes sont modélisées à travers les dépendances des fonctions clés (comme la vitesse d'équilibre et la fonction de pression) par rapport à l'état global du trafic (densités et/ou vitesses de toutes les classes).

Compte tenu de la dichotomie majeure observée au Bénin, nous considérerons initialement **deux classes** principales :

Chapitre 5

Mathematical Analysis and Numerical Implementation

Après avoir formulé le modèle ARZ multi-classes étendu pour le trafic routier au Bénin (Chapitre ??), ce chapitre se consacre à son analyse mathématique fondamentale et à la description de la méthode numérique choisie pour sa résolution. Comprendre les propriétés mathématiques du système d'EDP est essentiel pour assurer la **validité de la modélisation** – c'est-à-dire sa capacité à décrire de manière cohérente les phénomènes de propagation – et pour sélectionner un schéma numérique **stable et précis** pour les simulations. L'analyse portera sur l'hyperbolilité, la structure des ondes (via l'analyse caractéristique) et la stabilité linéaire. Ensuite, nous détaillerons le schéma numérique basé sur la méthode des volumes finis, y compris le traitement des termes sources et des dépendances spatiales. Enfin, nous aborderons brièvement les aspects de l'implémentation pratique.

5.1 Mathematical Properties of the Extended Model

Le modèle étendu (Section ??) est un système de quatre équations aux dérivées partielles du premier ordre, non linéaires et couplées, pour le vecteur d'état $U = (\rho_m, w_m, \rho_c, w_c)^T$. Il peut s'écrire sous forme quasi-linéaire :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + A(U) \frac{\partial U}{\partial x} = S(U, x) \quad (5.1.1)$$

où $A(U)$ est la matrice Jacobienne du système et $S(U, x)$ est le vecteur des termes sources (relaxation et potentiels effets liés à la dépendance spatiale de $R(x)$ dans $V_{e,i}$). L'analyse des propriétés mathématiques se concentre sur la matrice $A(U)$ et ses caractéristiques propres (valeurs et vecteurs propres).

5.1.1 Hyperbolicity

Définition et Importance : Un système de la forme (??) est dit **hyperbolique** si, pour tout état U pertinent, la matrice Jacobienne $A(U)$ est diagonalisable et possède un ensemble complet de **valeurs propres réelles**. Il est dit **strictement hyperbolique** si ces valeurs propres

réelles sont également distinctes. L'hyperbolicité est une propriété mathématique fondamentale car elle garantit que le problème de Cauchy (problème aux valeurs initiales) est localement bien posé, permettant ainsi des **simulations numériques fiables** à partir d'un état initial donné. De plus, elle assure que l'information se propage à des vitesses finies et réelles, données par les valeurs propres (vitesses caractéristiques), ce qui est **conforme à la physique** des écoulements de trafic où les effets ne peuvent se transmettre instantanément [LeVo2]. Vérifier cette propriété est donc une première étape essentielle pour valider la structure mathématique du modèle.

Analyse du Système Étendu : Pour déterminer la matrice Jacobienne $A(U)$, nous réécrivons le système (??) [...] (calculs inchangés menant à) :

$$A(U) = \begin{pmatrix} v_m - \rho_m P'_m(\rho_{eff,m}) & \rho_m & -\rho_m \alpha P'_m(\rho_{eff,m}) & 0 \\ 0 & v_m & 0 & 0 \\ -\rho_c P'_c(\rho) & 0 & v_c - \rho_c P'_c(\rho) & \rho_c \\ 0 & 0 & 0 & v_c \end{pmatrix}$$

Condition d'Hyperbolicité : La matrice $A(U)$ est bloc triangulaire inférieure. Ses valeurs propres sont donc les valeurs propres des blocs diagonaux 2×2 : $\lambda_1 = v_m$, $\lambda_2 = v_m - \rho_m P'_m(\rho_{eff,m})$, $\lambda_3 = v_c$, $\lambda_4 = v_c - \rho_c P'_c(\rho)$. Le système possède donc **quatre valeurs propres réelles**. La condition usuelle pour la validité des modèles ARZ, reflétant le fait que les conducteurs réagissent négativement à une augmentation de densité, est que $P'_m > 0$ et $P'_c > 0$ pour les densités considérées. Sous ces conditions physiques standards, qui devront être assurées par le choix des fonctions P_m et P_c lors de la calibration, le système est **hyperbolique** (potentiellement non strictement). [...] (Discussion sur la perte de stricte hyperbolicité inchangée). Le fait crucial est que, sous ces conditions physiques, le système est bien hyperbolique, confirmant sa **capacité fondamentale à modéliser la propagation d'ondes** dans le trafic. La dépendance spatiale de $R(x)$ dans les termes sources $S(U, x)$ ne modifie pas l'hyperbolicité du système, qui est une propriété de la partie homogène.

5.1.2 Eigenvalues and Characteristic Speeds

Les quatre valeurs propres (vitesses caractéristiques) réelles du système, dont l'existence a été garantie par l'analyse d'hyperbolicité, sont explicitement :

$$\lambda_1 = v_m = w_m - P_m(\rho_{eff,m}) \quad (5.1.2)$$

$$\lambda_2 = v_m - \rho_m P'_m(\rho_{eff,m}) \quad (5.1.3)$$

$$\lambda_3 = v_c = w_c - P_c(\rho) \quad (5.1.4)$$

$$\lambda_4 = v_c - \rho_c P'_c(\rho) \quad (5.1.5)$$

Interprétation Physique et Utilité : Ces valeurs propres ne sont pas seulement des objets mathématiques ; elles représentent les **vitesses auxquelles les différentes informations ou perturbations se propagent** à travers le trafic modélisé.

Chapitre 6

Simulation Numérique et Analyse du Modèle ARZ Étendu

6.1 Stratégie d'Estimation des Paramètres et Jeu de Base

6.1.1 Stratégie Générale d'Estimation des Paramètres

La calibration rigoureuse d'un modèle de trafic macroscopique complexe comme le modèle ARZ multi-classes étendu développé au Chapitre ?? nécessite idéalement des données dynamiques détaillées sur le trafic réel. Ces données incluraient typiquement des mesures de densité, de vitesse et de débit par classe de véhicules (motos et autres véhicules dans notre cas) sur différents types de routes et dans diverses conditions de congestion. De telles données permettraient d'ajuster les nombreux paramètres du modèle ($\alpha, V_{creeping}, \rho_{jam}$, et les paramètres définissant les fonctions $p_i, V_{e,i}, g_i, \tau_i$) afin que les simulations reproduisent quantitativement les observations [KLH23].

Cependant, comme souligné au Chapitre ??, l'obtention de ce type de données granulaires et continues pour le trafic routier au Bénin représente un défi majeur. Les systèmes de mesure permanents (boucles inductives, caméras avec analyse d'image) sont rares, et les données disponibles via des API commerciales de trafic (comme Google Maps, TomTom ou Mapbox) sont souvent limitées en couverture géographique, en résolution temporelle, ou ne fournissent pas la décomposition par classe de véhicules essentielle pour notre approche multi-classes. Bien que des estimations de vitesse moyenne puissent parfois être obtenues via l'API Google Directions pour certains axes majeurs, leur utilisation pour une calibration quantitative complète des paramètres dynamiques (ρ, q) via des modèles intermédiaires simples (comme Greenshields) serait méthodologiquement incohérente avec notre approche de second ordre (ARZ) qui vise justement à dépasser ces modèles d'équilibre [FHS14].

Face à cette limitation en données quantitatives de calibration, une approche alternative est adoptée pour ce travail. L'objectif n'est pas d'atteindre une calibration précise et validée quantitativement sur l'ensemble du réseau béninois, mais plutôt de définir un **jeu de paramètres de base plausible** pour le modèle ARZ étendu. Ce jeu de paramètres servira de fondation pour :

Chapitre 7

Discussion et Perspectives

Ce chapitre discute les principaux résultats obtenus de la modélisation et des simulations numériques du trafic routier au Bénin à l'aide du modèle ARZ multi-classes étendu. Nous interprétons les observations à la lumière des caractéristiques spécifiques du trafic local, particulièrement la prédominance des Zémidjans et l'hétérogénéité des infrastructures. Nous évaluons ensuite les forces et faiblesses du modèle développé dans son état actuel, justifions le choix de l'approche ARZ par rapport aux modèles de premier ordre, et esquissons les implications potentielles pour la gestion du trafic au Bénin ainsi que les directions pour de futures recherches.

7.1 Interprétation des Résultats : Dynamique du Trafic Béninois selon le Modèle ARZ

L'application du modèle ARZ étendu, bien que basée sur des paramètres estimés faute de données de calibration locales, a permis de révéler et de reproduire qualitativement plusieurs aspects fondamentaux de la dynamique du trafic observée au Bénin :

Impact Fort de l'Infrastructure Hétérogène et Avantage Moto : La simulation du scénario "Route Dégradée" (Section ??) a clairement validé l'hypothèse d'un impact différentiel de la qualité de la chaussée ($R(x)$) sur les différentes classes de véhicules. Conformément aux observations terrain au Bénin où les Zémidjans naviguent plus aisément sur des voies dégradées, le modèle prédit une chute de vitesse (v_i) nettement plus importante pour les voitures (c) que pour les motos (m) lors du passage sur une section de type piste ($R=4$). Cette différence est directement liée à la paramétrisation distincte de $V_{max,m}(R)$ et $V_{max,c}(R)$. La formation d'une onde de choc stable à la transition $R=1 \rightarrow R=4$ souligne également comment les discontinuités fréquentes dans l'état du réseau béninois peuvent agir comme des goulets d'étranglement localisés, générant des congestions même en l'absence de demande excessive.

Rôle Structurant des Comportements Moto en Congestion : Le scénario "Feu Rouge / Congestion" (Section ??) a mis en évidence le rôle déterminant des comportements spécifiques des motos dans la dynamique de file d'attente. Lorsque le trafic est bloqué (0-60s), le modèle reproduit le phénomène de *creeping* : les voitures sont quasiment à l'arrêt ($v_c \approx 0$), tandis

que les motos maintiennent une faible vitesse résiduelle ($v_m \approx V_{creeping} = 5 \text{ km/h}$). Cette capacité, omniprésente dans les embouteillages de Cotonou, est rendue possible dans le modèle par la combinaison de $V_{creeping} > 0$ et du paramètre $\alpha < 1$ qui réduit la pression perçue par les motos et leur permet d'exploiter l'espace même à très haute densité globale. La dynamique de redémarrage ($t > 6\text{os}$), bien que non analysée en détail ici, est également influencée par le temps de relaxation plus court ($\tau_m < \tau_c$) attribué aux motos.

Pertinence de la Dynamique de Second Ordre : Le débogage du scénario "Feu Rouge" a montré qu'une propagation réaliste de l'onde de choc nécessitait des temps de relaxation (τ_i) très courts (0.1s). Des valeurs plus longues, bien que potentiellement plus stables, échouaient à transmettre l'information du blocage vers l'amont de manière efficace. Cela suggère que la dynamique de relaxation (temps d'adaptation non instantané), caractéristique des modèles de second ordre, joue un rôle non négligeable dans la formation rapide des congestions dans ce trafic mixte très réactif, justifiant le choix d'une approche ARZ par rapport à un modèle LWR.

Sensibilité du Modèle comme Levier de Calibration Futur : Le parcours de stabilisation des simulations (cf. `development_summary.md`) a montré la sensibilité du modèle ARZ aux paramètres de pression (K_i) et aux conditions aux limites. Loin d'être seulement une difficulté, cette sensibilité est aussi une force : elle indique que le modèle réagit de manière distincte aux variations de ces éléments. Une future calibration basée sur des données réelles pourrait donc exploiter cette sensibilité pour ajuster finement les paramètres ($K_i, \alpha, \tau_i, V_{creeping}$, etc.) afin de faire correspondre précisément les simulations à la dynamique observée spécifiquement au Bénin.

En conclusion, le modèle ARZ étendu offre un cadre théorique et numérique capable de capturer, au moins qualitativement, des interactions et des comportements (moto-infrastructure, moto-voiture en congestion, relaxation) qui sont essentiels pour décrire la complexité du trafic routier béninois, dominé par les deux-roues motorisés.

7.2 Évaluation de la Performance du Modèle

L'évaluation de la performance du modèle ARZ multi-classes développé doit tenir compte de ses points forts intrinsèques mais aussi de ses limites actuelles, principalement dues au manque de données de validation quantitative.

Points Forts :

Pertinence Phénoménologique : Le principal atout est sa capacité démontrée à intégrer et reproduire qualitativement les phénomènes spécifiques au trafic béninois (impact différentiel de $R(x)$, creeping des motos en congestion, formation de chocs/raréfactions) grâce à l'approche ARZ multi-classes et aux extensions proposées ($\alpha, V_{creeping}, V_{max,i}(R)$...).

Base Théorique (Second Ordre) : Intègre nativement la dynamique hors-équilibre (relaxation via τ_i) et l'anticipation (pression via p_i), offrant une description plus riche que les modèles de premier ordre.

Implémentation Validée Numériquement : Le code Python développé a passé avec succès

les tests de validation numérique de base (convergence ordre 1 attendu, conservation de masse, positivité), assurant la correction fondamentale du schéma FVM/CU/Splitting implementé.

Flexibilité et Extensibilité : Le modèle et l'architecture du code sont conçus pour pouvoir être étendus (ajout de classes, fonctions plus complexes, réseau).

Limits et Points Faibles :

Absence de Calibration/Validation Quantitative (Limite Majeure) : L'utilisation de paramètres estimés limite fortement la capacité prédictive quantitative du modèle. Les résultats actuels sont qualitatifs et leur correspondance exacte avec les débits, vitesses ou temps de parcours réels au Bénin est inconnue. C'est la limitation principale de ce travail dans son état actuel.

Sensibilité et Stabilité Numérique : Le modèle a montré une sensibilité aux paramètres (K_i) et aux CL, nécessitant un débogage approfondi. Le besoin de τ_i très courts pour certains scénarios pose question sur la robustesse générale ou la justesse physique de ces valeurs extrêmes.

Artefact Numérique (Dépassement ρ_m) : Le schéma du premier ordre, surtout avec τ faible, génère un dépassement non physique de la densité moto ($\rho_m > \rho_{jam}$) au front du choc dans le scénario "Feu Rouge". Bien que localisé, cet artefact limite la précision dans les régimes de chocs forts.

Simplifications du Modèle Physique : Le caractère unidimensionnel, l'agrégation des "autres véhicules", la représentation simplifiée de l'infrastructure (indice R), et l'absence de modèle d'intersection testé sont des simplifications par rapport à la réalité complexe du trafic.

Le modèle constitue donc une base prometteuse mais nécessite impérativement une confrontation à des données réelles pour affiner ses paramètres et valider sa capacité prédictive quantitative.

7.3 Implications Potentielles pour la Gestion du Trafic au Bénin

Malgré son stade de développement actuel (non calibré quantitativement), le modèle ARZ étendu et les simulations réalisées offrent des éclairages qualitatifs pertinents pour les gestionnaires et planificateurs des transports au Bénin :

Quantifier l'Impact de l'Infrastructure : Le scénario "Route Dégradée" illustre comment le modèle pourrait, *une fois calibré*, être utilisé pour évaluer l'impact d'une amélioration de revêtement (passage de $R=3/4$ à $R=1/2$) non seulement sur les vitesses mais aussi sur la capacité et la formation de congestions. Par exemple, on pourrait simuler l'effet de l'asphaltage d'un tronçon critique et estimer la réduction du temps de parcours ou l'augmentation du débit maximal, fournissant des arguments quantitatifs pour prioriser les investissements (en lien avec les objectifs d'infrastructure du PAG).

Adapter la Régulation au Trafic Mixte : La simulation du "Feu Rouge" montre l'importance du comportement moto ($V_{creeping}, \alpha, \tau_m$) dans la dynamique des files d'attente. Cela implique que les méthodes classiques de dimensionnement des carrefours (calcul des temps

de vert, capacité des ronds-points) basées sur des véhicules standards pourraient être inadaptées. Le modèle pourrait aider à tester des stratégies de régulation qui tiennent compte de cette forte proportion de motos (ex : phases de feux spécifiques, zones de stockage avancées).

Comprendre la Congestion "Réelle" : La capacité à simuler le creeping suggère que la congestion au Bénin n'est peut-être pas un arrêt total mais un écoulement très lent et hétérogène. Mieux modéliser cet état pourrait affiner les estimations de l'impact réel de la congestion sur l'économie ou l'environnement.

Tester des Scénarios d'Aménagement : À terme, le modèle pourrait simuler l'impact de modifications locales (ajout d'une voie, création d'un rond-point) sur un segment ou un petit réseau, en fournissant une vision plus réaliste que les modèles statiques grâce à la prise en compte de la dynamique ARZ et du comportement moto.

Ces implications soulignent le potentiel d'un outil de simulation adapté au contexte local, même si son développement complet nécessite encore des étapes de validation importantes.

7.4 Directions pour les Recherches Futures

Ce travail constitue une première étape ; de nombreuses directions peuvent être explorées pour l'améliorer et l'exploiter :

Priorité Absolue : Calibration et Validation Quantitative : Collecter des données réelles (vitesses, débits, densités par classe via caméras/analyse vidéo) sur différents types de routes et conditions de trafic au Bénin pour calibrer rigoureusement les paramètres ($\alpha, V_{creeping}, K_i, \gamma_i, \tau_i$) et valider quantitativement les prédictions du modèle.

Amélioration Numérique (Ordre Supérieur et Chocs) : Implémenter un schéma d'ordre supérieur (MUSCL+SSP-RK) pour réduire la diffusion et mieux capturer les fronts de choc. Investiguer l'artefact de dépassement de densité $\rho_m > \rho_{jam}$ et le résoudre, potentiellement en explorant des fonctions de pression alternatives ou des techniques de limitation physique.

Modélisation et Simulation Réseau : Implémenter un modèle d'intersection robuste (basé sur Section ?? et les données OSM 'traffic') et étendre les simulations à des réseaux représentatifs de villes béninoises (utilisant OSM 'places', 'roads', 'oneway').

Analyse de Sensibilité Approfondie : Réaliser l'analyse de sensibilité paramétrique prévue pour quantifier l'impact des paramètres estimés sur les résultats.

Affinement des Fonctions Physiques : Explorer des formes fonctionnelles plus élaborées pour P_i, g_i, τ_i , potentiellement basées sur des micro-simulations ou des données comportementales plus fines.

Ces développements permettraient de transformer le modèle actuel en un outil prédictif fiable pour l'aide à la décision en matière de transport au Bénin.