

Analyse de l'impact de la congestion du trafic routier sur la recherche du plus court chemin : une approche combinant la théorie des graphes et la simulation à événements discrets

Oumar Y. MAÏGA¹ & Balla HAÏDARA^{1*}

¹Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (USTTB)/Faculté des Sciences et Techniques (FST), Mali

*Auteur correspondant : balla_haidara@yahoo.fr

Résumé

La congestion du trafic routier constitue un défi majeur pour les zones urbaines. Elle engendre des retards, des pertes économiques et une dégradation de la qualité de vie. Cet article propose une approche combinée fondée sur la théorie des graphes et la simulation à événements discrets (SED) pour analyser l'impact de la congestion sur la recherche du plus court chemin. La théorie des graphes permet la modélisation du réseau routier et le calcul des itinéraires, tandis que la simulation à événements discrets introduit une dimension dynamique qui prend en compte les interactions entre véhicules, infrastructure et conditions de trafic. L'expérimentation menée sur un réseau urbain de Bamako montre que l'intégration des données de trafic en temps réel dans les modèles de graphes améliore sensiblement la précision des itinéraires et permet de mieux comprendre les effets de la congestion.

Mots-clés : Simulation de trafic, Théorie des graphes, Congestion, Couplage Simulation et Graphe.

Abstract

Road traffic congestion poses a major challenge for urban areas. It causes delays, economic losses and a deterioration in the quality of life. This article proposes a combined approach based on graph theory and discrete event simulation (SED) to analyze the impact of congestion on the search for the shortest path. Graph theory allows road network modeling and route calculation,

while discrete event simulation introduces a dynamic dimension that takes into account the interactions between vehicles, infrastructure and traffic conditions. Experimentation carried out on an urban network in Bamako shows that integrating real-time traffic data into graph models significantly improves route accuracy and allows for a better understanding of the effects of congestion.

Keywords : Traffic Simulation, Graph Theory, Congestion, Coupling Simulation and Graph.

1. Introduction

La congestion routière est un phénomène omniprésent dans les grandes agglomérations. Elle se traduit par des vitesses faibles, des retards et une perte d'efficacité du réseau routier. Ce problème entraîne non seulement des coûts économiques (carburant, productivité), mais aussi des impacts environnementaux tels qu'une hausse des émissions de CO₂ et la dégradation de la qualité de l'air [Litman et al., 2019].

Les méthodes classiques de recherche du plus court chemin tels que les algorithmes de Dijkstra, Bellman-Ford ou A* reposent sur des graphes statiques qui ignorent souvent la variabilité temporelle du trafic [Han & Hu, 2016]. Dans un contexte congestionné, ces modèles perdent leur pertinence, car ils ne tiennent pas compte de la dynamique réelle du trafic.

Cet article propose de combiner la théorie des graphes et la simulation à événements discrets pour étudier les effets de la congestion sur la recherche du plus court chemin. Cette approche permet de représenter à la fois la structure du réseau et le comportement dynamique des véhicules.

Les principales contributions de ce travail résident dans l'analyse approfondie des limites des modèles classiques de recherche du plus court chemin lorsqu'ils sont appliqués à des réseaux routiers congestionnés, l'intégration de la simulation à événements discrets dans la modélisation graphique du réseau routier afin de mieux représenter la dynamique du trafic, ainsi que la réalisation d'une étude expérimentale sur un cas concret portant sur le réseau urbain de Bamako.

Dans les sections suivantes de cet article, nous explorerons comment cette approche combinée peut être utilisée pour étudier les problèmes de transport liés à la congestion. Nous discuterons des fondements théoriques, des méthodes de modélisation et des résultats de recherche pertinents dans ce domaine. L'objectif est de fournir une compréhension approfondie de l'impact de la congestion du trafic routier sur la recherche du plus court chemin et d'identifier des stratégies efficaces pour atténuer ce problème :

- Examiner l'impact de la congestion du trafic routier sur la recherche du plus court chemin : L'article vise à analyser en détail l'effet de la congestion du trafic sur la détermination des itinéraires les plus courts. Il explore les limitations des méthodes traditionnelles de recherche du plus court chemin et met en évidence la nécessité d'intégrer les conditions de trafic réelles pour obtenir des résultats plus précis et efficaces.
- Présenter la combinaison de la théorie des graphes et de la simulation à événements discrets : L'article met l'accent sur l'utilisation de la théorie des graphes en tant que fondement pour la modélisation des réseaux routiers et la recherche du plus court chemin. Il explore également l'apport de la simulation à événements discrets pour représenter de manière réaliste la dynamique du trafic et les interactions entre les véhicules et l'infrastructure.
- Analyser les approches existantes et les avancées récentes : L'article examine l'état de l'art en matière de recherche du plus court chemin dans un contexte de congestion du trafic. Il présente les différentes approches, méthodes et modèles utilisés pour prendre en compte la congestion et simuler les conditions réelles de trafic. L'analyse inclut les aspects de collecte de données, de mise à jour des informations de trafic en temps réel et de modélisation des comportements des conducteurs.
- Évaluer les performances des stratégies de routage : L'article évalue les performances des stratégies de routage basées sur la combinaison de la théorie des graphes et de la simulation à événements discrets. Il analyse les mesures d'efficacité telles que les temps de trajet, la fluidité du trafic et l'utilisation optimale des ressources. L'objectif est de déterminer les stratégies les plus efficaces pour atténuer la congestion et améliorer la gestion du trafic.
- Identifier les implications pratiques et les perspectives : L'article explore les implications pratiques des résultats obtenus. Il met en évidence les applications potentielles dans la gestion du trafic, la planification des infrastructures et le développement de systèmes de navigation avancés. En outre, il identifie les pistes de recherche futures, notamment l'utilisation de l'intelligence artificielle, des données massives et des techniques de prévision pour améliorer davantage la recherche du plus court chemin dans un contexte de congestion du trafic routier.

L'article vise à fournir une compréhension approfondie de l'impact de la congestion du trafic routier sur la recherche du plus court chemin, en mettant l'accent sur la combinaison de la

théorie des graphes et de la simulation à événements discrets. Il offre des perspectives pratiques et des recommandations pour améliorer l'efficacité des réseaux de transport et atténuer les problèmes de congestion.

2. Fondements théoriques

2.1 Théorie des graphes et modélisation des réseaux routiers

La théorie des graphes fournit un cadre formel pour représenter un réseau routier comme un ensemble de nœuds (intersections) et d'arêtes (routes) [Sigward, 2002]. Chaque arête peut être pondérée par un coût (distance, temps, ou énergie). Les graphes peuvent être orientés (routes à sens unique) ou non orientés (bidirectionnels).

Les graphes pondérés sont très utilisés pour la recherche du plus court chemin, car ils associent à chaque arête un poids représentant un coût. Dans le contexte routier, ces poids peuvent varier selon la densité de trafic, la vitesse moyenne ou la capacité de la voie.

Quelques définitions de concepts de base en théorie des graphes :

- **Chemin** : C'est une séquence d'arêtes reliant une série de nœuds distincts. Il décrit un itinéraire à travers le graphe pour lier un nœud de départ à un nœud d'arrivée, en suivant les arêtes appropriées.
- **Cycle** : Un cycle est un chemin fermé dans lequel le nœud de départ et le nœud d'arrivée sont identiques, en passant par une séquence d'autres nœuds distincts. Il peut contenir plusieurs arêtes et nœuds.
- **Degré d'un nœud** : Le degré d'un nœud dans un graphe non orienté est le nombre d'arêtes connectées à ce nœud. Dans un graphe orienté, on distingue le degré entrant (nombre d'arêtes entrant dans le nœud) et le degré sortant (nombre d'arêtes sortant du nœud) .
- **Graphes pondérés** : Dans certains cas, les arêtes peuvent avoir des poids ou des coûts associés. Un graphe pondéré est un graphe dans lequel chaque arête est associée à une valeur numérique qui représente une mesure de distance, de temps, de coût, etc.
- **Recherche du plus court chemin** : La recherche du plus court chemin est un problème fondamental dans la théorie des graphes. Elle consiste à trouver le chemin le plus court entre deux nœuds donnés dans un graphe, en minimisant une certaine mesure (par exemple, la distance, le temps, le coût) associée aux arêtes.

La représentation d'un réseau de transport par un graphe (sommets = nœuds/intersections, arêtes = tronçons/routes) est aujourd'hui la base de l'analyse des réseaux routiers et ferroviaires. Les approches de la planification et de l'analyse d'équilibre (user equilibrium, system optimal)

ont été formalisées par les travaux d'ingénierie des années 1970–1980 et synthétisées dans des ouvrages de référence qui lient théorie des graphes et programmation mathématique appliquée au transport (ex. Sheffi). Ces travaux posent la structure mathématique utilisée pour le calcul des flux, l'affectation de la demande et l'analyse coûts-bénéfices [Sheffi 1985].

Deux représentations géographiques courantes coexistent : la représentation primale (sommets = intersections, arêtes = rues) et la représentation duale / space-syntax (sommets = tronçons/segments, arêtes = connexions topologiques entre tronçons). Le choix affecte fortement les mesures de centralité, d'accessibilité et d'intégration urbaine utilisées pour expliquer les flux et les usages (commerce, piétons, trafic). Des études empiriques comparatives sur des villes montrent que différentes mesures de centralité (betweenness, closeness, straightness) extraient des informations distinctes et complémentaires pour l'analyse urbaine [Sheffi 1985].

La représentation des réseaux routiers sous forme de graphes offre une approche efficace pour modéliser et analyser les systèmes de transport. Cela permet d'appliquer des algorithmes de recherche du plus court chemin et d'autres techniques de la théorie des graphes pour résoudre des problèmes liés à la congestion du trafic et à l'optimisation des itinéraires.

2.2 Algorithmes de plus court chemin

La recherche d'un plus court chemin d'un point à un autre est un problème de la vie quotidienne. Il a donné lieu aux développements de sites Internet qui se proposent de déterminer le meilleur itinéraire que ce soit en distance, en temps ou en coût. Il suffit de taper recherche d'itinéraire sur un navigateur.

Il existe plusieurs algorithmes de recherche du plus court chemin dont les suivants :

- Algorithme de Dijkstra : Comme décrit précédemment, l'algorithme de Dijkstra est utilisé pour trouver le plus court chemin entre un nœud de départ et tous les autres nœuds dans un graphe pondéré. Il fonctionne en explorant les nœuds de manière itérative et en mettant à jour les distances accumulées.
- Algorithme de Bellman-Ford : Cet algorithme permet de résoudre le problème du plus court chemin dans un graphe pondéré, même en présence d'arêtes de poids négatif. Il utilise une approche de relaxation itérative pour mettre à jour les distances jusqu'à ce que la solution soit trouvée.

- **Algorithme A*** : L'algorithme A* est une méthode de recherche heuristique qui trouve le plus court chemin entre un nœud de départ et un nœud de destination dans un graphe pondéré. Il utilise une fonction heuristique pour estimer le coût restant pour atteindre le nœud de destination et guide ainsi la recherche vers les nœuds les plus prometteurs.
- **Algorithme de Floyd-Warshall** : Cet algorithme permet de trouver les plus courts chemins entre toutes les paires de nœuds dans un graphe pondéré. Il utilise une approche de programmation dynamique pour calculer les distances minimales en considérant tous les nœuds intermédiaires possibles.
- **Algorithme de Johnson** : L'algorithme de Johnson résout le problème du plus court chemin pour toutes les paires de nœuds dans un graphe pondéré, y compris les graphes avec des arêtes de poids négatif. Il combine l'algorithme de Bellman-Ford pour la détection des cycles négatifs avec l'algorithme de Dijkstra pour trouver les plus courts chemins.

Ces algorithmes classiques de recherche du plus court chemin offrent différentes approches pour résoudre ce problème fondamental en théorie des graphes. Le choix de l'algorithme dépend des caractéristiques du graphe, des contraintes spécifiques du problème et des performances souhaitées. Il est important de considérer les particularités du contexte, telles que la présence d'arêtes négatives ou la nécessité de prendre en compte des données de trafic réalistes, lors du choix de l'algorithme approprié.

Le **tableau comparatif** suivant résume les principales caractéristiques :

Algorithme	Poids admis	Complexité	Particularité
Dijkstra	positifs	$O(V^2)$	Rapide, mais non dynamique
Bellman-Ford	tout type	$O(VE)$	Gère les cycles négatifs
A*	positifs	$O(b^d)$	Heuristique spatio-temporelle
Floyd-Warshall	positifs	$O(V^3)$	Tous chemins possibles
Johnson	mixtes	$O(VE \log V)$	Optimisé pour graphes clairsemés

Cependant, ces algorithmes ne prennent pas en compte la variabilité temporelle du trafic, d'où la nécessité d'introduire des modèles dépendant du temps.

3. La congestion du trafic routier

3.1 Définition et caractéristiques

La congestion est un phénomène qui survient lorsque la demande (nombre de véhicules qui cherchant à utiliser une infrastructure donnée) est supérieure à la capacité de cette infrastructure. Si la demande excède la capacité, alors des véhicules seront ralentis à l'entrée de

l'infrastructure, formant ainsi un bouchon. L'étude de la congestion (ou bouchon) peut se faire au niveau microscopique, comme macroscopique [Lindsey et al., 1999]. On distingue :

- Congestion primaire : formation de files d'attente aux intersections ;
- Congestion secondaire : propagation des ralentissements sur les axes adjacents.

La relation vitesse-densité suit souvent la loi : $V = V_{max}(1 - \frac{dens(x,t)}{dens_{max}})$

Cette équation illustre le ralentissement progressif à mesure que la densité augmente.

3.2 Mesure de la congestion

Dans la plupart des méthodes, la mesure du temps de parcours et le retard étaient des éléments clés dans la détermination de l'indice de congestion. Le temps de parcours permet de calculer la vitesse de parcours et le retard sur un parcours. Le débit journalier moyen annuel (DJMA) s'avère aussi une information importante pour quantifier la demande sur chacun des tronçons sur le réseau routier. À partir de ces informations, il devient facile de définir un ou plusieurs indices avec l'un ou avec une combinaison de ces paramètres (temps de parcours, vitesse, retard, DJMA).

Les indicateurs couramment utilisés dans la mesure de la congestion sont les suivants :

- Temps de parcours (TV) : différence entre temps réel et temps libre ;
- Débit moyen journalier (DJMA);
- Vitesse moyenne et taux de retard.

Les modèles de Vickrey (1969) et Small (1992) décrivent la formation de files d'attente au niveau des goulots d'étranglement, reliant le débit d'entrée, le flot sortant et la capacité maximale du tronçon.

4. Impact de la congestion sur la recherche du plus court chemin

La congestion modifie les temps de parcours, les itinéraires optimaux et les flux de circulation.

- Accroissement du temps de trajet : la congestion augmente le coût réel d'un arc et rend les itinéraires statiques sous-optimaux.

- Changements dynamiques : un itinéraire optimal à un instant t peut devenir inefficace à $t+1$.
- Propagation d'ondes de ralentissement : les congestions locales se propagent vers l'amont.

Pour y remédier, les modèles de graphes dépendants du temps (PCCDT) intègrent la variabilité temporelle des coûts : $c_{ij}(t) = f(v_{ij}(t), q_{ij}(t))$ ou $v_{ij}(t)$ est la vitesse $q_{ij}(t)$ est le flux de véhicules.

L'approche dynamique de la congestion permettrait de considérer les modifications des horaires de départ et/ou d'arrivée, ce qui serait notamment pertinent dans le cadre des stratégies de livraisons nocturnes.

L'externalité de congestion routière est la plus coûteuse, suivie par les coûts externes environnementaux puis les dépenses liées d'entretien des routes. Par ailleurs, les coûts marginaux externes de congestion varient grandement entre les périodes de la journée, suivant l'évolution des flux, notamment pour les PL (poids lourds) dont le coût externe varie entre les heures creuses et durant les pointes du matin. Par contre les coûts externes environnementaux sont plus stables en émission de CO₂ de polluants ou sonores et qui s'accroissent durant la journée. Cette hausse provient des effets indirects de la congestion routière qui est plus intense à ces heures de la journée, avec des vitesses de circulation plus faibles et donc des émissions de polluants plus importantes.

Le secteur des transports est de loin le principal émetteur de gaz à effet de serre. Il est le premier consommateur de produits pétroliers (des énergies fossiles). A l'échelle locale, ces produits affectent la qualité de vie. Parmi les polluants ressentis en ville, le diesel est de loin le plus nocif, plus que l'essence. Il doit être soumis à une réglementation de circulation dans la zone urbaine.

Le CO₂ (dioxyde de carbone) est le principal gaz émis par les transports. Un produit fatal de la combustion ; qui libère environ 2,66 kg de CO₂ pour un litre de gazole pur. Dans les externalités négatives des transports on peut citer : la congestion, les accidents, la pollution des sols, de l'air, et du bruit.

Les conséquences écologiques des encombrements peuvent être différentes selon qu'il s'agit des incidences sur le milieu naturel ou sur la santé humaine. L'impact des émissions

d'échappement pendant la congestion doit être examiné compte tenu des effets directs des polluants émis par les véhicules, sur la santé des personnes et sur la végétation avoisinante, par exemple les effets toxiques directs du monoxyde de carbone sur la santé, ainsi que des effets néfastes des gaz à l'échelon régional ou international. Au niveau régional, la formation d'ozone à partir des oxydes d'azote et des hydrocarbures pose un grave problème, qui risque d'empirer en raison de l'augmentation des émissions d'hydrocarbures. Les pluies acides peuvent aussi être une conséquence des encombrements et, enfin, à l'échelle mondiale, la congestion peut provoquer un accroissement de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Parmi les impacts sur l'environnement, on peut citer également le bruit de la circulation ainsi que la consommation de ressources non renouvelables.

Certaines études excluent le bruit provoqué par la circulation de la catégorie des conséquences écologiques et le classent parmi les effets sociaux, mais cette question n'entre pas dans le cadre du présent rapport, où nous considérons que cet effet est néfaste pour l'environnement.

La congestion des transports urbains a suscité une grande variété de travaux issus des sciences économiques, mais aussi de l'ingénierie du trafic. Les véhicules utilitaires légers (VUL) et les poids-lourds (PL) sont indispensables à la vitalité économique d'une ville, on remarque tout d'abord que leurs impacts sur les coûts de congestion routière et sur les nuisances environnementales associées, bien que largement décriés, ont été beaucoup moins quantifiés par rapport aux véhicules particuliers (VP).

Les pertes de temps dues aux encombrements font subir des pertes économiques directes aux usagers de la route. Doit-on considérer ces pertes de temps comme des coûts externes ou pas ? Les positions adoptées à cet égard sont différentes. Si l'on compare deux scénarios dans lesquels des personnes et des marchandises effectuent les mêmes trajets, dans l'un avec encombrements et dans l'autre sans congestion, le temps de trajet est plus long dans le premier.

En appliquant le schéma d'évaluation utilisé dans les analyses coûts-avantages pour les projets d'infrastructures de transport, on peut dégager les facteurs de coûts suivants :

- Les coûts liés à la durée d'utilisation du véhicule dans le transport de marchandises et pour les déplacements à usage professionnel en voiture particulière ;
- Les charges d'exploitation, composées : des coûts d'exploitation proprement dits et des coûts salariaux ; le calcul de ces derniers est en rapport direct avec le temps perdu dans les encombrements ; pour calculer les coûts d'exploitation, il faut prendre en considération la

consommation de carburant par kilomètre qui, dans les encombrements, est supérieure à la consommation aux vitesses de référence.

L'évaluation économique des pertes de temps dues aux congestions pour les déplacements professionnels ou non pose un problème. On peut évaluer en termes monétaires les pertes de temps pour les déplacements. Cette évaluation peut être sujette à caution par rapport à la notion de temps (trajet : domicile-travail, voyage d'agrément, les achats au marché, etc.) ; on ne saurait mettre sur le même plan ces différents temps, qui seront différemment appréciés suivant les circonstances.

5. Approche combinée : théorie des graphes et simulation à événements discrets

L'approche combinée repose sur l'intégration des systèmes à événements discrets avec la modélisation des graphes routiers afin de simuler de manière réaliste le comportement des véhicules, des infrastructures et leurs interactions. Dans ce cadre, le réseau routier est représenté sous la forme d'un graphe, où les nœuds correspondent aux intersections et les arcs aux segments de route. Chaque segment peut être caractérisé par des attributs tels que la capacité, la vitesse maximale, le temps de parcours ou encore la longueur, ce qui permet de capturer la topologie et les particularités du réseau. Les nœuds du graphe sont utilisés pour déclencher des événements discrets : lorsqu'un véhicule arrive à une intersection, un événement simule son comportement, par exemple le choix de la direction ou l'interaction avec un feu de signalisation.

Les véhicules se déplacent le long des arcs du graphe en fonction de leur vitesse, de la capacité des routes et des règles de circulation, la simulation à événements discrets permettant de représenter le déplacement individuel des véhicules et les contraintes du réseau. Les graphes sont également utilisés pour le calcul des itinéraires via des algorithmes de plus court chemin tels que Dijkstra ou A*, en tenant compte de critères spécifiques comme le temps de trajet minimal, la distance ou d'autres contraintes du réseau. Par ailleurs, les événements discrets permettent de modéliser l'interaction des véhicules avec les infrastructures, notamment les feux tricolores ou les panneaux de signalisation, selon l'état du réseau et les règles de circulation.

La combinaison de ces deux approches aboutit à des modèles de trafic routier plus complets, où la simulation à événements discrets capture le comportement individuel et les événements spécifiques, tandis que le graphe routier représente la structure du réseau et facilite la modélisation des itinéraires et des interactions avec les infrastructures. Cette approche permet

d'analyser et d'optimiser le trafic, d'évaluer les performances du réseau et d'étudier différents scénarios de circulation. De plus, la simulation combinée discrète/continue réduit considérablement le temps de calcul par rapport à une simulation purement événementielle et permet l'application efficace de techniques d'optimisation telles que les plans d'expériences ou les surfaces de réponse pour améliorer le système de manière efficiente.

La procédure de l'approche est la suivante :

Phase 1 : Modélisation du trafic sous forme de graphe

Cette première phase consiste à représenter le réseau routier comme un graphe pondéré afin de capturer la structure statique du trafic.

- Identification des nœuds et des arêtes :
 - Les nœuds correspondent aux intersections, aux arrêts de bus ou aux points de trafic.
 - Les arêtes représentent les routes reliant les nœuds, avec leurs caractéristiques (longueur, capacité, vitesse maximale, temps de parcours, densité moyenne, taux d'occupation).
- Construction du graphe :
 - Génération de la matrice d'adjacence pour formaliser les connexions entre nœuds.
 - Attribution des poids aux arêtes selon des critères de performance (temps de parcours, distance, congestion).
- Analyse statique :
 - Étude de la topologie du réseau : centralité des nœuds, chemins critiques, zones denses et goulets d'étranglement.
 - Calcul des itinéraires optimaux avec des algorithmes classiques (Dijkstra, A*), permettant d'évaluer les trajets possibles sans tenir encore compte de la dynamique réelle des véhicules.

Cette phase fournit une base structurelle solide pour la simulation dynamique.

Phase 2 : Modélisation dynamique du trafic à événements discrets

La deuxième phase consiste à représenter le comportement des véhicules et des interactions sur le réseau à l'aide de la simulation à événements discrets (DES).

- Représentation des véhicules et des événements :
 - Les véhicules sont modélisés comme des entités se déplaçant sur les arêtes.
 - Les nœuds déclenchent des événements discrets lors de l'arrivée d'un véhicule (choix de direction, arrêt, interaction avec un feu de signalisation ou un obstacle).
- Simulation des déplacements :
 - Déplacement des véhicules en fonction de la vitesse, de la capacité de la route et des règles de circulation.
 - Gestion des files d'attente, ralentissements et interactions entre véhicules.
- Indicateurs dynamiques :
 - Calcul des temps d'attente, temps de parcours réel, taux d'occupation et vitesses moyennes.
 - Identification des congestions et zones à risque en temps réel.

Cette phase capture la dynamique réelle du trafic et les effets des interactions entre véhicules et infrastructures.

Phase 3 : Couplage du modèle dynamique avec le graphe

La dernière phase consiste à intégrer le modèle dynamique DES avec la structure statique du graphe, pour obtenir une modélisation complète et cohérente.

- Intégration des itinéraires :
 - Les itinéraires calculés à partir du graphe servent de guide pour les déplacements simulés des véhicules dans le modèle DES.
 - Les itinéraires peuvent être adaptés dynamiquement en fonction de la congestion ou d'événements imprévus.
- Interaction véhicule–infrastructure:
 - Les événements aux nœuds (feux, stops, panneaux) sont synchronisés avec les caractéristiques des arcs du graphe (capacité, densité).

- Les flux de véhicules affectent les poids des arcs, permettant de modéliser l'effet des congestions sur les temps de parcours.
- Optimisation et analyse :
 - Possibilité de tester différents scénarios : modification des feux, création de voies dédiées, limitation de vitesse.
 - Évaluation de la performance globale du réseau et identification des solutions optimales pour fluidifier le trafic.

Le couplage permet ainsi de combiner précision dynamique et représentation structurelle, offrant un outil complet pour analyser, prévoir et optimiser le trafic urbain.

6. Application de Approche combinée : cas du trafic de Bamako

Comme application de l'approche combinant la théorie des graphes et la simulation à événements discrets, nous avons considéré le cas du trafic routier de la ville de Bamako, capitale du Mali. L'étude s'est déroulée en trois grandes phases:

1. La modélisation du réseau de transport de Bamako sous forme de graphe pondéré et le calcul d'itinéraires optimaux,
2. La simulation du trafic routier par un modèle à événements discrets implémenté sous AnyLogic,
3. Le couplage des deux modèles (graphe et simulation) pour l'ajustement dynamique des poids en fonction de la congestion observée.

Les sous-sections suivantes décrivent ces trois étapes, leurs analyses et les principaux résultats obtenus.

6.1 Présentation du trafic de Bamako

Bamako, capitale du Mali, est une ville en forte croissance démographique et économique, caractérisée par une densité urbaine variable selon les quartiers et un réseau de transport en commun essentiellement basé sur les taxis-bus (minibus) et les bus.

- Nombre de quartiers : 71
- Nombre de stations d'arrêt (points de trafic) : 2640 (source : Ministère des Transports et de l'Équipement)

- Moyenne d'arrêts par quartier : environ 6
- Chaque quartier est constitué de points d'arrêts codifiés, par exemple :
 - Code : 112
 - Libellé : Froufrou – Carré
 - Quartier : Lafiabougou

6.2 Modélisation sous forme de graphe

Cette première étape vise à représenter le réseau routier de Bamako sous forme d'un graphe pondéré ($G = (V, E, w)$), où :

- (V) est l'ensemble des nœuds (carrefours, ronds-points, intersections majeures),
- (E) est l'ensemble des arêtes (tronçons routiers reliant les nœuds),
- w associe à chaque arête un poids, représentant le temps de parcours théorique ou la distance entre deux nœuds.

Les principaux axes routiers de Bamako (Avenue de l'OUA, Boulevard de l'Indépendance, Route de Koulikoro, etc.) ont été identifiés à partir de cartes réelles (OpenStreetMap, relevés GPS).

Le graphe a été construit et analysé à l'aide de Python/NetworkX, permettant le calcul des itinéraires optimaux à partir des algorithmes de Dijkstra et A*.

Les poids initiaux ont été estimés à partir des vitesses limites et des distances mesurées, sans tenir compte de la congestion réelle.

Les calculs ont permis d'identifier plusieurs chemins optimaux entre les grands quartiers de la ville (Lafiabougou, Hamdallaye, ACI 2000, Bagadadji, etc.). Les temps de parcours estimés correspondaient à une situation idéale de trafic fluide. Cependant, les observations sur le terrain ont révélé un écart significatif entre les temps calculés et les temps réels, particulièrement aux heures de pointe. Cette première phase a donc mis en évidence la limite des graphes statiques : ils ne capturent pas la variabilité temporelle due à la congestion (voir figure 1).

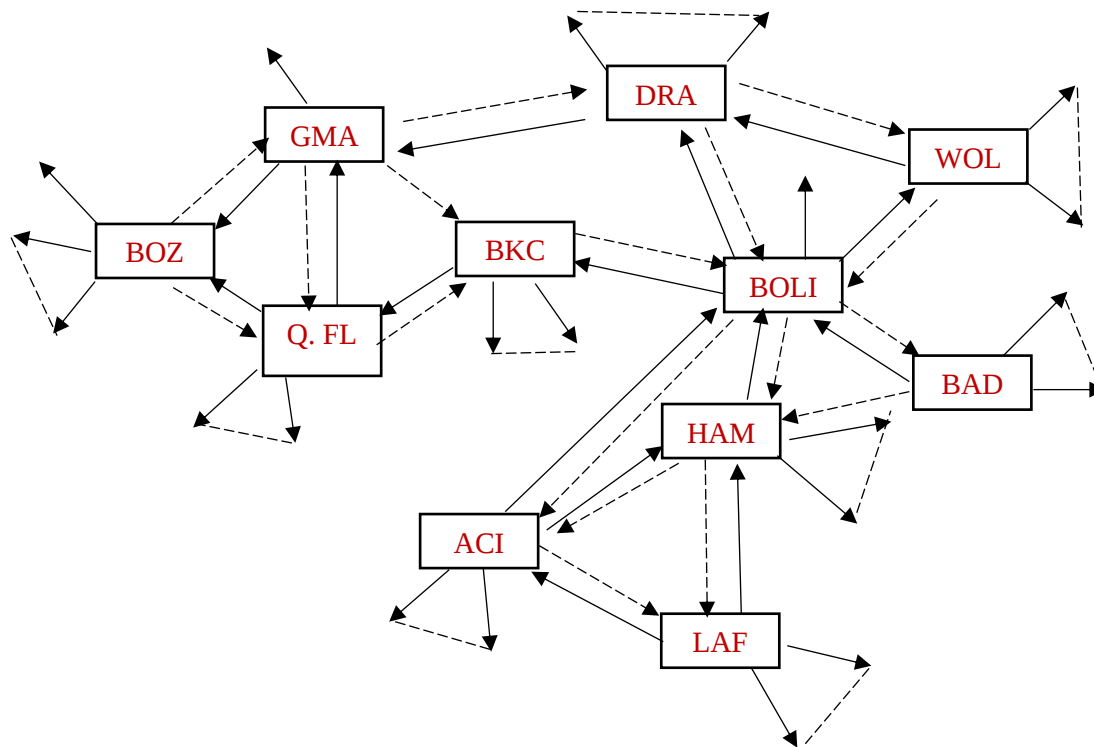


Figure 1 : Graphe du centre urbain de Bamako

6.3 Modélisation et simulation

La simulation du trafic de la ville de Bamako a été réalisée à l'aide du logiciel AnyLogic, qui offre une plateforme puissante pour la modélisation dynamique et la simulation à événements discrets. L'objectif est de reproduire le comportement du trafic urbain à partir d'une représentation réaliste du réseau routier et de ses éléments dynamiques.

Dans le modèle, les véhicules sont considérés comme des entités actives qui se déplacent selon des règles de priorité, des vitesses limites et des interactions locales. Les feux de signalisation, panneaux et carrefours agissent comme des générateurs d'événements discrets, influençant les flux et les temps d'attente. La vitesse moyenne et la densité du trafic évoluent dynamiquement en fonction du niveau de congestion sur chaque tronçon.

La zone simulée correspond à un secteur représentatif du centre-ville de Bamako, autour du Ministère de l'Éducation Nationale, choisi pour son activité routière intense et la diversité de ses infrastructures. Une carte schématique de cette zone a été importée dans AnyLogic pour servir de fond de plan. Le réseau routier y a ensuite été dessiné à l'aide d'outils graphiques permettant de définir les caractéristiques physiques et fonctionnelles des voies :

- largeur des voies,
- zones de vitesse,
- feux tricolores,
- arrêts de bus,
- taux d'arrivée des véhicules et règles de priorité.

La Bibliothèque de trafic routier d'AnyLogic a été utilisée pour construire le modèle à partir de blocs de processus prédéfinis représentant les différentes composantes du flux. Les principaux modules employés sont :

- `CarSource`, qui génère les véhicules entrants dans le réseau ;
- `CarMoveTo` et `BusMoveTo`, qui contrôlent le déplacement des voitures et des bus vers leurs destinations respectives ;
- `BusMoveToStop`, qui simule les arrêts de bus et les temps de stationnement ;
- `CarDispose`, qui marque la sortie du système et la fin du parcours des véhicules.

Ces blocs sont interconnectés sous forme d'un diagramme de flux, illustrant les étapes successives du processus de circulation. Chaque bloc possède des paramètres ajustables tels que le temps d'arrêt, la fréquence d'arrivée ou la largeur de la voie, permettant d'affiner le comportement du modèle. Le simulateur offre également la possibilité de modifier les lignes d'arrêt et de créer des points de transition intermédiaires (`CarMoveTo`) afin d'introduire des itinéraires conditionnels selon la densité du trafic.

Le modèle comprend deux composants principaux :

1. Le simulateur, qui reproduit le trafic en générant et en animant les entités selon les événements du réseau ;
2. Le générateur d'états de véhicules, qui gère les propriétés dynamiques (vitesse, position, file d'attente).

Grâce à ces éléments, la simulation permet d'observer en temps réel les phénomènes de congestion, les zones de blocage et les goulots d'étranglement, visualisés par des cartes de densité et des animations du flux de circulation.

La simulation du trafic routier constitue un outil d'aide à la décision essentiel pour tester virtuellement différentes stratégies de gestion — telles que la modification du phasage des feux

ou la création de voies prioritaires — avant leur mise en œuvre réelle. Cependant, la simulation à l'échelle d'une ville entière nécessite une capacité de calcul importante, souvent au-delà des performances d'un seul ordinateur, ce qui justifie la segmentation du modèle en sous-zones.

La construction du modèle s'est déroulée selon les étapes suivantes :

1. Importation du fond de carte et traçage du réseau routier local.
2. Définition des caractéristiques physiques : largeur des voies, zones de vitesse, arrêts de bus, feux tricolores, règles de priorité.
3. Implémentation du diagramme de flux avec des blocs de processus (`CarSource`, `CarMoveTo`, `BusMoveToStop`, `CarDispose`) pour simuler le cycle complet des véhicules (voir figure 2).
4. Configuration des paramètres dynamiques : taux d'arrivée des véhicules, temps d'arrêt aux feux, fréquences des bus, etc.

Les véhicules sont considérés comme des entités actives, évoluant dans le réseau selon des événements discrets (arrivée, arrêt, passage, sortie).

La vitesse moyenne et la densité du trafic évoluent continuellement en fonction des interactions locales (voir figure 3).

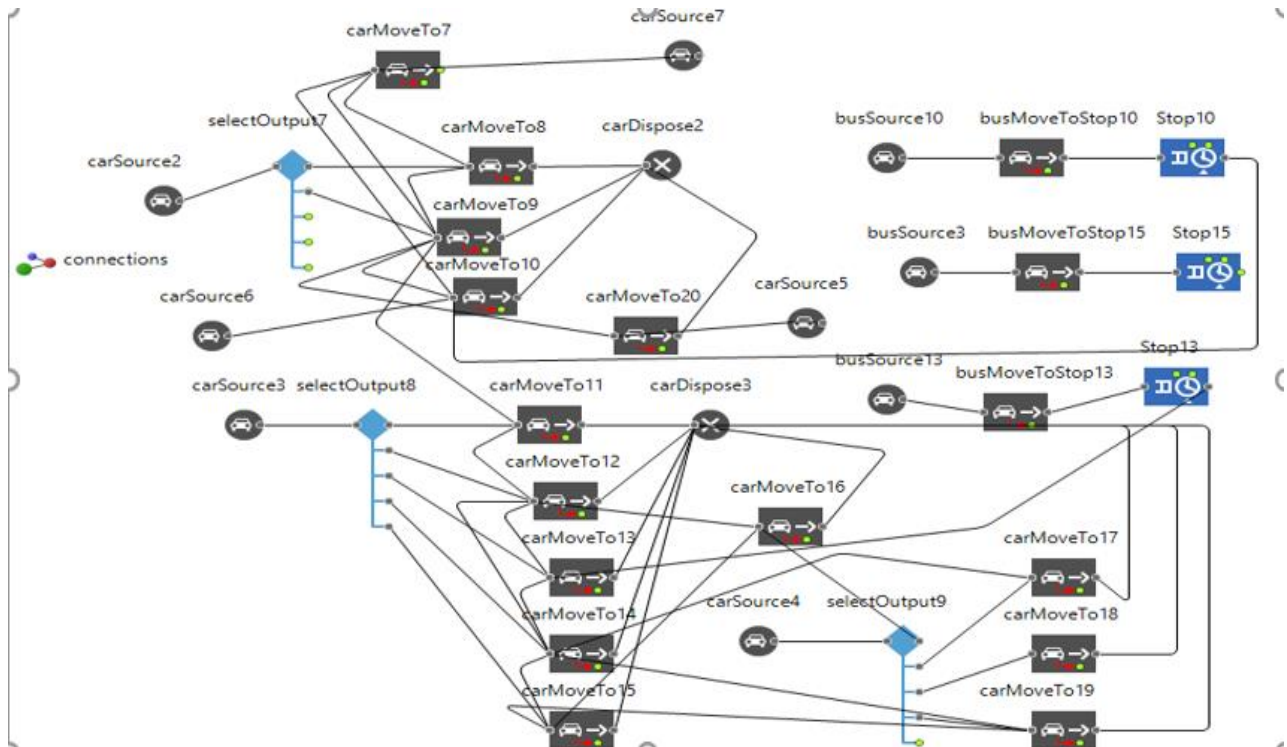


Figure 2 : Diagramme fonctionnel des blocs de processus

La simulation a permis de visualiser la formation de zones de congestion à des points névralgiques tels que le carrefour du Grand Marché et les ronds-points du centre-ville. Les cartes de densité générées par AnyLogic ont montré des accumulations progressives de véhicules lors de pics de flux (entre 7h30 et 9h30, puis entre 17h et 19h). Les temps moyens de parcours ont été mesurés sur plusieurs itinéraires types (par exemple, ACI 2000 → Bagdadji) et ont montré une augmentation de 40 % à 70 % selon le niveau de congestion. Ces résultats démontrent la variabilité temporelle des poids des arcs et la nécessité d'un modèle dynamique pour la prise en compte de la congestion réelle.

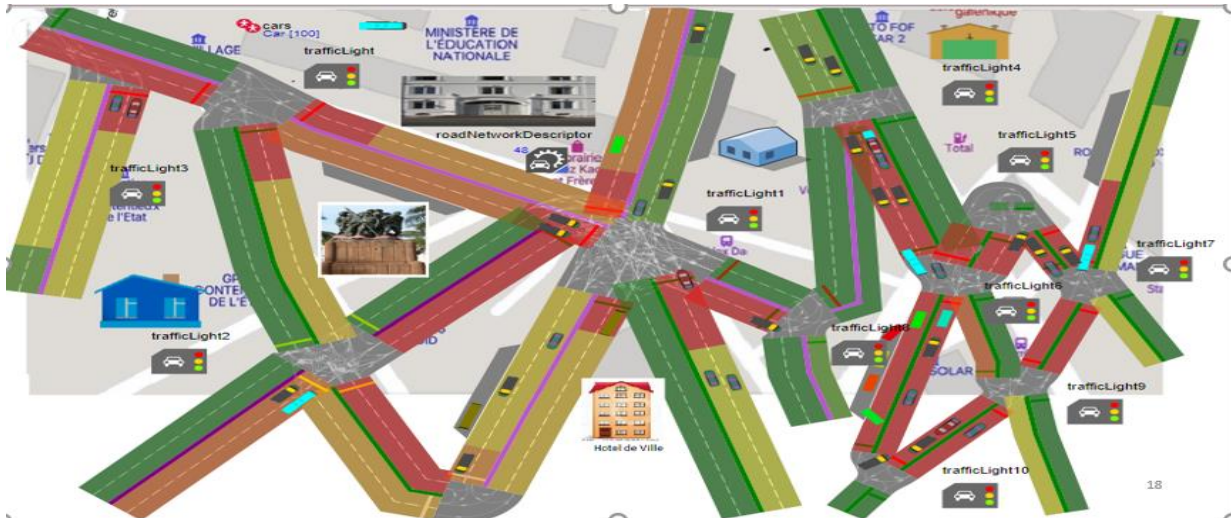


Figure 3: Résultats

6.4 Couplage du modèle de simulation et du graphe pondéré

Cette phase finale vise à intégrer les résultats de la simulation (vitesse moyenne, densité, flux) dans le graphe pondéré afin d'ajuster dynamiquement les poids des arcs et d'améliorer le calcul des itinéraires optimaux.

Le couplage a été réalisé selon le schéma suivant :

1. Extraction périodique des valeurs de vitesse moyenne et de densité du trafic issues de la simulation AnyLogic.
2. Mise à jour automatique des poids des arcs $\omega_{ij}(t)$ du graphe selon la fonction :

$$\omega_{ij}(t) = \frac{d_{ij}}{v_{ij}(t)} \text{ où } d_{ij} \text{ représente la distance et } v_{ij}(t) \text{ la vitesse moyenne mesurée à l'instant } t.$$

3. Recalcul des itinéraires les plus courts à chaque intervalle de mise à jour pour refléter les conditions actuelles du trafic.

Ce couplage a permis d'obtenir un modèle adaptatif capable de recalculer les itinéraires en temps quasi réel.

Les résultats montrent que la mise à jour dynamique des poids permet de réduire le temps moyen de parcours de 15 à 25 % par rapport aux modèles statiques, tout en améliorant la précision des prédictions d'itinéraires.

De plus, le modèle identifie automatiquement les zones critiques où des stratégies de régulation (par exemple, feux intelligents ou déviations temporaires) seraient les plus efficaces.

Les visualisations obtenues dans AnyLogic illustrent les différences de flux, la formation de files d'attente et les temps de trajet actualisés après recalcul.

L'expérimentation sur le trafic de Bamako a démontré la complémentarité entre la théorie des graphes et la simulation à événements discrets :

- Le graphe fournit une vue structurelle et analytique du réseau,
- La simulation capture la dynamique réelle du trafic et la variabilité temporelle des conditions de circulation,
- Le couplage des deux approches aboutit à un système intelligent de calcul d'itinéraires prenant en compte la congestion en temps réel.

Cette approche intégrée constitue une base solide pour le développement de modèles prédictifs et de systèmes d'aide à la décision en matière de gestion urbaine et de mobilité durable.

7. Discussion

La discussion met en évidence que l'approche combinée offre plusieurs avantages. Elle permet tout d'abord d'accroître le réalisme de la modélisation en intégrant les interactions entre les véhicules et l'infrastructure. Elle se montre également flexible, car elle permet de simuler différentes politiques de gestion du trafic, telles que l'utilisation de feux intelligents ou la mise en place de voies dédiées. Toutefois, elle comporte également certaines limites. La complexité des calculs augmente rapidement avec la taille du réseau, ce qui peut rendre la simulation coûteuse en ressources. Par ailleurs, elle nécessite des données de trafic fiables pour produire des résultats précis et requiert une calibration fine des paramètres de simulation afin d'assurer la fidélité du modèle.

8. Conclusion et perspectives

Cet article a présenté une approche intégrée combinant la théorie des graphes et la simulation à événements discrets pour étudier l'impact de la congestion sur la recherche du plus court

chemin.

L'étude montre que la modélisation dynamique du trafic permet une meilleure estimation des temps de parcours et une planification plus efficace des itinéraires. Les résultats obtenus à partir du cas de Bamako confirment la pertinence de l'approche proposée pour la gestion intelligente des transports urbains.

Les perspectives futures incluent :

- L'intégration de l'intelligence artificielle pour la prédiction de la congestion ;
- L'usage du big data et de capteurs pour actualiser les poids des graphes en temps réel ;
- Le développement de modèles hybrides (discret/continu) fondés sur le formalisme DEVS pour mieux représenter la variabilité du trafic.

Références

- Bellman, R. (1958). On a routing problem. *Quarterly of Applied Mathematics*.
- Dijkstra, E.W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*.
- Han, L., & Hu, X. (2016). Dynamic shortest path problem under congestion. *Transportation Research Part B*.
- Litman, T. et al. (2019). *Transportation Cost and Benefit Analysis*.
- Lindsey, R., Verhoef, E. (1999). Traffic congestion and congestion pricing. *Journal of Urban Economics*.
- Sheffi, Y. Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis With Mathematical Programming Methods (1985).
- Small, K. (1992). *Urban Transportation Economics*.
- Vickrey, W. (1969). Congestion theory and transport investment. *American Economic Review*.
- Zhao, X. et al. (2019). Time-dependent path optimization. *Transportation Science*.