



**HAL**  
open science

# L'évolution des réseaux urbains : une composante à part entière de la mobilité urbaine

Andréa Cynthia Santos, Christophe Duhamel

## ► To cite this version:

Andréa Cynthia Santos, Christophe Duhamel. L'évolution des réseaux urbains : une composante à part entière de la mobilité urbaine. Cahiers de la logistique, 2023, 4, pp.1-10. hal-04362981

**HAL Id: hal-04362981**

**<https://normandie-univ.hal.science/hal-04362981v1>**

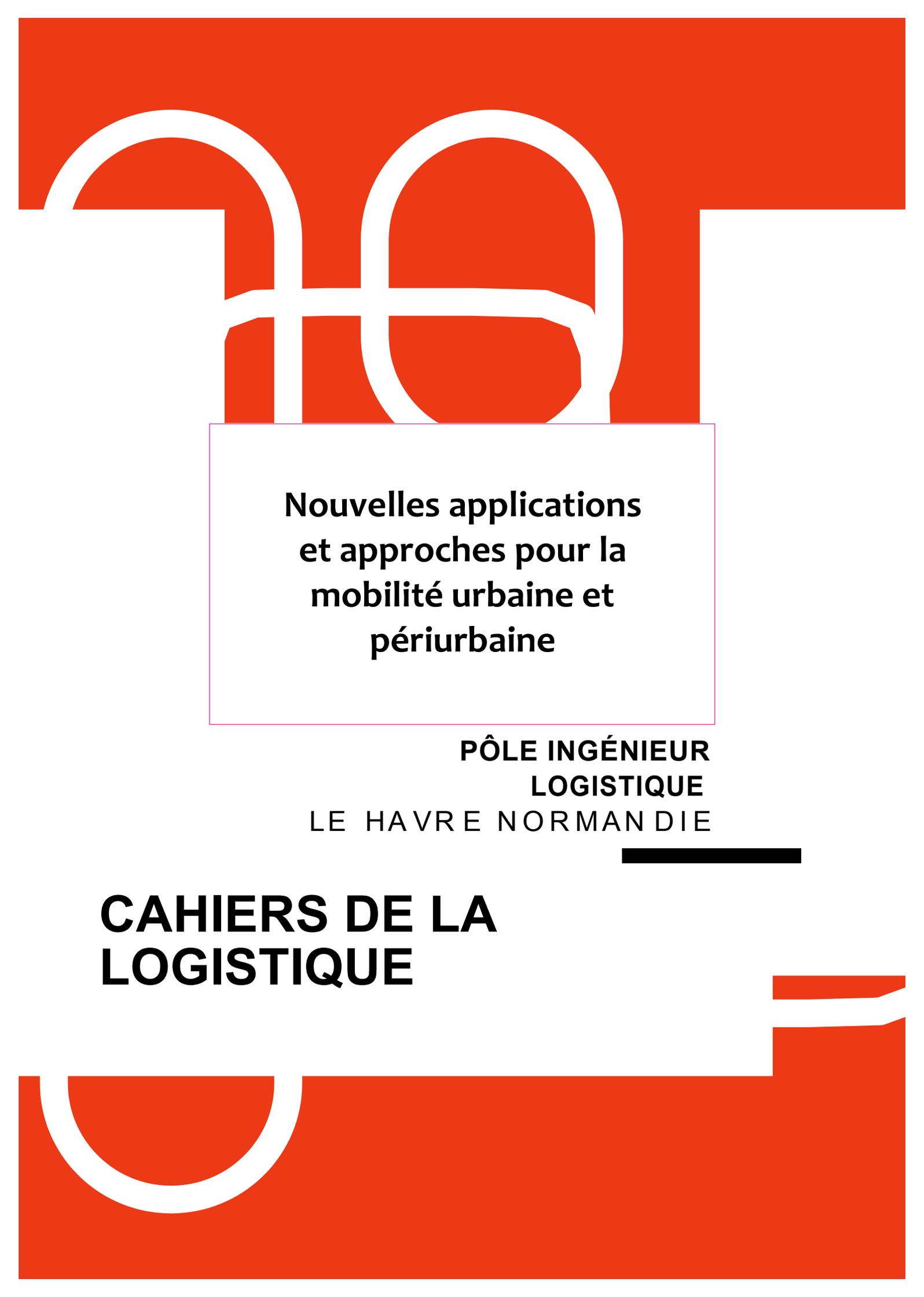
Submitted on 23 Dec 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



**Nouvelles applications  
et approches pour la  
mobilité urbaine et  
périurbaine**

**PÔLE INGÉNIEUR  
LOGISTIQUE  
LE HAVRE NORMANDIE**

---

**CAHIERS DE LA  
LOGISTIQUE**

**CAHIERS DE LA  
LOGISTIQUE  
CL2023 – N° 04**

**Nouvelles applications et approches pour  
la mobilité urbaine et périurbaine**

Décembre, 2023  
Copyright © 2023, ISEL



La présente publication est protégée par le code de la propriété intellectuelle et plus précisément ses articles relatifs au respect du droit d’auteur.

Les auteurs demeurent seuls responsables du contenu de leur œuvre. Ils garantissent disposer des autorisations nécessaires de la part des tierces parties titulaires de droits sur des œuvres partiellement ou globalement reproduites. Les droits moraux et patrimoniaux sur l’œuvre demeurent attachés à leurs auteurs.

Afin de faciliter le partage et l’utilisation de leur création, les auteurs autorisent les utilisateurs à :

- Télécharger et imprimer une copie de la présente publication à des fins d’études, de recherche, de diffusion de la culture scientifique et de partage des connaissances ;
- Distribuer gratuitement et sans aucune contrepartie l’URL identifiant la publication.

La présente publication, et l’URL associée ne peuvent en aucun cas être distribuées ou utilisées dans le cadre d’une activité à but lucratif ou à des fins commerciales. Aucune modification du contenu de l’œuvre n’est autorisée.

# L'ÉVOLUTION DES RÉSEAUX URBAINS : UNE COMPOSANTE À PART ENTIÈRE DE LA MOBILITÉ URBAINE

Andréa Cynthia Santos<sup>1</sup>, Christophe Duhamel<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LITIS, ISEL, Université Le Havre Normandie  
{andrea-cynthia.duhamel,christophe.duhamel}@univ-lehavre.fr

## RESUME

De nombreuses villes dans le monde peinent à gérer et à faire évoluer leur infrastructure de réseau urbain. L'impact sur la vie quotidienne sera de plus en plus important, en particulier à cause de la concentration croissante de population dans les zones urbaines - elle dépasse déjà la population rurale. De plus, l'étalement urbain et l'emprise des réseaux routiers ne peuvent augmenter indéfiniment, en particulier du fait du lourd impact écologique, de la réduction des surfaces agricoles et de la baisse mécanique du taux de rentabilité des investissements urbains. Dans ce contexte, proposer des solutions alternatives et efficaces pour la gestion et l'évolution des infrastructures urbaines est un défi de taille. Une possibilité sur laquelle nous nous sommes penchés concerne la reconfiguration du sens de circulation des voies afin de s'adapter aux nouvelles mobilités (voies douces), à faciliter le rééquilibrage des espaces verts (installation de couloirs verts), à améliorer le partage de cet espace parfois sur-utilisé (installation des voies dynamiques), à définir des itinéraires de déviation lors des interruptions routières, à réduire le flux sur des zones critiques telles que les centres villes (stratégies dissuasives) ou, à l'inverse à augmenter le débit des véhicules.

**MOTS CLÉS:** mobilité urbaine, réseaux urbains, optimisation, décisions tactiques.

## ABSTRACT

Many cities in the world are struggling to manage and scale their urban network infrastructure. The impact on daily life will increase significantly, especially due to the increasing density of population in urban areas, which already outnumbers the rural population overall. Moreover, the urban sprawl and road networks cannot be expanded indefinitely. In particular, such investments have a high impact on the ecological systems, they lead to the reduction of agricultural areas, and the mechanical decline in the return on investment. In this context, innovative approaches to manage, adapt and develop urban infrastructure is a challenging issue. Our studies focus on the reconfiguration of urban networks to make them evolve them along the time and also in order to take into account for example soft mobility paths, set green corridors or paths, use dynamic routes, define alternative path in case of routes unavailability, reduce the flot of vehicles in critical areas, or even in some cases, increase the flot of vehicles.

**KEYWORDS:** Urban mobility, urban networks, optimization, tactical decisions.

# 1. Introduction

De nombreuses villes dans le monde peinent à gérer et à faire évoluer leur infrastructure de réseau urbain. L'impact sur la vie quotidienne des habitants va devenir de plus en plus significatif, en particulier du fait d'une concentration croissante de population dans les zones urbaines, elle dépasse la population rurale. Bien que de nombreuses réponses aient été apportées (notamment l'amélioration des services de transport en commun, la création de zones multimodales connectées à du stationnement, l'adaptation des zones piétonnes, la mise à disposition de véhicules et de vélos en libre service), la proposition de nouvelles solutions pour l'utilisation et l'évolution des réseaux routiers reste un défi de taille.

Dans ce contexte, l'évolution dans le temps des réseaux est une composante à part entière de la mobilité urbaine. Cet aspect est un défis majeur pour de nombreuses villes dans le monde. À titre d'exemple, la ville de Paris, dont la diversité et la densité de l'offre de transport en commun est un modèle dans le monde, nécessite des aménagements constants et coûteux pour améliorer le trafic aux heures de pointe, avec des difficultés de mise en œuvre flagrantes. Même des villes nouvelles ou planifiées connaissent des problèmes pour faire évoluer leur capacité de mobilité urbaine. Par exemple, Brasília, capitale du Brésil, a été planifiée pour accueillir 500 000 habitants et pour offrir un trafic routier fluide, sans feux de circulation sur les grands axes. Or, 50 ans et environ deux millions d'habitants plus tard, la situation est très différente de ce qui était projeté : des feux de circulation ont dû être installés sur les grands axes et le trafic est fortement congestionné aux heures de pointe. Dans un autre registre, Nice et Rio de Janeiro sont des exemples des villes contraintes par la géographie. Coincés entre les montagnes et la mer, de nombreux quartiers importants constituent des goulets d'étranglement naturels et sont constamment congestionnés, induisant d'importantes nuisances sonores et de la pollution. Pour ces villes, peu de solutions permettraient une amélioration significative des flux de circulation.

Cet article compile les principaux résultats de nos travaux sur les 10 dernières années concernant le problème de gestion des réseaux routiers et de la circulation urbaine. Nous considérons le point de vue de la reconfiguration des sens de circulation qui amène par conséquent un changement des flux de circulation. Ces travaux sont à l'origine de plusieurs projets, essentiellement en région Alsace-Lorraine-Champagne-Ardenne, de l'agence nationale DRRT et des fonds européen FEDER. Les publications de référence dans des revues internationales, suite à ces travaux, sont (Almeida Coco et al., 2020), (Huang et al., 2020b, 2018, 2016) et plus récemment (Duhamel and Santos, 2024). Ces travaux traitent de l'aménagement tactique des voies de circulation dans un réseau urbain, y compris dans les zones critiques telles que les centre-villes et les sites touristiques, où l'on cherche à (re)définir les sens de circulation en évaluant globalement le coût de (re)configuration. Ce coût peut être défini selon plusieurs critères comme le temps, les distances de parcours, le débit des véhicules, les émissions de  $CO_2$  et de particules fines, etc. Différentes applications sont abordées. Elles reposent toutes sur un problème fondamental, le SNOP (*Strong Network Orientation Problem*), qui peut être enrichi de contraintes dédiées et muni d'objectifs spécifiques en fonction de l'application considérée. Nous avons traité ces problèmes sous l'angle de problème d'optimisation dans des graphes. Ils possèdent tous une contrainte impérative d'existence de chemins entre tout point du réseau pour imposer une propriété de forte connexité à la solution calculée.

Notons qu'une grande partie des travaux scientifiques et des expérimentations réalisés par les grands centres d'étude de flux de transport urbain utilisent la simulation comme outil pour

analyser des régions ou des situations cibles. Cela permet une évaluation fine des phénomènes, en considérant des aspects variés tels que la sécurité, les comportements individuels et les interactions complexes entre les différents éléments constitutifs du trafic urbain (les véhicules, les individus, et les outils de contrôle du trafic). Cependant, la simulation ne permet pas, à elle seule, l'optimisation dans une perspective globale du réseau urbain. Les deux approches sont donc complémentaires de notre point de vue car garder une vision d'optimisation globale et une approche analytique (simulation) locale permet de mieux appréhender certains phénomènes complexes. D'autant plus que des décisions locales peuvent induire des effets inverses à ceux attendus. Ainsi, autoriser une vitesse élevée peut conduire, de manière paradoxale, à des débits faibles du fait de l'apparition de phénomènes de vagues (une succession de ralentissement puis d'accélération). Ces mêmes vagues sont source de risques d'accidents accrus et de davantage de rejets de gaz polluants. De ce fait, il est souvent préférable d'imposer des réductions de vitesse, se traduisant par un flux plus lent mais aussi plus régulier et au final plus efficace en terme de durée de trajet. C'est ce qui a motivé la réduction de vitesse sur le périphérique parisien.

Dans la Section 2, nous décrivons un ensemble d'applications liées au problème de reconfiguration des réseaux urbains. Ensuite, les travaux de la littérature, ainsi que les problèmes fondamentaux d'optimisation reposant sur la théorie des graphes sont décrits dans la Section 3. Enfin, les enjeux et les perspectives futures sont fournis dans la Section 4.

## 2. Les applications liées à la reconfiguration des réseaux urbains

L'intérêt de la reconfiguration des réseaux urbains résulte de la conjonction de plusieurs facteurs : les besoins en mobilité urbaine sont en constante évolution, les impacts de l'infrastructure sur les flux sont nombreux et parfois indirects, et également, de toute évidence, les espaces physiques disponibles dans les centres urbains sont de plus en plus rares et complexes à intégrer. Parmi les applications liées à la reconfiguration des réseaux, nous pouvons citer :

**Les interruptions routières.** Les interruptions de route peuvent survenir pour plusieurs raisons : de la maintenance sur voirie, des accidents, des mauvaises conditions climatiques, des manifestations sportives, sociales, festives, culturelles, etc. Le problème de gestion des interruptions consiste alors à définir et planifier des déviations (itinéraires alternatifs) selon le type de véhicules (véhicules légers, poids lourds, transport en commun), l'échelle de temps des interruptions (heures, jours ou semaines) et les contraintes du réseau. Cela implique la redirection des flux directement impactés vers les itinéraires de contournement. Le principe général est donc de trouver des chemins alternatifs, en mettant éventuellement en place (i) des renversements de sens de circulation sur certains axes afin de maintenir la forte connexité du réseau, ou (ii) de la circulation partielle ou alternée, ou encore (iii) la transformation d'un sens unique en deux sens, si la largeur de voirie le permet. Dans ce cadre applicatif, des contraintes propres à cette application couvrent la capacité des voies et leurs limitations physiques, ainsi que des contraintes physiques telles que la capacité de giration pour les grands véhicules (poids lourds, autobus, etc.), entre autres.

**L'implantation des voies dynamiques.** Les voies dynamiques sont une alternative pour permettre une meilleure utilisation de l'espace physique et également pour répondre à des congestions ponctuelles et périodiques. Ainsi, des voies de circulation peuvent devenir des espaces de loisirs pendant des périodes spécifiques ou encore changer régulièrement de sens de circulation pour faire face à un trafic très dense aux heures de pointe. Ce type de stratégie est déjà appliquée dans

certaines villes du monde comme à Saint-Nazaire, à Hambourg et à Rio de Janeiro. Dans le cas de Rio de Janeiro, par exemple, les avenues le long des plages prestigieuses sont rendues à la population tous les dimanches pour la détente. Dans le cadre des changements périodiques, des sens de circulation, des éléments de signalisations spécifiques (notamment des feux d'autorisation d'emprunt des voies) sont implantés (voir Figure 1), de façon à permettre un changement périodique et automatique du sens de circulation, en fonction de l'heure et du débit de véhicules. L'objectif est d'absorber en partie les phénomènes tels que des déplacements massifs et quotidiens pour aller/revenir du travail (*commuting*). Dans le cadre d'utilisation des véhicules autonomes, ces voies deviennent très intéressantes car un contrôle automatique, relayé aux véhicules autonomes et connectés pourrait éviter des accidents. Ce type d'approche reste cependant un challenge pour les outils actuels de navigation intégrée, reposant souvent sur des informations statiques (outre les informations de trafic).



FIGURE 1 – Signalisation de voies dynamiques sur le pont de Saint-Nazaire en France. Crédit photo : Inconnu. Photo extraite du site : <http://www.pau-circulation.fr/2010/09/innovatio-high-tech-du-pont-de-saint-nazaire/>

**L'implantation des voies douces.** Les voies douces ont pour objectif de promouvoir de nouvelles habitudes de déplacement éco-responsables et plus saines pour les citoyens. Ces voies couvrent les voies dédiées avec ou sans séparateur physique pour les vélos, les voies piétonnes, ou encore les nouveaux outils de mobilité que sont les vélos et trottinettes électriques. Ces dernières ont été adoptées puis restreintes dans certaines villes en raison d'une mauvaise appropriation (conduite dangereuse, nombreux accidents, traumatologie lourde). Malgré cette expérience controversée, les voies douces contribuent à réduire les émissions, la pollution sonore, et globalement à améliorer la qualité de vie de la population, compte tenu que les activités physiques douces sont recommandées pour le maintien de la santé physique et mentale des populations. Dans des zones critiques en terme d'espace physique, les voies douces viennent se greffer aux réseaux urbains existants, ou empiéter sur les trottoirs lorsqu'il n'est pas possible de faire autrement.

**L'installation de couloirs verts.** Ce sont des allées permettant d'aérer des villes par ailleurs souvent très bétonnées, d'amener un peu d'équilibre du vivant en termes de flore et faune, ou encore rétablir des écosystèmes, comme des chemins empruntés par des animaux. Les couloirs verts peuvent occuper des espaces utilisés pour le trafic. Ceci engendre donc, une redirection du flux de véhicules sur d'autres artères du réseau urbain. Cette approche est donc plus contraignante en termes d'occupation d'espace et nécessite parfois d'amender le Plan de Déplacements Urbains.

**L'adoption d'une politique dissuasive.** Cette stratégie consiste à réorganiser le réseau de manière à dissuader les conducteurs d'entrer dans les hyper-centres, dans les zones historiques ou dans les zones touristiques, etc. À cette fin, la circulation est organisée en sens de circulation unique et

associée à des cheminements longs, voir Figure 2. Noter, dans cet exemple, que plusieurs routes permettent de sortir de la zone centrale vers les 4 axes de la ceinture, alors qu'une route permet d'y entrer. Par conséquent, entrer dans la zone pour rechercher une place de stationnement ou encore se tromper de direction est coûteux pour le conducteur car cela nécessite de rentrer à nouveau dans la zone. Pour être acceptable, cette stratégie doit être associée à d'autres mécanismes comme des offres de parkings satellites avec services différenciés pour les riverains et les usagers ponctuels (c.f. les centres historiques d'Avignon ou de Troyes, par exemple), ou encore la mise en œuvre de transports multimodaux lorsque les parkings sont très éloignés. Des navettes ou du transport public peuvent être mis à disposition pour amener des passagers à ces zones critiques. Plusieurs centres villes de grands villes sont ainsi organisés. Notons que ces approches à base de restriction d'accès et de sens uniques sont de plus fréquentes. Les ZTL (Zones à Trafic Limité) ont été notamment adoptées par un grand nombre de villes italiennes.

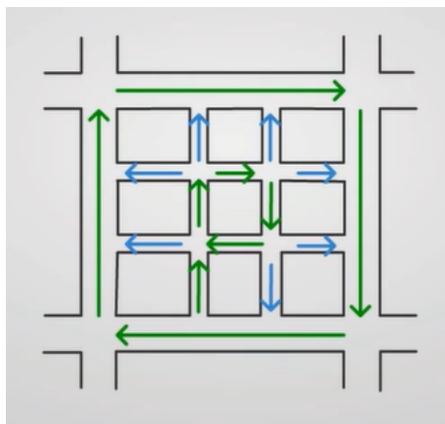


FIGURE 2 – Exemple d'un schéma de déplacement dissuasif.

**La reconfiguration complète d'un réseau urbain.** Le SNOP (*Strong Network Orientation Problem*) consiste à définir des orientations (sens de circulation) pour une zone ou un réseau complet afin d'optimiser la fluidité du trafic ou, au contraire, pour concevoir un réseau capable de dissuader les conducteurs de venir engorger des zones spécifiques comme les centres villes. Ces problèmes sont modélisés comme un problème d'orientation dans un réseau routier, représentés par un graphe et respectant la propriété de forte connexité (existence de chemin entre toute paire de sommet). Bien que ce problème reste théorique, car altérer les sens de circulation sur tout un réseau se heurterait en pratique à de très fortes oppositions des usagers, cela permet d'avoir une vision globale du réseau sous l'angle de l'optimisation. Le SNOP est également un problème fondamental, pour lequel des contraintes et des objectifs peuvent être ajoutés pour la proposition de solutions pour les applications citées précédemment.

### 3. Problèmes scientifiques pour la reconfiguration des réseaux urbains

On trouve des problèmes ou des composantes de problèmes liés à la conception et à la reconfiguration de réseaux dans le cadre de la théorie des graphes et de l'optimisation. Notamment, dans les systèmes AGV (*Automated Guided Vehicle systems*) pour la résolution du problème de *Flow Path Design* (Gaskins and Tanchoco, 1987) et dans la conception de réseaux urbains. Dans les systèmes AGV, la conception ou la reconfiguration restent cloisonnées aux entrepôts logistiques

et aux ateliers fortement automatisés. La taille des problèmes y est, de facto, dans une échelle très inférieure et les questions de sécurité sont généralement plus simples que dans des réseaux urbains. L'objectif de cette section étant de fournir un aperçu global et des points d'entrées intéressants pour ceux qui souhaitent approfondir les problèmes liés aux réseaux urbains, nous nous concentrons donc sur ce cadre spécifique.

### 3.1 Problèmes fondamentaux issus de la théorie des graphes

En théorie des graphes, l'étude de l'orientation fortement connexe de graphes remonte au travail pionnier de (Robbins, 1939). Dans ce travail, Robbins caractérise les conditions dans lesquelles un graphe non orienté peut être orienté en satisfaisant la forte connexité. Il montre la condition nécessaire et suffisante d'absence de pont (une arête sans laquelle le graphe ne sera plus connecté) dans le graphe. Son étude de 1939 était déjà motivée par une application de conception de réseau urbain, où le réseau serait modifié durant le week-end pour permettre la réalisation de travaux de maintenance. Ensuite, dans l'article (Chung et al., 1985), les auteurs ont étendu les résultats de (Robbins, 1939) pour définir une orientation forte dans des multigraphes. Récemment, une extension du théorème de Nash-William a été proposée par (Fukunaga, 2012), afin de définir une orientation forte dans un graphe non-orienté, tout en assurant la connexité entre toute paire de nœuds.

### 3.2 Problèmes fondamentaux d'optimisation

Les problèmes d'optimisation visent à minimiser ou maximiser un ou plusieurs objectifs, sujets à des contraintes. Hormis la minimisation du nombre de changements de sens de circulation (versement d'arcs) pour rétablir la forte connexité du réseau, qui est un problème polynomial (Bang-Jensen and Gutin, 2008), les autres problèmes d'optimisation cités dans cette section appartiennent à la classe des problèmes NP-difficiles. Cela signifie qu'à ce jour, dans le modèle de calcul des machines de Turing, on ne connaît pas d'algorithme capable de générer en un temps raisonnable des solutions optimales pour ces problèmes, peu importe les données d'entrées (instances). De ce fait, les travaux présentent, le cas échéant, des méthodes approchées pour des instances de moyenne et de grande taille.

Le problème de recherche d'une orientation fortement connexe dans un graphe simple minimisant la distance totale a été traité par (Drezner and Wesolowsky, 1997). Sous hypothèse de modèle raisonnable, les auteurs ont montré qu'une zone avec un seul sens de circulation est plus fluide (permet un débit de véhicules plus élevé). En revanche, les distances pour arriver à certains points de la zone peuvent être plus grandes. Les auteurs ont proposé une méthode de type *Branch and bound*, des heuristiques simples et une métaheuristique de type *simulating annealing*. Des résultats numériques ont été présentés pour des graphes contenant au plus 40 sommets et 99 arêtes. Auparavant, les travaux (Roberts and Xu, 1988, 1994) traitent le problème d'orientation dans les villes dont le réseau urbain est représenté par un graphe en grille (typique des centre-villes nord-américains comme New York), avec l'objectif de minimiser la distance maximale entre deux nœuds du graphe. Dans (Roberts and Xu, 1988), les auteurs ont étudié les conditions d'optimalité des solutions pour ce type de graphe. Dans cette étude, il a été démontré que définir des orientations pour un graphe non-orienté en grille, sujet à la forte connexité, produit des solutions susceptibles d'engendrer davantage d'encombres, en particulier pour une grille  $4 \times 4$ . Le cas où la grille

est  $3 \times 4$  a été étudié par (Roberts and Xu, 1994).

Le problème SNOP (Duhamel and Santos, 2024) est défini sur un graphe non-orienté, connecté et sans pont  $G = (V, E)$ , où  $V$  et  $E$  correspondent respectivement à l'ensemble  $n = |V|$  de sommets et l'ensemble  $m = |E|$  d'arêtes. Chaque arête  $[i, j] \in E$  a un coût associé  $c_{ij}$ . Le SNOP consiste à définir une orientation pour toutes les arêtes de  $G$ , de sorte que le graphe orienté final soit fortement connexe et que le coût total de réalisation de toutes les demandes de trafic soit minimisée. La forte connexité est nécessaire même si les demandes de trafic n'empruntent pas par toutes les routes du réseau parce qu'il doit exister un chemin entre toute paire de sommets du graphe pour permettre la circulation dans le réseau. Le modèle peut aussi être utilisé pour maximiser le coût total des demandes de trafic. Dans le premier cas, de minimisation, une (re)configuration optimale de zones spécifiques peut-être obtenue. Ceci permet une analyse fondée sur l'existant et d'élaboration d'améliorations potentielles. Le deuxième cas, de maximisation, correspond à la stratégie dissuasive, citée précédemment. Dans ce travail récent (Duhamel and Santos, 2024), nous avons formulé le problème par la Programmation Linéaire en Nombres Entiers (PLNE), proposé des heuristiques simples ainsi que cinq métaheuristiques : recherche locale *Multistart*, recherche locale itérative ILS (*Iterated Local Search*), variante de l'ILS (*Relaxed ILS*), recherche locale évolutive ELS (*Evolutionary Local Search*), variante ELS (*Relaxed ELS*) et recherche locale à voisinage variable VNS (*Variable Neighborhood Search*). Une étude de cas pour le centre ville de Clermont-Ferrand est présentée.

Dans le cadre de l'application des interruptions routières, nous sommes partis d'un modèle simple que nous avons progressivement complexifié. Nous avons d'abord traité le problème des interruptions URND (*Unidirectional Road Network with Disruptions and strong connecting requirements*), dans un réseau représenté par un graphe simple, puis MRND (*Multidirectional Road Network problem with Disruptions and strong connecting requirements*) dans un réseau représenté par un multigraphe (Huang et al., 2016, 2018, 2020a,b). Le URND considère un graphe simple fortement connexe et un ensemble d'interruptions qui suppriment la forte connexité. Il faut donc reconfigurer le réseau pour restaurer la forte connexité sur le graphe résiduel. Les objectifs initialement traités sont la minimisation du nombre de reversements d'arcs et la minimisation des distances. Le premier critère correspond, en pratique, au nombre de changements de sens de circulation sur les tronçons, ce qui peut perturber des conducteurs habitués à emprunter les mêmes chemins tous les jours ou ceux suivant les indications d'un GPS non mis à jour. D'où l'utilisation de la minimisation du nombre de reversements. Le deuxième critère, plus classique, considère les distances point-à-point, qu'il faut minimiser. À terme, ce critère pourrait être considéré sous l'angle des temps de trajets. La Figure 3 illustre un exemple sur un petit graphe. L'arc (2,3) est interrompu dans la Figure 3-(a). Dans ce cas, un utilisateur ne peut se rendre du nœud 2 au nœud 3. Une solution de restauration est présentée en Figure 3-(b), où le chemin gris permet d'aller du nœud 2 au nœud 3 en passant par le nœud intermédiaire 0. La forte connexité est rétablie, avec le reversement de deux arcs et une augmentation de la distance de parcours pour le trajet de 2 à 3.

Pour l'URND, nous avons développé des modèles mathématiques et les méthodes multi-objectifs suivantes : algorithme  $\epsilon$ -constraint et métaheuristique NSGA-II (*Non Dominated Sorting Genetic Algorithm*). Ensuite, nous avons étendu le problème, les modèles et les méthodes pour traiter le MRDP. Notre premier résultat théorique important sur le MRDP est la propriété de réduction de tout multigraphe à un *2-directed multigraph* (2 arcs entre chaque paire de nœuds). La conséquence immédiate est que les méthodes ont pu être adaptées sans impact majeur en performance et temps

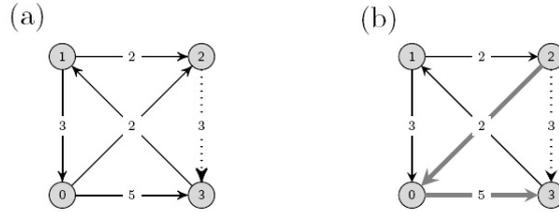


FIGURE 3 – Exemple d’une instance pour l’URND.

de calcul. Le deuxième résultat théorique important concerne la proposition de contraintes de flot (utilisées couramment dans les modèles de conception de réseau), capables de considérer les reversements d’arcs, tout en conservant des propriétés cruciales comme la conservation de flot.

La planification dans le temps des interruptions de tronçons est traitée dans (Almeida Coco et al., 2020). Le problème DSUN (*Disruption Scheduling problem on Urban Networks*) consiste à planifier dans le temps des interruptions dans le réseau urbain tout en garantissant la forte connexité du réseau à chaque pas de temps. Les objectifs sont la minimisation du nombre de changement de sens de circulations et la somme des dates de démarrage de chaque travail. Une formulation du problème reposant sur la PLNE a été proposée et des instances correspondant à la ville de Troyes ont été résolues avec la méthode bi-objectif  $\epsilon$ -*constraint*.

#### 4. Défis d’évolution des réseaux urbains

L’un des grands défis du milieu urbain est la prise en compte d’une évolution certaine et nécessaire dans le temps. Il est évident que les aménagements physiques ne pourront pas satisfaire tous les besoins en mobilité urbaine, notamment dans des zones à forte densité de population. Ainsi, nous nous intéressons aux problèmes tactiques d’optimisation. À ces contraintes physiques, s’ajoutent les contraintes liées aux nouvelles applications issues des nouveaux vecteurs de mobilité, à la volonté d’aérer les villes et de les préparer aux impacts du changement climatique. De plus, la volonté de l’Europe et de la France de supprimer les véhicules thermiques à l’horizon 2035 laissent entrevoir une réorganisation profonde des zones urbaines avec, par exemple, une nouvelle organisation de la mobilité nécessitant le retour de commerces de proximités, l’adoption de circuits courts, entre autres.

Les problèmes tactiques de revoir le flux de transport pour des applications telles que les voies douces, les voies dynamiques, la planification des interruptions routières, les stratégies de dissuasion, entre autres, ouvrent un champs de possibilités importante. En outre, plus les problèmes s’approchent de la réalité du terrain, plus les verrous techniques sont importants. Nous avons œuvré pendant plus d’une décennie en étudiant différents aspects des problèmes tactiques des sens de circulations dans l’optique de l’optimisation. Chaque ajout de contraintes et d’objectifs engendre des phénomènes nécessitant des analyses poussées. C’est un travail de long haleine que nous présentons au travers cette publication des Cahiers de la logistique. Nous espérons susciter l’intérêt des acteurs de la mobilité, notamment des logisticiens.

Outre les problèmes cités précédemment, des perspectives sous l’angle des utilisateurs méritent aussi l’attention de la communauté scientifique, tel que la planification des horaires de travail afin d’atténuer le *commuting*. Il est pertinent de souligner que l’autorisation de la circulation par plaques d’immatriculations est un système qui existe déjà et qui a fait ses preuves dans le

monde. Idem pour des zones restreintes d'accès à certaines périodes de la journée, les restrictions à base de vignettes ou les zones à péage urbain. Cependant, nous portons un regard différent sur cette problématique : une approche orientée planification des horaires pour les journées de travail. Le sujet est difficile du point de vue des lois du travail. Cependant, nous n'avons pas tous le même rythme, les lève-tôt et les couche-tard sont une réalité.

Ce sont autant de pistes pour penser la mobilité comme une composante à part entière de la ville, un outil de son développement et non une contrainte imposée.

## Références

- Almeida Coco, A., Duhamel, C., and Santos, A. C. (2020). Modeling and solving the multi-period disruptions scheduling problem on urban networks. *Annals of Operations Research*, 285(1-2) :427–443.
- Bang-Jensen, J. and Gutin, G. Z. (2008). *Digraphs : Theory, Algorithms and Applications*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2nd edition.
- Chung, F., Garey, M., and Tarjan, R. (1985). Strongly connected orientations of mixed multigraphs. *Networks*, 15(4) :477–484.
- Drezner, Z. and Wesolowsky, G. O. (1997). Selecting an optimum configuration of one-way and two-way routes. *Transportation Science*, 31(4) :386–394.
- Duhamel, C. and Santos, A. C. (2024). The strong network orientation problem. *International Transactions in Operational Research*, 31(1) :192–220.
- Fukunaga, T. (2012). Graph orientations with set connectivity requirements. *Discrete Mathematics*, 312(15) :2349–2355.
- Gaskins, R. J. and Tanchoco, J. M. A. (1987). Flow path design for automated guided vehicle systems. *International Journal of Production Research*, 25 :667–676.
- Huang, Y., Santos, A. C., and Duhamel, C. (2016). A bi-objective model to address disruptions on unidirectional road networks. In *8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (MIM 2016)*, volume 49, pages 1620–1625, Troyes, France.
- Huang, Y., Santos, A. C., and Duhamel, C. (2018). Methods for solving road network problems with disruptions. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 64 :175–184.
- Huang, Y., Santos, A. C., and Duhamel, C. (2020a). Bi-objective methods for road network problems with disruptions and connecting requirements. *Journal of the Operational Research Society*, 71(12) :1959–1971.
- Huang, Y., Santos, A. C., and Duhamel, C. (2020b). Model and methods to address urban road network problems with disruptions. *International Transactions in Operational Research*, 27(6) :2715–2739.
- Robbins, H. E. (1939). A theorem on graphs, with an application to a problem on traffic control. *The American Mathematical Monthly*, 46 :281–283.

Roberts, F. and Xu, Y. (1988). On the optimal strongly connected orientations of city street graphs I : Large grids. *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, 1(2) :199–222.

Roberts, F. S. and Xu, Y. (1994). On the optimal strongly connected orientations of city street graphs iv : Four east-west avenues or north-south streets. *Discrete Applied Mathematics*, 49(1-3) :331 – 356. Special Volume Viewpoints on Optimization.

## Biographie des auteurs



Andréa Cynthia Santos est Professeure des Universités en informatique à l'Université Le Havre Normandie, Directrice de l'école d'ingénieur ISEL (Institut Supérieur d'Études Logistiques), et membre du LITIS (Laboratoire d'Informatique, de Traitement de l'Information et des Systèmes). Ses travaux de recherche entrent dans le cadre de la Recherche Opérationnelle (RO) appliquée à des problèmes d'optimisation dans le cadre de catastrophes majeures (naturelles, technologiques et sanitaires) et des villes durables (*smart cities*, logistique urbaine). Sa recherche considère des aspects pluridisciplinaires pour résoudre des problématiques socio-techniques réelles et à l'échelle des villes. Les modèles et méthodes de sa recherche scientifique traitent des problèmes d'optimisation NP-difficiles tels que la planification *large scale*, la conception de réseaux et le routage. Elle a plus de 160 publications dans des revues et des conférences nationales et internationales.



Christophe Duhamel est enseignant-chercheur en Informatique à l'Université Le Havre Normandie. Il est membre du LITIS (Laboratoire d'Informatique, de Traitement de l'Information et des Systèmes). Ses travaux de recherche s'inscrivent en Recherche Opérationnelle (RO) et portent essentiellement sur l'optimisation des problèmes de transport et des problèmes de conception et de routage dans les réseaux. Dans le cadre du transport, il s'est intéressé aussi au transport de biens comme à celui de personnes, avec la prise en compte de critères de Qualité de Service ou d'aspects multimodaux. Ses travaux se concentrent sur la proposition de modèles mathématiques et l'application de méthodes d'optimisation exacte ou approchées (heuristiques et métaheuristiques). Il a publié plus de 30 articles dans des revues internationales.