



**HAL**  
open science

# Nouvelles applications et approches pour la mobilité urbaine et périurbaine

Andréa Cynthia Santos, Christophe Duhamel, Imene Khames

► **To cite this version:**

Andréa Cynthia Santos, Christophe Duhamel, Imene Khames. Nouvelles applications et approches pour la mobilité urbaine et périurbaine. Cahiers de la logistique, 4, pp.1-47, 2023, Nouvelles applications et approches pour la mobilité urbaine et périurbaine. hal-04362971

**HAL Id: hal-04362971**

**<https://normandie-univ.hal.science/hal-04362971v1>**

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.

# Préface

Ce volume des Cahiers de la logistique est dédié aux nouvelles applications et approches pour la mobilité urbaine et périurbaine.

Plus de la moitié de la population mondiale vit aujourd'hui en milieu urbain et les villes ne cessent de croître. Pour accompagner cet essor urbain, les scientifiques réfléchissent à des solutions alternatives et durables pour les déplacements urbains. La mobilité urbaine est en constante évolution, et de nouveaux modes de transport apparaissent pour répondre aux enjeux environnementaux et sociaux.

Nous avons donc le plaisir d'éditer ce volume qui traite des problèmes sur les nouvelles mobilités.

- La première contribution, de *Andréa Cynthia Santos* et *Christophe Duhamel*, porte sur le problème de gestion des réseaux routiers et de la circulation urbaine. Les auteurs ont étudié la reconfiguration des sens de circulation des voies afin de s'adapter à l'évolution des besoins en mobilité.
- La deuxième contribution, de *Louise Penz*, *Éric Sanlaville* et *Christophe Duhamel*, présente le problème de transport multimodal combinant le transport à la demande et les transports en commun. Deux modèles de programmation par contraintes ont été développés et testés sur la ville du Havre.
- La troisième contribution, de *David Brevet* et *Christophe Duhamel*, présente le problème de transport à la demande de personnes, en utilisant des flottes de véhicules privées et publiques. L'application cible le covoiturage pour décarboner le transport des employés.
- La quatrième contribution, de *Julián Alberto Espejo-Díaz*, *Edgar Alfonso-Lizarazo*, *Jairo R. Montoya-Torres* et *François Guillet*, s'intéresse à une application potentielle de la technologie de mobilité aérienne avancée dans des services médicaux d'urgence. La méthodologie proposée a été appliquée au contexte de la région Auvergne-Rhône-Alpes.

Ce volume apporte donc une vision sur différentes applications et approches pour la mobilité urbaine et périurbaine.

***Andréa Cynthia Santos***

Professeure des Universités,  
LITIS, ISEL, ULHN  
Directrice de l'ISEL

***Christophe Duhamel***

Maître de Conférences,  
LITIS, ULHN

***Imene Khames***

Maître de Conférences,  
LMAH, ISEL, ULHN

# 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 défi 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.

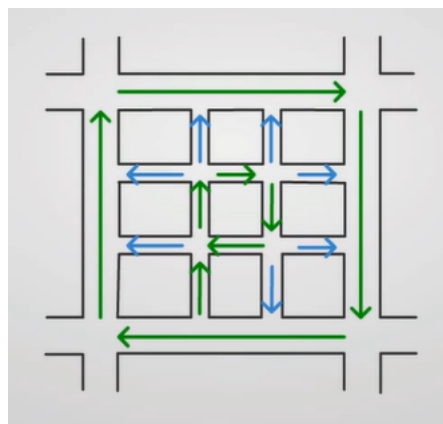


FIGURE 2 – Exemple d'un schéma de déplacement dissuasif.

**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

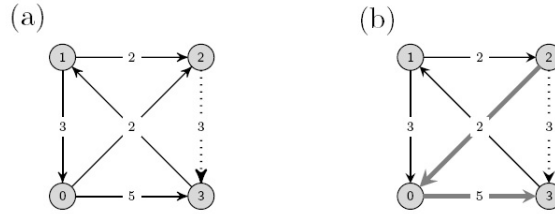


FIGURE 3 – Exemple d’une instance pour l’URND.

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.

## MOBILITÉ URBAINE MULTIMODALE

Louise Penz, Éric Sanlaville, Christophe Duhamel

LITIS, Université Le Havre Normandie

{louise.penz,eric.sanlaville,christophe.duhamel}@univ-lehavre.fr

### RESUME

Il existe de nombreuses façons de se déplacer dans une ville, en utilisant un véhicule personnel, en utilisant les transports en commun, voire en combinant les deux. Cependant, plus on s'éloigne du centre-ville, plus le choix se réduit au véhicule personnel faute d'accès au réseau de transport en commun. Une alternative consiste à utiliser des véhicules de transport à la demande, plus petits et plus flexibles comme des minibus. On est alors dans le cadre de problème de transport porte-à-porte assurant le transport de passagers de leur origine à leur destination tout en respectant leurs fenêtres temporelles, leur temps de trajet maximum et les capacités des véhicules. Nous étudions une généralisation du problème intégrant le transport en commun existant, comme les trams, et une flotte de navettes flexibles. Deux modèles de Programmation Par Contraintes ont été développés afin de générer des solutions respectant toutes les contraintes. Pour tester les modèles, une instance sur la ville du Havre a été générée, avec les deux lignes de trams existantes ainsi que la ligne future. Les résultats montrent que les modèles sont complémentaires en terme d'objectifs et qu'ils permettent de fournir des solutions que l'on peut ensuite optimiser par d'autres approches.

**MOTS CLÉS:** Transport à la demande, réseau multimodal, programmation par contraintes, solutions initiales.

### ABSTRACT

There are many ways to travel in a city, using a personal vehicle, using public transportation, or even a combination of the two. However, the farther we go from the city center, the more personal vehicles are mandatory due to lack of access to the public transport network. An alternative is to use smaller, more flexible on-demand transportation vehicles like minibuses. This corresponds to a door-to-door transport problem ensuring the transport of passengers from their origin to their destination while respecting their time windows, their maximum travel times and the capacities of the vehicles. We study here a generalization of the problem integrating existing public transport, such as trams, and a fleet of flexible shuttles. Two Constraint Programming models have been developed in order to generate solutions respecting all constraints. To test the models, an instance of Le Havre city was generated, considering the two existing tram lines as well as the future line. The results show that the models are complementary in terms of objectives and that they allow providing solutions that can then be optimized using other approaches.

**KEYWORDS:** On-demand transportation, multimodal network, constraint programming, initial solutions.

## 1. Introduction

Il existe de nombreux moyens de transport pour se déplacer dans une ville et ses alentours. Ces modes de transport sont plus ou moins flexibles, comme illustré dans la Figure 1. Plusieurs études et recherches ont été menées sur le déplacement, notamment en zone urbaine (Bauchinger et al., 2021). Il ressort que plus les transports sont flexibles, plus ils correspondent à un mode individuel et privé. Aujourd'hui, dans l'union Européenne, deux tiers des voyages se font en voiture. Cependant, l'usage prépondérant des véhicules personnels est la source de multiples problèmes, comme l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre ou encore la congestion.

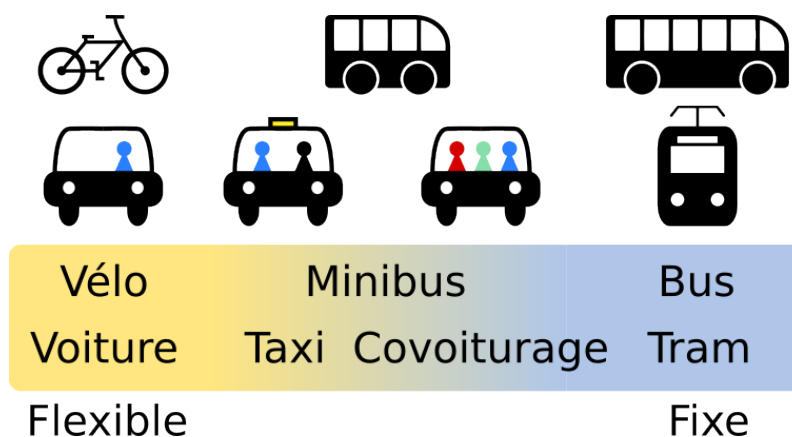


FIGURE 1 – Différents modes de transport dans une ville

Pour pallier ces problèmes, des politiques incitatives sont mises en place pour favoriser les transports en commun, comme le tram, le métro ou les bus. Le basculement massif sur les transports en commun est amené à jouer un rôle important dans la lutte contre le réchauffement climatique et la congestion chronique dans les centres des grandes villes. En outre, les transports en commun contribuent à réduire les inégalités sociales et à amener davantage d'équité. En effet, certaines catégories de personnes n'ont pas accès aux véhicules personnels, que ce soit par manque de moyens financiers, à cause de handicap, ou en raison de contraintes sociétales. En outre, les enfants, les personnes âgées ou certaines personnes handicapées n'ont pas la possibilité de conduire. Pour eux, le transport en commun est donc une nécessité. Dans ce cas, et lorsque l'accès au réseau de transports n'est pas trop compliqué, les lignes permettent de connecter la plupart des points importants dans la ville comme l'hôpital, les services administratifs ou les écoles.

Un autre frein et l'accès inégal au réseau sur le territoire, en zone urbaine comme péri-urbaine ou rurale. En effet, étendre un réseau et mailler les zones peu couvertes induit des coûts d'infrastructure et de fonctionnement inversement proportionnels à la distance au centre ville. De plus, les zones de population en milieu rural sont souvent de faible taille et éparpillées sur le territoire. De ce fait, la rentabilité de lignes de desserte chute rapidement en fonction des distances à parcourir, ce qui conduit mécaniquement à proposer des services à basse fréquence. Les personnes vivant en milieu rural n'ont alors pas d'autre choix que d'utiliser leur véhicule personnel ou de pratiquer le covoiturage, ce qui est source de contraintes et engendre de fortes inégalités sociales. Même en milieu périurbain, voire urbain, les personnes ont tendance à privilégier la voiture à la marche lorsqu'il faut effectuer plus d'un quart d'heure (ou 1 kilomètre) de marche. La Figure 2 montre la carte du Havre avec les lignes de trams existantes ainsi que la future ligne. L'aire en rouge représente les zones qui sont situées à moins d'un quart d'heure de marche de la station de



tram la plus proche et l'aire bleue les zones à moins de 40 minutes de marche. Ainsi, la population vivant en zone bleue a davantage tendance à prendre la voiture. De fait, hors utilisation des parkings relais, ces personnes n'intègrent pas le réseau du tram.

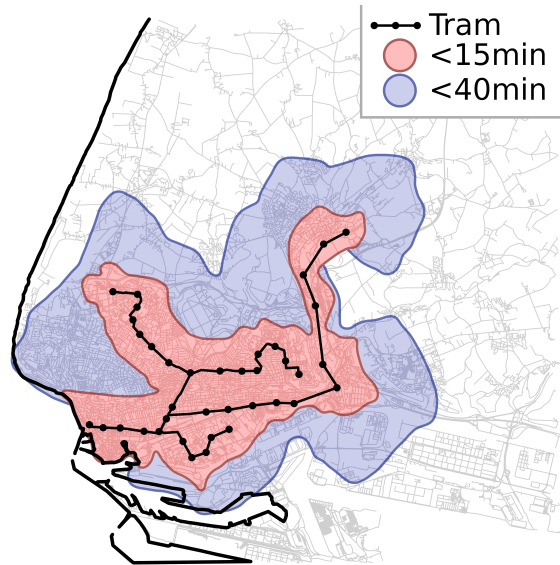


FIGURE 2 – Zones selon la distance à pieds aux trams

Il existe plusieurs moyens pour faciliter le transport en commun. Comme mentionné juste avant, il existe les parking relais localisés à certaines stations ou la solution du covoiturage organisé pour les personnes souhaitant se rendre à la même station. Une autre solution est d'organiser du transport multimodal, où l'on combine une flotte de véhicules plus flexibles, comme les minibus, amenant les personnes aux stations et aux heures désirées. Ceci permet un transport flexible, complémentaire du transport en commun classique, et n'introduisant pas de concurrence entre les deux modes, tout en maintenant le mode flexible loin du centre ville pour éviter la congestion.

## 2. Le problème de transport de passagers à la demande incluant les transports en commun

Le problème du transport de passagers combinant le transport à la demande et les transports en commun est appelé Integrated Dial-A-Ride Problem (IDARP). On définit  $R$  l'ensemble des requêtes qui correspondent aux demandes des utilisateurs à satisfaire. Chaque requête  $r \in R$  possède une origine  $O_r$  et une destination  $D_r$ . On note  $O$  et  $D$  l'ensemble de tous les points d'origine et de tous les points de destination respectivement. À chaque point  $i \in O \cup D$ , on associe une fenêtre de temps  $[f_i, \bar{f}_i]$ . Elle correspond à la période de temps durant laquelle l'utilisateur accepte d'être pris en charge sur ce sommet. Ainsi  $f_i$  est le premier moment disponible et  $\bar{f}_i$  est le dernier moment disponible. Si le véhicule arrive au sommet  $i$  avant  $f_i$ , cela engendrera une attente jusqu'au temps  $f_i$ . On définit deux types de requêtes, les requêtes entrantes et les requêtes sortantes. Une requête entrante impose une fenêtre de temps sur son sommet d'origine, c'est-à-dire que le véhicule doit prendre la requête durant sa fenêtre de temps, tandis que la destination n'a pas de fenêtre de temps. Pour les requêtes sortantes, la fenêtre de temps est positionnée sur la destination et non sur l'origine. Pour le confort du passager, chaque requête  $r \in R$  définit un temps maximum de trajet  $\bar{l}_r$ . De plus, chaque requête correspond à un nombre  $c_r$  de personnes souhaitant

se déplacer ensemble et impose un temps de service  $s_r$  pour entrer ou de sortir du véhicule.

Pour satisfaire ces requêtes, un ensemble  $V$  de véhicules est initialement positionné sur un dépôt. Chaque véhicule effectue une tournée de desserte qui commence et termine sur ce dépôt. Les véhicules sont supposés homogènes et possèdent donc une capacité identique  $\bar{q}$  en nombre de places. Les utilisateurs peuvent également emprunter le transport en commun.  $S$  est l'ensemble des stations utilisables. Les horaires de passages des trams ne sont pas considérés car on suppose dans nos instances que les passages sont fréquents. Le temps d'attente aux stations est une attente moyenne, constante, qui peut être intégrée dans la matrice des durées. Pour un véhicule, le temps de trajet du point  $i$  au point  $j$  avec  $i, j \in (O \cup D \cup S)^2$  est  $T(i, j)$  et le temps pour un tram entre  $i$  et  $j$  avec  $i, j \in S^2$  est  $T^{pub}(i, j)$ .

La Figure 3 montre un exemple de problème, avec 3 requêtes et 2 stations reliées par une ligne. Deux véhicules, notés 0 et 1, sont initialement positionnés au dépôt (carré gris). Le véhicule 0 prend en charge la première moitié de la requête  $R_1$  (sommet  $P_1$ ) et la requête  $R_0$  en entier (sommets  $P_0$  et  $D_0$ ) tandis que le véhicule 1 prend en charge le reste des requêtes. La requête  $R_0$  est donc prise par le véhicule 0 pour être amenée à une station. Ensuite la requête prend le transport en commun puis est récupérée à la deuxième station par le véhicule 1 pour terminer son trajet.

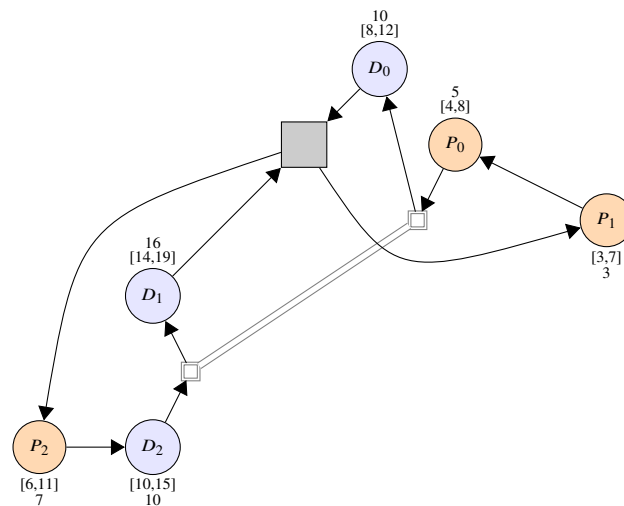


FIGURE 3 – Exemple d’une instance avec sa solution.

Ce problème a déjà fait l’objet de plusieurs études dans la littérature. En 1976, deux rapports, Wilson et al. (1976) et Potter (1976), ont analysé un tel système multimodal sans toutefois traiter l’optimisation du service. Des modèles de Programmation Linéaire en Nombres Entiers (PLNE) ont été développés plus tard, ce qui permet d’obtenir une réponse exacte et optimale. L’objectif à minimiser est souvent le temps de route des véhicules à la demande. Häll et al. (2009) ont proposé une formulation PLNE pour ce problème pouvant résoudre jusqu’à 10 requêtes avec une ligne de transport comprenant 3 stations. Plus récemment, (Posada et al., 2017) ont développé des modèles PLNE pour le IDARP avec des horaires de passage pour le transport en commun, pouvant résoudre des instances jusqu’à 5 requêtes et 4 stations.

Les instances résolues à l’optimum avec ces modèles restent assez modestes. Pour traiter des instances de taille moyenne à grande, il faut utiliser des méthodes heuristiques, qui trouvent des solutions approchées à la solution optimale. Une heuristique d’insertion de requêtes dans une solution partielle a été proposée dans Liaw et al. (1996). Posada and Häll (2020) ont développé la

métaheuristique Large Neighborhood Search (LNS) pour le IDARP. Molenbruch et al. (2021) ont aussi utilisé la LNS, en ajoutant entre autres les horaires de passage des transport en commun. Ces méthodes ont permis de calculer des solutions pour des instances contenant jusqu'à 200 requêtes.

Pour calculer de bonnes solutions sur des grandes instances, il faut nécessairement passer par des heuristiques et surtout par des métaheuristiques. Cependant, pour ces dernières, il est nécessaire de disposer d'une solution initiale, même de mauvaise qualité. Dans la littérature, les solutions initiales ont souvent été calculées en partant de routes vides, puis en insérant les requêtes les unes après les autres. Cette approche permet de trouver une solution initiale dans le cas où insérer des requêtes est assez simple et donc lorsque le problème n'est pas trop contraint. Notre proposition porte ici sur le fait de trouver une solution initiale, même dans les cas contraints. Pour cela, nous avons utilisé des modèles de Programmation Par Contraintes (PPC). Ils permettent de trouver des solutions satisfaisant toutes les contraintes. Par contre, ils ne cherchent pas forcément à optimiser leur qualité.

### 3. La programmation par contraintes

#### 3.1 Définition

La Programmation Par Contraintes (PPC) est un domaine de l'Intelligence Artificielle (IA). Elle offre une grande flexibilité en terme de modélisation et ne nécessite pas forcément d'objectif à optimiser. Elle permet donc de tester la faisabilité d'une instance en calculant une solution réalisable. Pour cela, la PPC résout un Problème de Satisfaction de Contraintes, dans lequel elle doit trouver une affectation totale pour les variables telle que les valeurs choisies respectent toutes les contraintes définies.

**Définition 1** *Un Problème de Satisfaction de Contraintes (ou CSP) est défini par un triplet  $\langle X, \mathcal{D}, C \rangle$  où :*

- $X = \{x_1, \dots, x_n\}$  est l'ensemble des variables du problème ;
- $\mathcal{D} = \{D_1, \dots, D_n\}$  est l'ensemble des domaines des variables, i.e.  $\forall i \in \llbracket 1, n \rrbracket, x_i \in D_i$  ;
- $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$  est un ensemble de contraintes où chaque contrainte  $c_j$  est définie par le sous-ensemble du produit cartésien des variables sur lesquelles elle porte :  $c_j(x_{j_1}, \dots, x_{j_k}) \subseteq D_{j_1} \times \dots \times D_{j_k}$ .

**Définition 2** *Une affectation totale  $\mathcal{A}$  est définie par  $\mathcal{V}$ , le tuple des valeurs prises par les variables :*

$$\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_n\} \in \{D_1, \dots, D_n\}$$

Il existe plusieurs types de variables, comme les variables entières dont le domaine est un ensemble d'entiers, les variables booléennes avec comme domaine  $\{\text{Vrai}, \text{Faux}\}$ . Les modèles présentés dans l'article utiliseront des variables d'intervalle et de séquence d'intervalles. Ces types de variables, présentées dans Laborie and Rogerie (2008), ont été initialement conçus pour les problèmes d'ordonnancement. Un intervalle est une variable de décision caractérisée par quatre attributs : son début, sa fin, sa taille et son état (actif ou non), car un intervalle peut être présent ou non dans la solution.

Le domaine d'un intervalle  $i$  est  $\{\perp\} \cup \{\{debut_i, fin_i\} | debut_i, fin_i \in \mathbb{Z}, debut_i \leq fin_i\}$ . On associe aussi un domaine pour chacun des attributs de l'intervalle  $i$  :

- $debut(i) \in \{\underline{debut}(i), \overline{debut}(i)\}$ ;
- $fin(i) \in \{\underline{fin}(i), \overline{fin}(i)\}$ ;
- $taille(i) \in \{\underline{taille}(i), \overline{taille}(i)\}$ ;
- $presence(i) \in \{Vrai, Faux\}$ .

Si l'intervalle  $i$  n'est pas présent, l'affectation sera  $\perp$ . Sinon, les valeurs de  $debut_i$  et  $fin_i$  seront fixées, avec  $taille_i = fin_i - debut_i$ .

Une séquence d'intervalles indique une relation entre l'ordre des intervalles et la position relative de leurs dates de départ et d'arrivée. Soit  $p$  une séquence d'intervalles sur l'ensemble d'intervalles  $I$ . Le domaine de  $p$  est l'ensemble des permutations possibles de ces intervalles, en prenant en compte le fait que les intervalles peuvent être présents ou non. Une affectation est une permutation des intervalles présents.

La recherche de solutions se fait de plusieurs manières, en propageant les contraintes pour réduire au mieux les domaines, en fixant certaines valeurs pour voir si une solution est faisable, etc. Pour cela, il existe plusieurs solveurs de PPC, qui prennent le triplet variables-domaines-contraintes et renvoient une solution, s'il en existe.

### 3.2 Dans les problèmes de transport de passagers

La PPC a été utilisée par Berbeglia et al. (2011) pour le problème de transport à la demande de passagers. Il correspond à notre problème, sans l'utilisation des transports en commun. Pour traiter leur problème, ils ont utilisé un modèle dit par successeurs, dans lequel chaque sommet (origine et destination) est associé à un entier et à une variable qui indique son successeur direct dans la route. Les successeurs sont donc des variables entières avec comme domaine l'ensemble des sommets possibles pour la suite de la route. D'autres variables sont utilisées, comme le numéro du véhicule à chaque sommet ou le temps d'arrivée sur chaque sommet. Ce modèle a aussi été utilisé par Deleplanque and Quilliot (2013) pour le le problème de transport de passagers avec transferts, dans lequel les utilisateurs sont déposés à certains points et un autre véhicule vient les chercher pour terminer le trajet.

Cappart et al. (2018) travaillent sur le problème du transport de patients. Ce problème est aussi un problème de transport de passagers mais les requêtes sont hétérogènes : une requête peut consister à aller de l'origine à un centre de santé, ou à aller d'un centre de santé à la destination, ou encore d'aller de l'origine à un centre de santé, puis être conduit à la destination (qui peut être le point d'origine). Ce modèle utilise les intervalles comme variables de décision et un intervalle correspond à une étape de la route d'une requête (origine centre de santé ou centre de santé destination). Le début de l'intervalle correspond au moment où le patient entre dans le véhicule et sa fin au moment il en sort.

Liu et al. (2018) travaillent sur le problème du transport de seniors, qui ressemble aux autres problèmes de transport de passagers. Le modèle PPC utilise les intervalles, où chaque intervalle correspond à un sommet. Une requête est donc constituée de deux intervalles, un pour l'origine et l'autre pour la destination. Ham (2023) développe un modèle pour le problème du transport de passagers en utilisant les variables d'intervalles relatives aux requêtes et relatives aux sommets, en souhaitant combiner les avantages des deux modélisations.

Récemment, Thomas et al. (2020) et Delecluse et al. (2022) ont proposé d'autre types de variables, basés sur les séquences d'évènements, avec une propagation et une affectation des séquences d'intervalles différente. Ils ont testé ces nouveaux types sur le problème du transport de

passagers et ont montré que cela produisait de bons résultats.

Nous avons d'abord testé plusieurs modèles pour le problème du transports de passagers sans transport en commun sur des instances non réalistes afin de valider les modèles précédents. Puis, suite aux résultats, nous avons décidé de nous concentrer sur les modèles avec intervalles, en utilisant les intervalles relatifs aux requêtes et les intervalles relatifs aux sommets afin de les tester sur les instances correspondant à la ville du Havre.

#### 4. Le modèle par intervalles de sommets SomMod

Pour le modèle par intervalles de sommets, il y a autant d'intervalles que d'évènements possibles. Un évènement correspond au fait de prendre ou déposer un passager à son origine, à sa destination ou à un arrêt possible de tram. Les arrêts que vont prendre les passagers pour les transports en commun ne sont pas connus à l'avance et le choix de notre solveur est limitant pour la contrainte *noOverlap*. Cette dernière permet d'assurer un temps minimum entre deux intervalles consécutifs dans une séquence, selon une matrice de temps fixe. Il faut donc autant d'intervalles que de couples de sommets, ce qui fait que le modèle va avoir pour intervalles les origines, destinations et tous les couples requête-station pouvant appartenir à une solution. Un exemple est présenté dans la figure 4. L'ensemble des stations avant transport public pour la requête  $r$  est déterminé par :

$$S_r^1 = \{S_i \in S \mid \exists S_j \in S : T(O_r, S_i) + T^{pub}(S_i, S_j) + T(S_j, D_r) + 3s_r \leq \bar{l}_r\}$$

Les stations après transfert sont calculées de la même manière. On note  $\mathcal{S}$  la séquence des origines, destinations, stations avant transfert et stations après transfert.

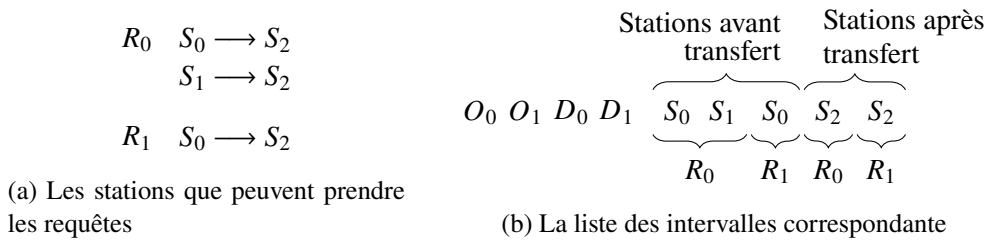


FIGURE 4 – Ensemble  $\mathcal{S}$  des sommets selon les possibilités des requêtes.

Pour chaque sommet  $i \in \mathcal{S}$  on définit un intervalle  $x_i$  et pour chaque couple sommet-véhicule  $i \in \mathcal{S}, v \in V$  on introduit un intervalle  $X_{i,v}$ . La variable  $x_i$  sera utilisée pour les contraintes relatives aux requêtes, comme les fenêtres de temps, et la variable  $X_{i,v}$  permet de faire le lien entre les requêtes et les véhicules. Elles seront utilisées dans les contraintes relatives aux véhicules, comme les temps de route. De plus, chaque route du véhicule  $v \in V$  est représentée par une séquence  $seq_v$ . Pour chaque requête  $r \in R$ , la variable booléenne  $u_r$  détermine si la requête utilise les transports en commun. La figure 5 fournit une illustration. On note  $S_r^1$  et respectivement  $S_r^2$ , l'ensemble dans  $\mathcal{S}$  des stations avant et après le transfert de la requête  $r \in R$ . Les intervalles en orange signifient que le passager monte dans un véhicule et les intervalles en bleu qu'il en descend.

Les contraintes du modèle sont :

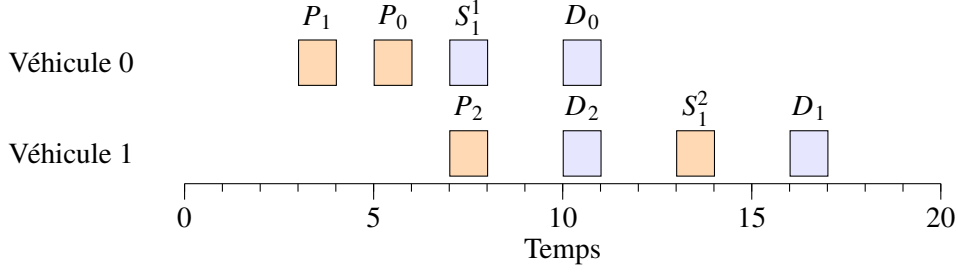


FIGURE 5 – Représentation simplifiée du modèle par intervalles de sommets de la solution de la figure 3.

$$\text{alternative}(x_i, [\forall v \in V, X_{i,v}]) \quad \forall i \in \mathcal{S} \quad (1)$$

$$\text{noOverlap}(\text{seq}_v, A) \quad \forall v \in V \quad (2)$$

$$\sum_{i \in S_r^1} \text{presence}(x_i) = \sum_{i \in S_r^2} \text{presence}(x_i) = u_r \quad \forall r \in R \quad (3)$$

$$\neg u_r \implies \text{presence}(X_{O_r,v}) = \text{presence}(X_{D_r,v}) \quad \forall r \in R, \forall v \in V \quad (4)$$

$$\text{presence}(X_{i,v}) \leq \text{presence}(X_{O_r,v}) \quad \forall r \in R, \forall i \in S_r^1, \forall v \in V \quad (5)$$

$$\text{presence}(X_{i,v}) \leq \text{presence}(X_{D_r,v}) \quad \forall r \in R, \forall i \in S_r^2, \forall v \in V \quad (6)$$

$$\text{before}(x_{O_r}, x_{D_r}) \quad \forall r \in R \quad (7)$$

$$\text{before}(x_{O_r}, x_i) \quad \forall r \in R, \forall i \in S_r^1 \quad (8)$$

$$\text{before}(x_i, x_j, T^{\text{pub}}(i, j)) \quad \forall r \in R, \forall i \in S_r^1, \forall j \in S_r^2 \quad (9)$$

$$\text{before}(x_i, x_{D_r}) \quad \forall r \in R, \forall i \in S_r^2 \quad (10)$$

$$\underline{f}_i \leq \text{debut}(x_i) \leq \bar{f}_i \quad \forall i \in O \cup D \quad (11)$$

$$\text{taille}(x_i) = s_r \quad \forall r \in R, \forall i \in \{O_r, D_r\} \cup S_r^1 \cup S_r^2 \quad (12)$$

$$\text{debut}(x_{D_r}) - \text{debut}(x_{O_r}) \leq \bar{l}_r \quad \forall r \in R \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \text{cumulative} \left( \sum_{r \in R} \left( \text{stepAtStart}(X_{O_r,v}, c_r) + \text{stepAtStart}(X_{D_r,v}, -c_r) \right) \right. \\ & \left. + \sum_{i \in S_r^1} \text{stepAtStart}(X_{i,v}, -c_r) + \sum_{i \in S_r^2} \text{stepAtStart}(X_{i,v}, c_r) \right) \quad \forall v \in V \quad (14) \end{aligned}$$

Les sommets ne sont desservis que par un seul véhicule grâce aux contraintes (1). Ces dernières utilisent la contrainte  $\text{alternative}(i, [i_1, \dots, i_n])$ . Cette contrainte est valide si et seulement si tous les intervalles sont absents ou alors si  $i$  et un et un seul intervalle parmi  $\{i_1, \dots, i_n\}$  est présent et que les dates de début et de fin sont égales. Dans notre cas, cela signifie qu'un sommet est pris en charge par un unique véhicule. Les contraintes (2) permettent de prendre en compte les temps de trajet entre les intervalles avec la matrice précalculée  $A$  déduite de la structure de  $\mathcal{S}$ . Les contraintes (3) assurent qu'un seul intervalle de transfert est présent avant et après transfert, dans le cas de transfert. Les intervalles des origines, des destinations, des origines et stations, ou des stations et destinations sont sur la même route grâce aux contraintes (4) à (6). Les intervalles sont dans la bonne séquence chronologique par les contraintes (7) à (10). Dans les contraintes (9), la contrainte  $\text{before}$  prend un troisième argument qui est le temps minimum

entre les deux intervalles. Cela permet de faire respecter les temps de trajet dans les transports en commun. Les fenêtres de temps aux origines et destinations, les temps de service et les temps maximum de trajet des requêtes sont respectés par les contraintes (11)-(13). La capacité maximale des véhicules est respectée par les contraintes (14). Les fonctions  $stepAtStart(x, c)$  sont indexées dans le temps et augmentent la quantité de la valeur  $c$  au début de l'intervalle  $x$ . Ainsi, on augmente de la valeur  $c$  sur l'intervalle de l'origine de la requête et on diminue de cette même valeur  $c$  à la destination. La fonction  $cumulative$  permet de cumuler toutes ces fonctions pour toutes les requêtes. Ainsi, à chaque pas de temps, on connaît la quantité de personnes dans un véhicule et on s'assure que cette quantité ne dépasse pas la capacité du véhicule.

## 5. Le modèle par intervalles de requêtes ReqMod

Pour le modèle par intervalles de requêtes, une requête est représentée par deux intervalles. Dans le cas de l'utilisation du transport en commun, le premier intervalle représente la prise en compte du passager par la première voiture. Le début de l'intervalle correspond au moment où le passager entre dans le véhicule et la fin au moment où il en sort. Le second intervalle est la prise en charge du passager par le second véhicule après avoir utilisé les transports en commun, pour aller jusqu'à sa destination. Si le passager ne prend pas de transport en commun, alors seul le premier intervalle sera présent et couvrira le trajet de l'origine à la destination.

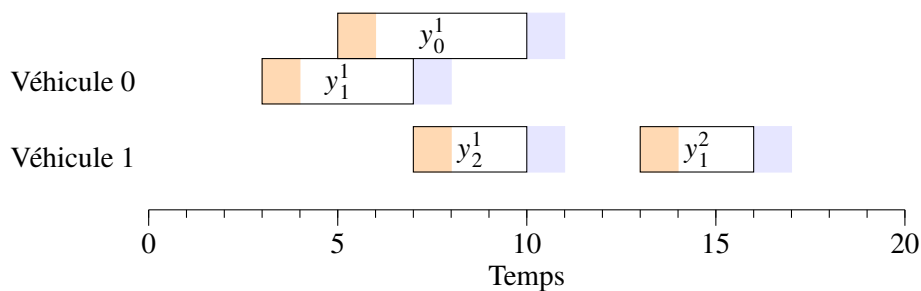


FIGURE 6 – Représentation simplifiée du modèle par intervalles de requêtes de la solution de la figure 3.

On utilise des intervalles par requête et des intervalles par requête-véhicule comme variables de décision. Soit  $y_r^1$ , respectivement  $y_r^2$ , l'intervalle de la première étape du trajet ou de la requête complète dans le cas de non transfert, et l'intervalle de la seconde étape. Les intervalles correspondants liés avec un véhicule  $v$  sont notés  $Y_{r,v}^1$ , resp.  $Y_{r,v}^2$ . La figure 6 montre une représentation pour la solution de la figure 3. Les requêtes  $R_0$  et  $R_2$  n'utilisent qu'un seul véhicule. Elles sont donc représentées uniquement par l'intervalle  $y_r^1$  qui correspond à tout le trajet. La requête  $R_1$  effectue un transfert et est donc représentée par l'intervalle  $y_r^1$  pour la partie avant le transfert et par l'intervalle  $y_r^2$  pour la partie après le transfert. Comme il est possible de ne pas avoir d'intervalle de la seconde partie du trajet,  $y_r^2$  est optionnel, tout comme  $Y_{r,v}^1$  et  $Y_{r,v}^2$ . Soit  $u_r$  une variable booléenne qui est égale à Vrai si la requête  $r$  prend les transports en commun, Faux sinon. Pour chaque requête  $r$ , la station avant le transfert, resp. après le transfert, est  $\phi_r^1$ , resp.  $\phi_r^2$ . Pour ne pas considérer toutes les stations, un prétraitement est réalisé pour chaque requête pour que les domaines de  $\phi_r^1$  et  $\phi_r^2$  ne contiennent que des stations pouvant potentiellement appartenir à une solution. Les carrés orange représentent le moment où les passagers montent dans le véhicule et les carrés bleus le moment où ils en descendent. La fin de l'intervalle se situe avant la descente

du passager, mais le véhicule ne peut repartir qu'après ce temps de service.

Les contraintes du modèle sont :

$$\text{alternative}(y_r^1, [\forall v \in V, Y_{r,v}^1]) \quad \forall r \in R \quad (15)$$

$$\text{alternative}(y_r^2, [\forall v \in V, Y_{r,v}^2]) \quad \forall r \in R \quad (16)$$

$$\text{debut}(y_r^2) - \text{fin}(y_r^1) \geq T^{\text{pub}}(\phi_r^1, \phi_r^2) + s_r \quad \forall r \in R \quad (17)$$

$$\neg u_r \implies \text{taille}(y_r^1) \geq T(O_r, D_r) + s_r \quad \forall r \in R \quad (18)$$

$$u_r \implies \text{taille}(y_r^1) \geq T(O_r, \phi_r^1) + s_r \quad \forall r \in R \quad (19)$$

$$\text{taille}(y_r^2) \geq T(\phi_r^2, D_r) + s_r \quad \forall r \in R \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \text{distMin}(i, j) \quad \forall i \in Y_{r_1,v}^1 \cup Y_{r_1,v}^2, j \in Y_{r_2,v}^1 \cup Y_{r_2,v}^2, \\ \forall r_1, r_2 \in R^2, r_1 \neq r_2, \forall v \in V \end{aligned} \quad (21)$$

$$\text{presence}(y_r^2) = u_r \quad \forall r \in R \quad (22)$$

$$\underline{f}_{O_r} \leq \text{debut}(y_r^1) \leq \bar{f}_{O_r} \quad \forall r \in R \quad (23)$$

$$\neg u_r \implies \underline{f}_{D_r} \leq \text{fin}(y_r^1) \leq \bar{f}_{D_r} \quad \forall r \in R \quad (24)$$

$$u_r \implies \underline{f}_{D_r} \leq \text{fin}(y_r^2) \leq \bar{f}_{D_r} \quad \forall r \in R \quad (25)$$

$$\text{taille}(y_r^1) \leq \bar{l}_r \quad \forall r \in R \quad (26)$$

$$u_r \implies \text{fin}(y_r^2) - \text{debut}(y_r^1) \leq \bar{l}_r \quad \forall r \in R \quad (27)$$

$$\text{cumulative} \left( \sum_{r \in R} \text{pulse}(Y_{r,v}^1 \wedge Y_{r,v}^2, c_r) \right) \leq \bar{q}_v \quad \forall v \in V \quad (28)$$

Les requêtes, avant ou après le transport en commun, ne peuvent être transportées que par un seul véhicule par les contraintes (15) et (16). Le temps pour les transports publics est pris en compte par les contraintes (17). Les contraintes (18) à (21) assurent que les temps de trajet sont respectés. Dans le cas où un transfert est effectué, l'intervalle pour la seconde partie du trajet est présent grâce aux contraintes (22). Les intervalles respectent les fenêtres de temps aux origines et destinations par les contraintes (23) à (25) et le temps maximum de trajet par les contraintes (26) et (27). Les contraintes (28) assurent que les véhicules ne dépassent pas leurs charges. La fonction  $\text{pulse}(y, c)$  augmente de  $c$  la quantité au début de l'intervalle  $y$  et revient à 0 à la fin de l'intervalle.

## 6. Cas d'étude

### 6.1 Instance du Havre

Pour comparer nos modèles, nous allons étudier un cas construit à partir des données de la ville du Havre. Pour cela, 50 requêtes sont générées aléatoirement. Les origines et destinations sont générées dans la zone bleue de la figure 2. Une requête peut être soit entrante, c'est-à-dire qu'il y a une fenêtre de temps uniquement sur son origine, soit sortante avec seulement une fenêtre de temps sur sa destination. Le temps maximal de trajet est limité au double du temps de trajet direct en voiture de l'origine à la destination. Cela permet de favoriser l'utilisation du transport en commun et d'autoriser des détours pour aller chercher ou déposer d'autres requêtes. Les fenêtres de temps ont une largeur de 20 minutes. Une requête a 70% de chance d'être constituée d'une seule personne,



20% de chance de concerner deux personnes et 10% de chance d'impliquer trois personnes. Pour transporter ces personnes, on dispose de 4 véhicules avec une capacité de 6 personnes. L'instance est représentée sur la figure 7, où les points rouges sont les origines et les destinations.

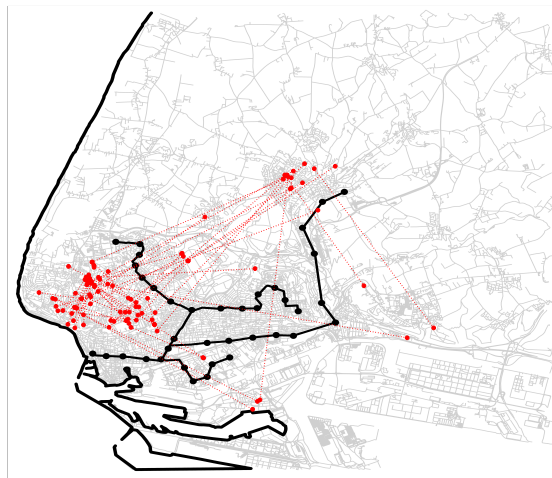


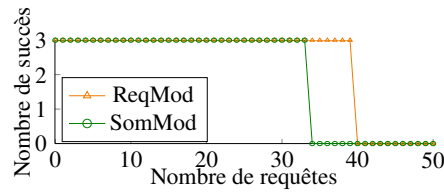
FIGURE 7 – Instance du Havre

## 6.2 Les résultats

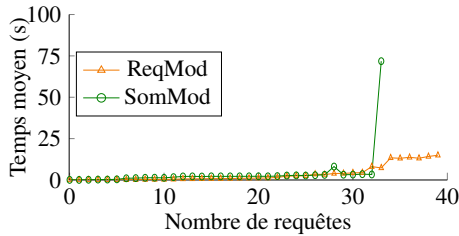
Le solveur utilisé est ILOG CP Optimizer en version 22.1.0. Pour comparer les modèles SomMod et ReqMod, chaque instance est analysée selon le nombre de requêtes prise en compte. Ces dernières sont stockées dans une liste et le solveur est appelé 3 fois sur les  $k$  premières requêtes de l'instance avec  $k$  variant de 0 à 50. Appeler le solveur 3 fois, chaque fois avec une racine différente du générateur de nombres aléatoires, permet d'obtenir une moyenne sur les résultats. En effet, lors de la résolution, le solveur fait des choix reposant sur l'aléatoire, ce qui peut conduire à des solutions différentes entre deux appels. Nous avons fixé en outre une limite de temps de 300 secondes pour chaque appel du solveur. Ainsi, soit le solveur arrive à calculer une solution avant les 300 secondes et on considère que c'est un succès, soit il ne renvoie pas de réponse et c'est un échec. En effet, l'instance a été construite de telle manière qu'il existe toujours une solution pour toutes les valeurs de  $k$ .

La figure 8a montre le nombre de succès trouvés par chaque modèle. Ce nombre varie entre 0 et 3 puisque le solveur est appelé 3 fois pour chaque valeur de  $k$ . Le modèle ReqMod semble le plus robuste puisqu'il est capable de produire une solution jusqu'à  $k = 39$  requêtes, contrairement à SomMod qui s'arrête à  $k = 33$  requêtes. La figure 9a montre le temps moyen de résolution sur les 3 appels pour les deux modèles. Le temps de calcul reste relativement bas pour tous les valeurs de  $k$ , la plupart du temps en dessous de 25 secondes. Cela montre que le solveur soit trouve rapidement des solutions, soit conclut à la non-réalisabilité de l'instance en fonction de la difficulté. Un autre axe d'analyse porte sur le nombre de transferts, montré dans la figure 8c. Les deux modèles produisent des solutions utilisant assez peu le transport en commun, surtout quand il y a beaucoup de requêtes. Notons que SomMod semble plus facilement intégrer les transports en commun que ReqMod.

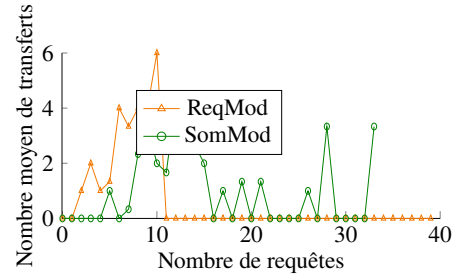
Comme notre but est de générer des solutions initiales et que l'on veut favoriser l'utilisation des transports en commun, on souhaiterait que les solutions produites utilisent les transferts vers les trams pour qu'on puisse par la suite les optimiser avec d'autres méthodes. Dans la phase



(a) Nombre de succès selon le nombre de requêtes



(b) Temps moyen de résolution selon le nombre de requêtes



(c) Nombre moyen de transferts selon le nombre de requêtes

FIGURE 8 – Résultats dans le cas normal

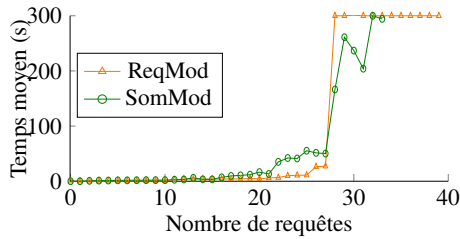
suivante d'optimisation, cela permettrait de ne pas avoir à couper les trajets des requêtes pour insérer du transport en commun. Ce faisant nous pourrions alors zoner les véhicules à la demande. Pour étudier cela, nous avons ajouté aux modèles des contraintes qui obligent chaque requête à changer de véhicule lors de l'utilisation du tram. Nous avons aussi ajouté une fonction objectif consistant à maximiser le nombre total de transferts.

Le nombre de succès du solveur après modification de chaque modèle est identique à la figure 8a. Ainsi, la fonction objectif n'influe pas sur la robustesse des modèles. Le temps moyen de résolution est représenté dans la figure 9a. Lorsqu'il est inférieur à 300 secondes, cela signifie que le solveur a trouvé une solution et qu'on est certain qu'il n'existe pas de solution avec un plus grand nombre de transferts pour au moins un des 3 appels. Lorsque le temps est de 300 secondes, cela signifie que le solveur a trouvé une ou des solutions, sans garantie d'avoir atteint le nombre maximum de transferts. Le solveur a donc continué de chercher jusqu'à la limite des 300 secondes pour les 3 appels. Pour ReqMod, on voit qu'il trouve facilement le nombre maximum de requêtes jusqu'au seuil de  $k = 27$  requêtes. Passé ce seuil, il n'y arrive plus du tout. En revanche, SomMod ne possède pas ce seuil et il arrive à trouver des solutions de temps en temps au-delà de 27 requêtes. On peut le voir dans la figure 9b où les résultats de SomMod et ReqMod divergent au-delà de  $k = 27$ .

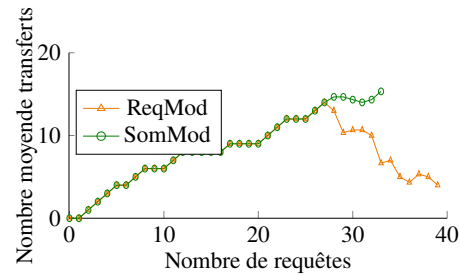
## 7. Conclusion

La question de la mobilité urbaine est un enjeu de société important. Elle est à la fois source et conséquence de profondes inégalités sociales. Le modèle actuel est également marqué par une prédominance des véhicules individuels, ce qui génère des impacts écologiques importants. Le transport multi-modal intégrant du transport à la demande est un moyen d'apporter de la flexibilité tout en utilisant de grandes lignes de transport en commun.

Ce problème est compliqué à résoudre comme l'ont montré les travaux dans la littérature. Pour obtenir de bonnes solutions, il est préférable d'optimiser des solutions initiales à l'aide de



(a) Temps moyen de résolution selon le nombre de requêtes



(b) Nombre moyenne transferts selon le nombre de requêtes

FIGURE 9 – Résultats avec la maximisation du nombre de transferts

métaheuristiques. Nous avons montré dans cet article comment produire des solutions initiales sur un problème fortement contraint en faisant appel à la Programmation Par Contraintes. Deux modèles de PPC, SomMod et ReqMod ont été développés et testés sur une instance construite à partir de la ville du Havre. Les résultats ont montré que ReqMod est plus robuste en terme de succès, il arrive à fournir des solutions pour un certain nombre de requêtes là où SomMod n'y arrive pas. En revanche, SomMod semble plus efficace pour trouver des solutions avec transferts sur un certain nombre de requêtes. Si l'on veut trouver des solutions initiales pour une instance compliquée, avec beaucoup de requêtes par véhicules, il vaut mieux utiliser d'abord ReqMod, car ce modèle a plus de chance de fournir un résultat. SomMod peut être appelé ensuite, car il trouve des solutions plus intéressantes que ReqMod dans certains cas. Ils sont alors utilisés dans une approche en deux étapes.

Ces deux modèles sont suffisamment flexibles pour pouvoir être adaptés à une grande variété d'extensions du modèle, par exemple l'inclusion des horaires de passage des trams, ou la possibilité pour un utilisateur de commencer ou finir son parcours à pied. Certains articles ont également abordé la prise en compte de différences classes de passagers, avec des restrictions de mobilité limitant par exemple le choix du mode de transport.

Enfin, ces modèles donnent une solution initiale à un problème d'optimisation. Il reste ensuite à optimiser les solutions fournies par une recherche locale. L'objectif est donc de coupler la Programmation Par Contraintes avec les métaheuristiques. On peut aussi tenter de modifier les modèles afin de favoriser certaines bonnes caractéristiques de solutions afin que la phase de recherche locale soit la plus efficace possible.

## Références

- Bauchinger, L., Reichenberger, A., Goodwin-Hawkins, B., Kobal, J., Hrabar, M., and Oedl-Wieser, T. (2021). Developing sustainable and flexible rural–urban connectivity through complementary mobility services. *Sustainability*, 13(3) :1280.
- Berbeglia, G., Pesant, G., and Rousseau, L.-M. (2011). Checking the feasibility of dial-a-ride instances using constraint programming. *Transportation Science*, 45(3) :399–412.
- Cappart, Q., Thomas, C., Schaus, P., and Rousseau, L.-M. (2018). A constraint programming approach for solving patient transportation problems. In *Principles and Practice of Constraint*

- Programming : 24th International Conference, CP 2018, Lille, France, August 27-31, 2018, Proceedings 24*, pages 490–506. Springer.
- Delecluse, A., Schaus, P., and Van Hentenryck, P. (2022). Sequence variables for routing problems. In *28th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2022)*, pages 19 :1–19 :17. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum für Informatik.
- Deleplanque, S. and Quilliot, A. (2013). Transfers in the on-demand transportation : the darpt dial-a-ride problem with transfers allowed. In *Multidisciplinary international scheduling conference : theory and applications (MISTA)*, pages 185–205.
- Häll, C. H., Andersson, H., Lundgren, J. T., and Värbrand, P. (2009). The integrated dial-a-ride problem. *Public Transport*, 1 :39–54.
- Ham, A. (2023). Dial-a-ride problem : mixed integer programming revisited and constraint programming proposed. *Engineering Optimization*, 55(2) :257–270.
- Laborie, P. and Rogerie, J. (2008). Reasoning with conditional time-intervals. In *FLAIRS conference*, pages 555–560.
- Liaw, C.-F., White, C. C., and Bander, J. (1996). A decision support system for the bimodal dial-a-ride problem. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A : Systems and Humans*, 26(5) :552–565.
- Liu, C., Aleman, D. M., and Beck, J. C. (2018). Modelling and solving the senior transportation problem. In *Integration of Constraint Programming, Artificial Intelligence, and Operations Research : 15th International Conference, CPAIOR 2018, Delft, The Netherlands, June 26–29, 2018, Proceedings 15*, pages 412–428. Springer.
- Molenbruch, Y., Braekers, K., Hirsch, P., and Oberscheider, M. (2021). Analyzing the benefits of an integrated mobility system using a matheuristic routing algorithm. *European Journal of Operational Research*, 290(1) :81–98.
- Posada, M., Andersson, H., and Häll, C. H. (2017). The integrated dial-a-ride problem with timetabled fixed route service. *Public Transport*, 9 :217–241.
- Posada, M. and Häll, C. H. (2020). A metaheuristic for evaluation of an integrated special transport service. *International Journal of Urban Sciences*, 24(3) :316–338.
- Potter, B. C. (1976). Ann arbor’s dispatching system. *Transportation Research Record*.
- Thomas, C., Kameugne, R., and Schaus, P. (2020). Insertion sequence variables for hybrid routing and scheduling problems. In *International Conference on Integration of Constraint Programming, Artificial Intelligence, and Operations Research*, pages 457–474. Springer.
- Wilson, N. H. M., Weissberg, R. W., and Hauser, J. (1976). Advanced dial-a-ride algorithms research project. Technical report, Massachusetts Institute of Technology, Department of Materials Science and Engineering.

## Biographie des auteurs



Louise Penz est en doctorat en Informatique à l'Université Le Havre Normandie depuis 2021, au sein du laboratoire LITIS (Laboratoire d'Informatique, de Traitement de l'Information et des Systèmes). Elle est encadrée par Éric Sanlaville et Christophe Duhamel. Lors de ses études, elle s'est spécialisée en Recherche Opérationnelle dans le master ORCO (Operations Research, Combinatorics and Optimization) à l'université Grenoble Alpes. Sa thèse porte sur le transport de passagers dans une ville et ses alentours. Deux points majeurs sont abordés : la construction de solutions ainsi que l'optimisation des routes selon certaines contraintes.



Éric Sanlaville est professeur en Informatique à l'Université Le Havre Normandie. Il est co-directeur du LITIS (Laboratoire d'Informatique, de Traitement de l'Information et des Systèmes). Spécialiste en Recherche Opérationnelle, il a longtemps travaillé sur les problèmes d'ordonnancement avant de se tourner vers la logistique, essentiellement portuaire. Il s'intéresse à la conception et l'analyse d'algorithmes d'optimisation, souvent en présence d'incertitudes, en utilisant des modèles de graphes, en particulier dynamiques (dépendant du temps). Il publie dans les revues majeures de la RO et du transport.



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.



# LE PROBLÈME DE TRANSPORT DE PERSONNES AVEC FLOTTE PUBLIQUE, FLOTTE PRIVÉE ET POSSIBILITÉ DE COVOITURAGE

David Brevet<sup>1</sup>, Christophe Duhamel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Scalian, 1 av. des Lions hall B - 3<sup>o</sup> étage, 44800 Saint-Herblain

<sup>2</sup> LITIS, Université Le Havre Normandie  
christophe.duhamel@univ-lehavre.fr

## RESUME

La congestion en centre-ville ou sur les grands axes d'accès est source de nombreuses nuisances. Actuellement, les véhicules personnels sont majoritairement préférés mais leur capacité est largement sous-utilisée. Cependant, l'essor des systèmes d'information et de navigation permet de simplifier l'utilisation des véhicules personnels pour le transport partagé, en particulier dans le cadre de déplacements vers le lieu de travail. Nous présentons ici le DARP-PV-AN, un problème consistant à optimiser un système de transport combinant flotte flexible et flotte privée pour satisfaire les requêtes de transport. De plus, chaque personne peut définir plusieurs possibilités de points d'origine et de destination. Nous présentons deux métaheuristiques, ELS et AGH, pour calculer des solutions de bonne qualité. Les méthodes sont testées sur 35 instances et leurs résultats sont analysés.

**MOTS CLÉS :** transport à la demande, covoiturage, optimisation, métaheuristique.

## ABSTRACT

Congestion in city centres or on major access roads produces numerous nuisances. Currently, personal vehicles are mostly preferred but their capacity is largely underutilized. However, the development of information and navigation systems can simplify the use of personal vehicles in the context of shared transport, particularly when going to/from the workplace. Here we present DARP-PV-AN, a problem consisting of optimizing a transportation system. It combines flexible fleet and private fleet to ensure transportation requests. Additionally, each person can propose several possible origin and destination points. We present two metaheuristics, ELS and AGH, to compute solution of good quality. The methods are tested on 35 instances and their results are analysed.

**KEYWORDS :** on-demand transportation, ridesharing, optimization, metaheuristic.

## 1. Introduction

La congestion en centre-ville ou sur les grands axes d'accès est source de nombreuses nuisances, en termes d'émission de gaz à effet de serre, de pollution, de bruit, de stress, de retards, d'accidents, entre autres. Si l'on considère d'autres facteurs tels que l'augmentation du prix de l'essence, l'usage du véhicule personnel pour se rendre sur son lieu de travail ou en revenir devient vite une contrainte significative dans l'organisation quotidienne. De ce fait, la recherche de solutions alternatives telles que le basculement sur le transport en commun, l'utilisation de parkings relais ou encore le covoiturage prennent tout leur sens.

Actuellement, les véhicules personnels sont majoritairement préférés mais leur capacité est largement sous-utilisée. En effet, la plupart des déplacements pour se rendre au travail sont individuels, sans passagers. Le constat est ancien et de nombreuses politiques incitatives ont été lancées pour favoriser le co-voiturage : création de parking relais dédiés au co-voiturage, voies réservées sur les grands axes, voire subventions. La généralisation des systèmes de navigation intégrée dans les véhicules, combinée à l'essor des sites en lignes collaboratifs, facilite la création de nouveaux services de transport basés sur le partage. Un véhicule personnel peut alors servir de véhicule de transport partagé, en particulier dans le cadre du déplacement vers le lieu de travail.

Ce mode de transport 'individualisé' peut même venir en appui à un mode de transport plus classique, par exemple utilisant une flotte de navettes. Dans ce cadre, plusieurs possibilités de transport sont offertes : prendre une navette du service en commun, prendre son véhicule pour éventuellement transporter d'autres personnes en chemin ou pas, ou enfin partager le véhicule d'une autre personne. On a ainsi un système hybride, combinant une flotte flexible (les navettes) avec une flotte privée (les véhicules personnels).

Cette solution pose cependant quelques questions qui doivent être traitées en amont. Il convient de bien cibler le cadre juridique, en particulier si le transport s'effectue dans le contexte professionnel. Une autre question concerne le respect de la vie privée. En effet, les systèmes de covoiturage mettent en relation des transporteurs avec des personnes transportées et les données sensibles des individus (identité, domicile, etc.) sont susceptibles d'être exploitées par des entités malveillantes pour organiser des cambriolages ou des agressions. Une solution pour limiter ce risque consiste à proposer plusieurs lieux de rendez-vous possibles afin d'être pris en charge lors d'un covoiturage. Le système d'affectation détermine alors quels points seront choisis pour prendre et déposer une personne.

Nous présentons ici le problème consistant à optimiser un système de transport combinant flotte flexible et flotte privée pour satisfaire les requêtes de transport de personnes, de leur point d'origine à leur point de destination. De plus, chaque personne peut définir plusieurs points d'origine et plusieurs points de destination. Dans un premier temps, nous rappellerons le problème fondamental de transport à la demande, le DARP avant de définir son extension, le DARP-PV-AN. Nous présenterons ensuite deux méthodes de résolution approchées, la métaheuristique ELS et un algorithme génétique hybride. Les deux méthodes seront comparées sur un ensemble d'instances afin de tirer des conclusions.



## 2. Le DARP

Le problème du transport à la demande (DARP – Dial-A-Ride Problem) fait partie de la classe des Problèmes de Tournées de Véhicules. Il est une extension du Problème de Collecte et Livraison (PDP – Pickup and Delivery Problem) et fait partie, à ce titre, de la classe des problèmes NP-difficiles. Les premiers travaux sur le DARP remontent à (Wilson et al., 1971). Une définition moderne du problème a été proposée par (Cordeau et Laporte, 2003).

On considère un ensemble  $R$  de  $n$  clients et une flotte  $F$  de  $m$  véhicules. Chaque client correspond à une requête de transport, constituée d'un point d'origine (pickup), d'un point de destination (delivery) et d'une quantité de personnes à transporter. A chaque point est associée une fenêtre de temps, c'est-à-dire un intervalle de temps durant lequel l'opération (pickup ou delivery) peut être réalisée et un temps de service pour réaliser l'opération. Un véhicule arrivant sur un point avant le début de la fenêtre de temps doit attendre jusqu'au début. Il ne peut en revanche arriver après la fin. Une durée maximale de transport entre un pickup et son delivery, le riding time, est définie afin d'imposer un certain niveau de qualité de service pour chaque client.

La flotte de véhicule est supposée homogène. Tous les véhicules possèdent la même capacité, la même vitesse et la même autonomie. Ils sont initialement situés sur un dépôt duquel ils partent et vers lequel ils doivent revenir une fois leur tournée terminée. Le dépôt possède également une fenêtre de temps définissant la date de sortie au plus tôt et la date de retour au plus tard. Chaque tournée est effectuée par un seul véhicule et doit respecter un ensemble de contraintes comme la capacité maximale du véhicule, le traitement intégral des requêtes prises en compte ou encore le respect des fenêtres de temps. L'objectif est de minimiser la somme des distances parcourues par les véhicules pour assurer la prise en compte de toutes les requêtes.

## 3. Le DARP-PV-AN

Le DARP-PV-AN (DARP with Private Vehicle and Alternative Nodes) reprend les données du DARP, notamment l'ensemble  $R$  des requêtes et la flotte flexible de véhicules  $F$ . L'objectif reste la minimisation des distances parcourues par les véhicules. Deux nouveaux éléments sont pris en compte, la flotte privée et les nœuds alternatifs.

### 3.1 La flotte privée

Dans le DARP-PV-AN, l'ensemble  $R$  des requêtes peut toujours être desservi par la flotte flexible  $F$ . Ces requêtes peuvent aussi être desservies par une flotte décentralisée de véhicules privés  $F'$ . Elle est définie par un sous-ensemble  $R' \subseteq R$  de clients pouvant effectuer leur trajet avec leur véhicule personnel, voire assurer le transport d'autres clients. Cette possibilité de covoiturage vient donc en appui de la flotte  $F$ . Elle peut même s'y substituer le cas échéant. La figure 1 illustre un cas dans lequel la flotte flexible localisée au dépôt (carré gris) transporte les clients A et B par le premier véhicule et les clients C et D par le second véhicule. Dans le même temps, le client E utilise son véhicule et transporte également le client F.

Cette approche permet de modéliser des organisations de transport dans lesquelles une

entreprise possède une flotte de véhicules ou contracte un prestataire pour assurer le transport porte-à-porte de ses employés. Dans le même temps, ces employés peuvent également utiliser leur propre véhicule voire effectuer du covoiturage s'ils y trouvent un avantage. Les possibilités de covoiturage sont cependant limitées par la contrainte de riding time de l'employé. Ainsi, celui-ci ne peut effectuer trop de détours, ni réaliser des détours trop longs, comme illustré par la zone grise autour de la requête du client E dans la figure 1.

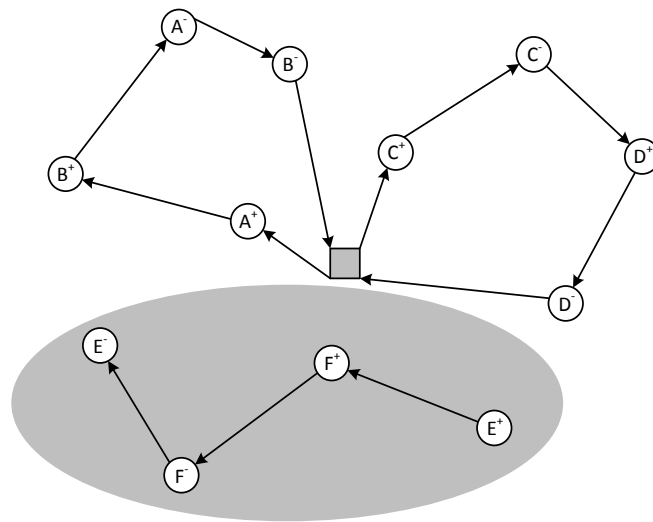


Figure 1: exemple avec 2 véhicules flexibles et 1 véhicule privé

### 3.2 Les nœuds alternatifs

Pour des questions de sécurité, il est préférable que les clients n'exposent pas leur adresse personnelle ni leur position exacte. A la place, ils peuvent indiquer un lieu proche, accessible rapidement à pied mais ne dévoilant pas la localisation exacte. En parallèle, il peut être intéressant pour une personne de proposer plusieurs possibilités de points de rendez-vous pour son pickup et son delivery. Ceci permet d'apporter davantage de flexibilité au système, notamment pour les personnes habitant en zone urbaine ou pouvant se rendre sur des points de rendez-vous prédéfinis (les parking relais, les zones de covoiturage par exemple).

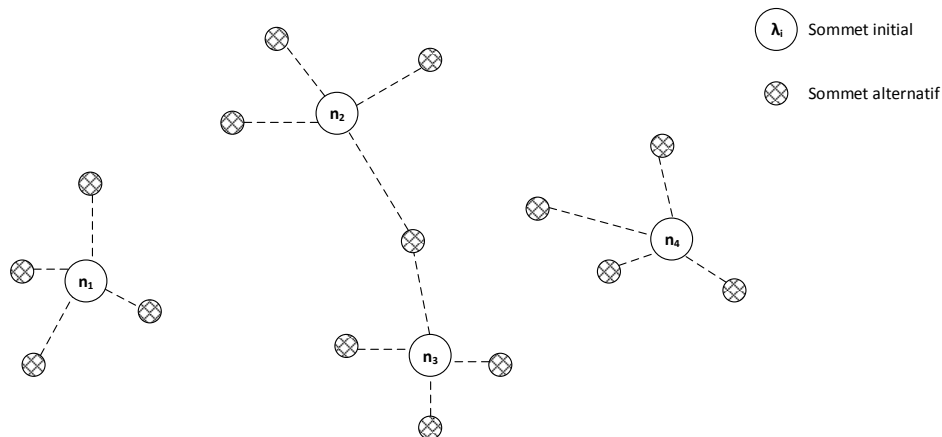


Figure 2 : points de requête avec nœuds alternatifs

Ces deux considérations conduisent à la définition, pour chaque requête, d'un ensemble de points de pickup et d'un ensemble de points de delivery possibles. Ces deux ensembles contiennent les points de pickup et delivery initiaux dans le cas où la personne peut utiliser son véhicule. Traiter la requête consiste alors à sélectionner un point dans chacun des deux ensembles. De cette manière, identifier les localisations initiales et finales précises d'un client devient plus complexe, ce qui contribue à renforcer la sécurité du client. De plus, un même point alternatif, par exemple une zone de covoiturage, peut être proposé par plusieurs clients, comme illustré en figure 2 où  $n_2$  et  $n_3$  partagent un point alternatif. Ceci simplifie l'organisation du covoiturage en permettant au conducteur de prendre en charge plusieurs clients à la fois, que ce soit avec un véhicule de la flotte flexible ou privée.

#### 4. Métaheuristiques pour la résolution du DARP-PV-AN

L'introduction d'une flotte privée et de nœuds alternatifs rend le problème sensiblement plus complexe que le DARP. Par conséquent, la résolution exacte en utilisant des formulations reposant sur la Programmation Linéaire en Nombres Entiers est limitée à des instances de très petite taille. Deux métaheuristiques sont présentées ici pour résoudre le problème de manière approchées : ELS et un algorithme génétique hybride.

##### 4.1 Une métaheuristique de type ELS

La métaheuristique ELS (Evolutionary Local Search) a été développée par (Wolf et Merz, 2007) et constitue une extension de la métaheuristique ILS (Iterated Local Search), proposée par (Lourenço et al., 2003). Partant d'une solution initiale, ILS consiste à appliquer sur la solution courante une mutation suivie d'une recherche locale tant qu'un critère d'arrêt n'est pas atteint, généralement un nombre total d'itérations ou un nombre d'itérations sans amélioration de la meilleure solution. Dans ELS, l'itération consiste à appliquer la mutation puis la recherche locale sur un certain nombre de copies de la solution courante. On conserve ensuite la meilleure solution produite pour l'itération suivante, comme illustré en figure 3.

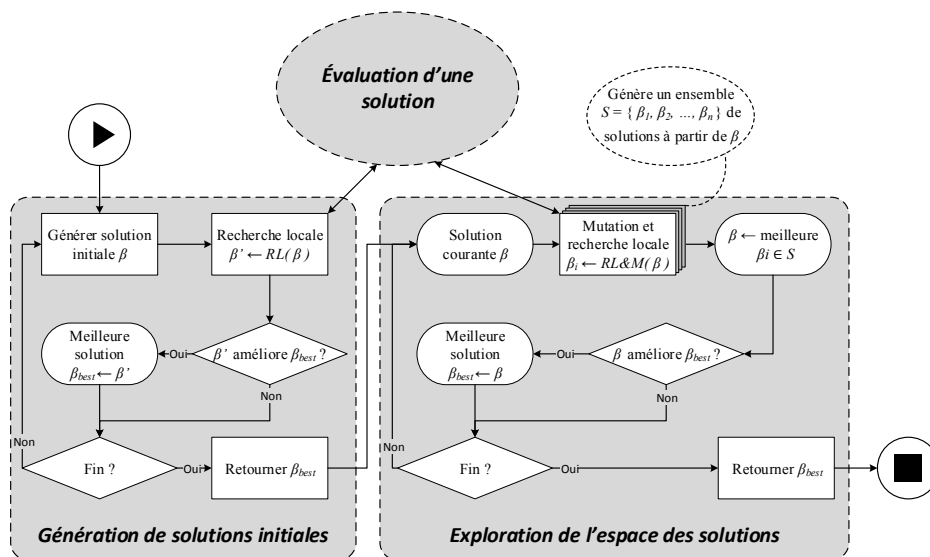


Figure 3 : schéma général de la métaheuristique ELS

La version de ELS pour le DARP-PV-AN reprend les principes posés par (Chassaing et al., 2016) pour la résolution du DARP. L'heuristique constructive ainsi que la recherche locale ont été modifiées pour prendre en compte la flotte privée ainsi que les nœuds alternatifs.

## 4.2 Un algorithme génétique hybride

L'Algorithme Génétique Hybride (AGH) repose sur la l'association d'un algorithme génétique avec un enrichissement de la population par Programmation Linéaire en Nombres Entiers. L'algorithme repose sur 3 composantes :

- La première composante est l'algorithme génétique lui-même. Il gère la population des individus, c'est-à-dire le croisement et la mutation des individus ainsi que l'évolution de la population. Chaque individu est encodé sous forme d'un vecteur d'affectation des requêtes aux véhicules ;
- La seconde composante est l'algorithme d'évaluation des individus utilisant le principe de séparation et évaluation (branch-and-bound). Il détermine la séquence de passage optimale sur les points de pickup et delivery pour chaque véhicule utilisé, en respectant l'ensemble des contraintes du DARP-PV-AN. Une mémoire globale des tournées est utilisée pour éviter de réévaluer des tournées déjà évaluées dans les itérations précédentes ;
- La dernière composante génère de nouvelles solutions en utilisant la mémoire globale des tournées. La meilleure combinaison de tournées permettant de traiter toutes les requêtes est calculée en résolvant par Programmation Linéaire en Nombres Entiers un problème de couverture minimale pondérée (WSCP).

Le schéma général de AGH est présenté dans la figure 4.

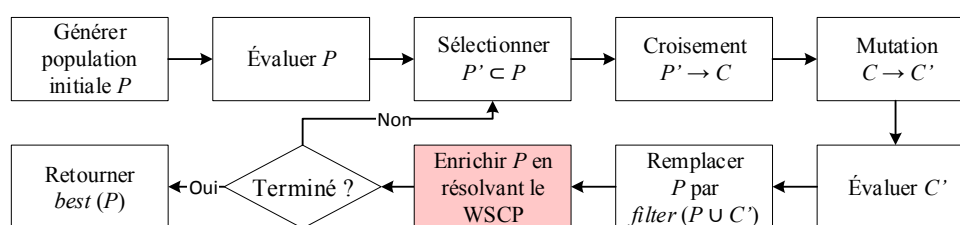


Figure 4 : schéma général de AGH

## 5. Résultats expérimentaux

Les deux méthodes ont été testées sur un ensemble de 35 instances réalistes reposant sur des graphes de transport asymétriques générés aléatoirement. Les calculs ont été réalisées sur un ordinateur sous linux muni d'un processeur Intel Xeon E7-8890v3 2,5 GHz avec 3 To de mémoire. CPLEX v12.6 a été utilisé pour la résolution du problème de couverture minimale pondérée.

La figure 5 présente les résultats des deux métaheuristiques. Pour chaque instance, le nombre de requêtes  $n$ , le nombre total de nœuds  $N^T$ , la taille de la flotte flexible  $K$ , la taille de la flotte privée  $K'$  et le budget en temps de calcul  $TT$  sont indiqués. Pour chaque méthode,  $Obj$  indique la valeur de la meilleure solution trouvée et  $T^*$  le temps pour l'obtenir. Le gap mesure l'écart relatif entre les deux solutions obtenues. Les valeurs en gras indiquent les meilleures

solutions trouvées. Il ressort que AGH produit le meilleur résultat pour 32 des 35 instances, 7 fois seulement pour ELS. Le gain de la solution obtenue par AGH par rapport à ELS est en moyenne de 3,92% et peut atteindre 15,49%. De plus, AGH calcule sa solution plus rapidement pour 27 instances sur 35.

<i>Instance</i>	<i>n</i>	<i>N<sup>T</sup></i>	<i>K</i>	<i>K'</i>	<i>TT(s)</i>	ELS		AGH		
						<i>Obj</i>	<i>T*(s)</i>	<i>Obj</i>	<i>Gap%</i>	<i>T*(s)</i>
PCD_20_OVP	10	61	4	0	600.00	<b>811.35</b>	0.00	<b>811.35</b>	0.00	1.11
PCD_20_2VP	10	61	4	2	600.00	730.65	300.00	<b>715.54</b>	-2.07	3.87
PCD_20_4VP	10	61	4	4	600.00	730.65	300.00	<b>715.54</b>	-2.07	5.99
PCD_20_6VP	10	61	4	6	600.00	658.24	300.60	<b>643.13</b>	-2.29	4.49
PCD_20_10VP	10	61	4	10	600.00	435.52	330.60	<b>388.96</b>	-10.69	1.61
PCD_40_OVP	20	125	8	0	900.00	<b>1109.59</b>	6.00	<b>1109.59</b>	0.00	9.43
PCD_40_2VP	20	125	8	2	900.00	<b>1028.41</b>	455.40	<b>1028.41</b>	0.00	16.12
PCD_40_6VP	20	125	8	6	900.00	747.73	433.20	<b>741.63</b>	-0.82	10.15
PCD_40_8VP	20	125	8	8	900.00	<b>667.43</b>	454.80	<b>667.43</b>	0.00	20.65
PCD_40_10VP	20	125	8	10	900.00	627.54	679.20	<b>614.79</b>	-2.03	31.58
PCD_40_20VP	20	125	8	20	900.00	512.24	458.40	<b>487.85</b>	-4.76	11.13
PCD_60_OVP	30	191	20	0	1200.00	1525.62	846.60	<b>1521.37</b>	-0.28	1077.96
PCD_60_2VP	30	191	20	2	1200.00	1479.83	924.00	<b>1479.82</b>	0.00	115.82
PCD_60_8VP	30	191	20	8	1200.00	1127.55	957.00	<b>1054.46</b>	-6.48	92.17
PCD_60_10VP	30	191	20	10	1200.00	1133.38	663.60	<b>1031.14</b>	-9.02	89.75
PCD_60_16VP	30	191	20	16	1200.00	946.43	1101.00	<b>899.72</b>	-4.94	796.93
PCD_60_30VP	30	191	20	30	1200.00	911.15	612.60	<b>775.40</b>	-14.90	809.03
PCD_80_OVP	40	243	20	0	1500.00	2032.86	723.60	<b>2009.90</b>	-1.13	396.44
PCD_80_2VP	40	243	20	2	1500.00	1904.62	1257.60	<b>1871.82</b>	-1.72	447.45
PCD_80_10VP	40	243	20	10	1500.00	1792.16	1444.20	<b>1674.83</b>	-6.55	1053.71
PCD_80_14VP	40	243	20	14	1500.00	1679.32	1281.60	<b>1624.63</b>	-3.26	85.87
PCD_80_20VP	40	243	20	20	1500.00	1452.10	846.00	<b>1421.29</b>	-2.12	391.31
PCD_80_40VP	40	243	20	40	1500.00	1323.59	853.20	<b>1198.17</b>	-9.48	1432.43
PCD_100_OVP	50	307	50	0	1800.00	<b>2384.21</b>	1405.20	2475.91	3.85	911.05
PCD_100_4VP	50	307	50	4	1800.00	2303.97	1528.20	<b>2247.32</b>	-2.46	1353.06
PCD_100_14VP	50	307	50	14	1800.00	1991.67	1510.20	<b>1925.30</b>	-3.33	1017.70
PCD_100_18VP	50	307	50	18	1800.00	1921.00	1417.80	<b>1903.03</b>	-0.94	761.86
PCD_100_26VP	50	307	50	26	1800.00	1858.81	1323.00	<b>1820.66</b>	-2.05	903.25
PCD_100_50VP	50	307	50	50	1800.00	1842.80	1055.40	<b>1597.78</b>	-13.30	1044.82
PCD_120_OVP	60	371	50	0	2100.00	<b>2817.98</b>	2079.60	2946.83	4.57	1980.90
PCD_120_4VP	60	371	50	4	2100.00	<b>2608.24</b>	1240.80	2702.30	3.61	2148.09
PCD_120_16VP	60	371	50	16	2100.00	2300.61	2097.60	<b>2134.50</b>	-7.22	1047.46
PCD_120_20VP	60	371	50	20	2100.00	2453.28	1538.40	<b>2073.20</b>	-15.49	1830.19
PCD_120_30VP	60	371	50	30	2100.00	2174.94	1894.80	<b>2042.93</b>	-6.07	1085.00
PCD_120_60VP	60	371	50	60	2100.00	2114.03	1518.60	<b>1820.70</b>	-13.88	1980.90
Moyenne									-3.92	

Figure 5 : comparaison des deux métaheuristiques

La figure 6 illustre la vitesse de convergence moyenne de ELS et AGH. Pour chaque méthode, chaque point indique l'écart moyen de la meilleure solution courante sur le pourcentage de temps total utilisé. On note de AGH converge beaucoup plus rapidement. Il atteint la qualité des meilleures solutions de ELS en 10% du temps alloué. On note également que reposer sur une population de solutions permet à AGH de démarrer avec de meilleures solutions initiales. L'écart initial est de 68,44% pour ELS et de 38,19% pour AGH.

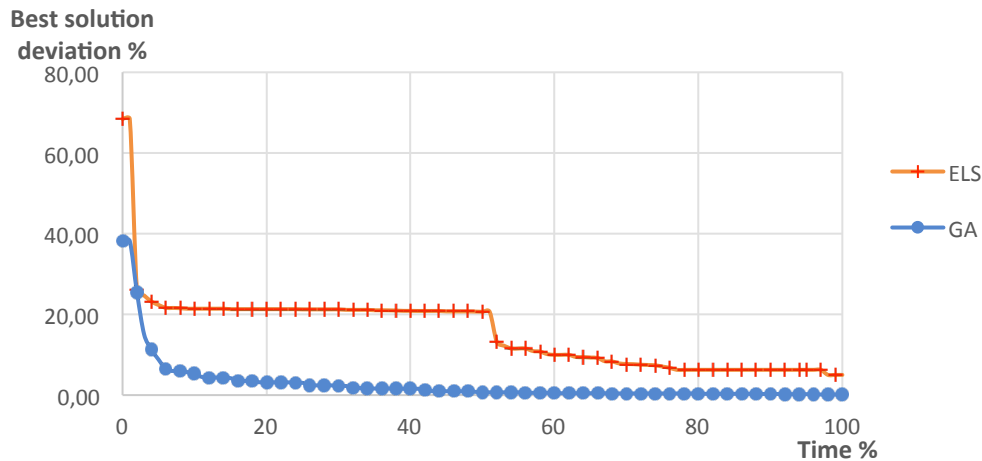


Figure 6 : comparaison de la vitesse de convergence moyenne de ELS et AGH

La figure 7 montre l'intérêt de la partie hybride (ajout d'individus optimisés) de AGH. L'écart initial est de 38,19% avec enrichissement et de 132,01 % sans. L'écart final moyen est de 4,02% sans enrichissement. Notons que AGH atteint la qualité des solutions produites par AG (sans enrichissement) avec 12% du budget temps alloué.

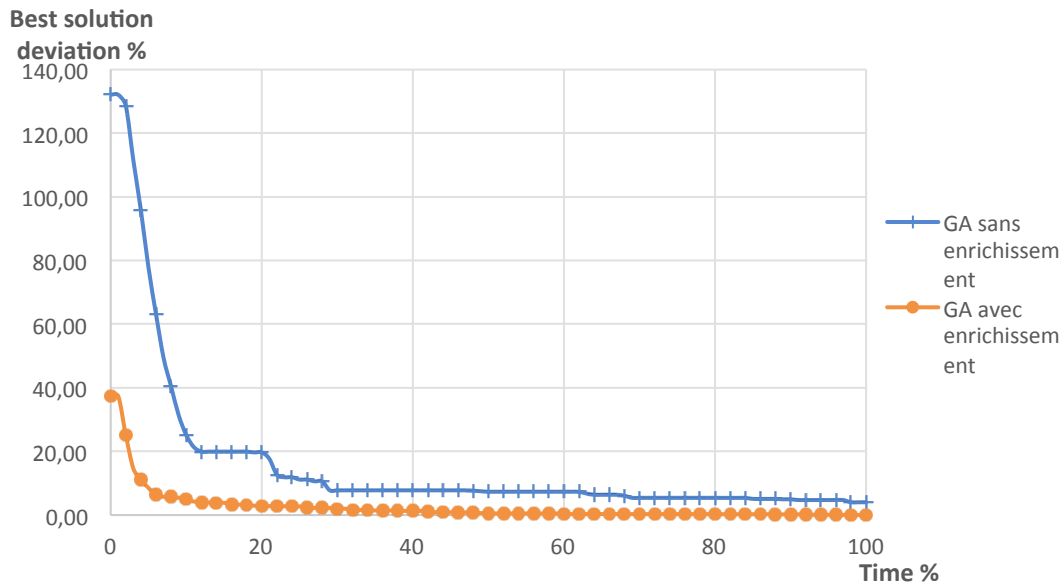


Figure 7 : impact de l'enrichissement de population dans AGH

Enfin, une analyse des solutions produites par ELS et AGH (Brevet, 2019) a montré que l'utilisation de la flotte privée permet de réduire significativement la distance totale parcourue par les véhicules. La qualité de service perçue par les clients, au sens de la durée totale de trajet et de la durée totale d'attente, est également meilleure. Idem pour la qualité de service perçue par les conducteurs, au sens de la durée totale de conduite.

## 6. Conclusions

Nous avons présenté le DARP-PV-AN, une extension du problème de transport à la

demande. Elle inclut la capacité de covoiturage par l'utilisation des véhicules personnels des clients. Elle inclut également la possibilité de proposer plusieurs points de rendez-vous, pour le pickup comme pour le delivery. Deux métaheuristiques, ELS et AGH, sont proposées pour résoudre les instances de DARP-PV-AN. Les expérimentations numériques indiquent que AGH est significativement meilleure que ELS, notamment grâce à l'hybridation. Les solutions obtenues utilisent majoritairement la flotte privée, ce qui permet d'améliorer tous les indicateurs de qualité. Ce travail peut être utilisé pour analyser l'interaction économique entre les deux modes de transport. En particulier, ceci permettrait, pour une entreprise, d'étudier les modalités d'incitation financière au covoiturage et d'intégrer cette politique dans la décarbonation de ses activités. On peut aussi envisager la possibilité de transport multimodal, intégrant les lignes de transport en commun dans les solutions de déplacement.

## 7. Références bibliographiques

Brevet, D.: Conception de services pour la mobilité urbaine respectueux des données privées et assurant la sécurité des clients et des véhicules. Thèse de Doctorat, Université Clermont Auvergne (2019)

Chassaing, M., Duhamel, C., Lacomme, P.: An ELS-based approach with dynamic probabilities management in local search for the dial-a-ride problem. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 48, 119–133 (2016)

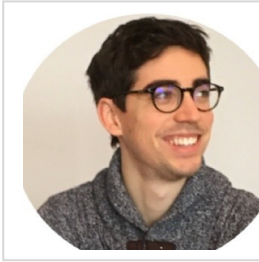
Cordeau, J.-F., Laporte, G.: A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem. *Transp. Res. Part B Methodol.* 37(6), 579–594 (2003)

Lourenço, H.R., Martin, O.C., Stützle, T.: Iterated local search. In: *Handbook of Metaheuristics*. Springer, Boston, pp. 320–353 (2003)

Wilson, N.H., Sussman, J., Wong, H.-K., Higonnet, T.: *Scheduling Algorithms for a dial-a-ride system*. Massachusetts Institute of Technology. Urban Systems Laboratory (1971)

Wolf, S., Merz, O.: Evolutionary local search for the super-peer selection problem and the p-hub median problem. In: *International Workshop on Hybrid Metaheuristics*. Springer, Berlin (2007)

## Biographie des auteurs



David Brevet est consultant en Informatique dans l'entreprise Scalian sur Nantes. Suite à un master en Recherche Opérationnelle sur Nantes en 2016, il obtient un doctorat sous la direction de Philippe Lacomme, Christophe Duhamel et Gérard Fleury dans le domaine de l'optimisation des transports en 2019. Consultant depuis 2021, ses travaux actuels portent sur l'écoconception logicielle, l'utilisation de l'intelligence artificielle au sein des entreprises et l'étude de données via la proposition de modèles mathématiques, l'application de méthodes d'optimisation et la proposition de nouveaux algorithmes. Il a publié 5 articles dans des revues internationales liés au domaine de la Recherche Opérationnelle.



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.



# APPLICATION POTENTIELLE DES VÉHICULES DE MOBILITÉ AÉRIENNE AVANCÉE AU SERVICE D'AIDE MÉDICALE D'URGENCE

**Julián Alberto Espejo-Díaz<sup>1,2</sup>, Edgar Alfonso-Lizarazo<sup>1</sup>, Jairo R. Montoya-Torres<sup>2</sup>,  
François Guillet<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Université Jean Monnet Saint-Étienne, LASPI  
F-42023, Saint-Étienne, France

julian.alberto.espejo.diaz@univ-st-etienne.fr, edgar.alfonso.lizarazo@univ-st-etienne.fr,  
guillet@univ-st-etienne.fr

<sup>2</sup>Universidad de La Sabana, School of Engineering, Research group Logistics Systems  
Campus Universitario, Puente del Comun, Km. 7 Autopista Norte, Bogota, Colombia  
jairo.montoya@unisabana.edu.co

## RESUME

Les développements les plus récents dans la technologie de mobilité aérienne avancée laisse présager que des aéronefs tels que les véhicules à décollage et atterrissage vertical électriques (eVTOL pour l'abréviation anglaise) seront bientôt largement utilisés. Un des secteurs d'application promettants est celui des services médicaux d'urgence. Ces types de véhicules ont le potentiel à se déplacer rapidement vers les sites d'urgence avec la possibilité d'effectuer des missions à un coût inférieur à des hélicoptères. Un aspect important de l'intégration de cette technologie dans les services médicaux d'urgence consiste à déterminer les emplacements des zones de décollage et d'atterrissage, communément appelées vertiports. Dans cette étude, nous présentons une méthodologie pour localiser des vertiports au sein d'un réseau de soins de santé afin d'améliorer la couverture des services médicaux d'urgence en particulier dans les zones difficiles d'accès. La méthodologie a été appliquée au contexte de la région Auvergne-Rhône-Alpes en France. Les résultats montrent que l'autonomie opérationnelle de véhicules eVTOL est un facteur crucial influençant grandement l'adoption de cette technologie dans le transport aéromédical d'urgence.

**MOTS CLÉS:** Services médicaux d'urgence, mobilité aérienne avancée, clustering, problème d'emplacement d'installations.

## ABSTRACT

The most recent developments in advanced air mobility technology indicate that aircraft, such as electric vertical take-off and landing (eVTOL) vehicles, will soon find widespread use across various sectors. An area where this innovation holds significant promise is in emergency medical services. These types of vehicles have the potential to reach emergency sites quickly. Additionally, it is forecasted that they can perform emergency missions at a lower cost compared to helicopters. An important aspect in the integration of this technology into emergency medical services is determining the locations for take-off and landing areas, commonly known as vertiports. In

this study, we present a methodology for locating vertiports within a healthcare network to improve coverage of emergency medical services in hard-to-reach areas. The methodology is evaluated using data from the Auvergne-Rhône-Alpes region in France. The findings suggest that the autonomy of eVTOL vehicles is a crucial factor influencing the adoption of this technology in emergency aeromedical transport.

**KEYWORDS:** Emergency medical services, advanced air mobility, clustering, facility location problem.

## 1. Introduction

Le Service d'Aide Médicale Urgente (SAMU) est un service essentiel dans les sociétés qui assurent des soins médicaux aux patients qui ne peuvent pas se rendre par eux-mêmes dans un établissement de santé. À cette fin, des équipes de paramédicaux sont envoyées sur les lieux des patients dans des véhicules d'urgence, tels que des ambulances. Un facteur critique dans les SAMU est le temps de réponse, plus il est long, plus les conséquences peuvent être critiques, en particulier pour les patients victimes d'un accident ou d'un traumatisme (Mell et al., 2017). Par conséquent, on s'attend à ce que les équipes de paramédicaux arrivent sur les lieux de l'urgence le plus rapidement possible. Le retard dans la réponse dépend de plusieurs facteurs. Le type de véhicules d'urgence utilisé apparaît comme un facteur essentiel (Reuter-Oppermann et al., 2017). Chappelle et al. (2018) souligne d'ailleurs l'intérêt de l'utilisation des services aériens au sens large pour améliorer l'efficacité du SAMU dans des zones difficiles d'accès.

Les récents développements dans la technologie des véhicules à décollage et atterrissage vertical électriques (eVTOL pour l'abréviation anglaise) laissent présager que ces types de véhicules feront partie intégrante des sociétés dans les années à venir. Ce type de véhicule fait partie du paradigme de la Mobilité Aérienne Avancée (MAA) qui vise à rendre les opérations des services aériens sûres, efficaces et accessibles dans les zones urbaines, rurales et suburbaines (Cohen et al., 2021). Ce travail explore l'utilisation potentielle des aéronefs de MAA dans le cadre du SAMU.

Actuellement, certains prestataires de soins de santé effectuent le transport aéromédical en utilisant des hélicoptères. Ces véhicules se déplacent plus rapidement que les ambulances terrestres, ce qui peut améliorer le taux de survie des patients traumatisés. Cependant, le coût du transport aéromédical en hélicoptère est élevé. Le coût moyen par vol variait entre 6000 et 13000 USD en 2016 (U.S. Government Accountability Office, 2017). Les coûts élevés et le manque de réglementation de ce service font que, dans certains cas, les patients reçoivent des factures de milliers de dollars pour ce service (Kelly, 2020). Par ailleurs, moins de 2% des missions d'urgence sont effectuées en utilisant des hélicoptères aux États-Unis au cours d'une année, par conséquent une utilisation reste très limitée (Association for Air Medical Services, 2017; NEMSIS, 2019). Les coûts des missions utilisant des véhicules MAA semblent par contre entrevoir des économies intéressantes. L'entreprise de transport Uber a estimé des coûts de vol par heure des véhicules MAA de l'ordre de 662 USD/h, soit moins que les 1253 USD/h des hélicoptères actuels (Garrow et al., 2021). De plus, avec certaines améliorations technologiques dans la technologie MAA, le transport aéromédical effectué par des aéronefs eVTOL pourrait être encore plus économique (Goyal and Cohen, 2022).

Le travail synthétisé dans ce document explore le choix de l'emplacement des vertiports pour les véhicules eVTOL utilisés pour les services médicaux d'urgence avec pour objectif l'amé-

lioration de la couverture dans les zones difficiles d'accès. Il s'agit de zones rurales ou éloignées où l'accès par voie terrestre est long.

Le reste de cet article est organisé comme suit. La Section 2 contextualise l'étude tandis que la Section 3 présente les travaux connexes sur le problème d'emplacement des vertiports. Ensuite, la Section 4 est dédiée à la méthodologie pour localiser les vertiports dans un réseau de santé afin d'améliorer la couverture des services médicaux d'urgence dans les zones difficiles d'accès. La Section 5 introduit une étude de cas, tandis que la section 6 montre les résultats de la méthodologie proposée dans cette étude de cas. Enfin, la section 7 regroupe les conclusions.

## 2. Contexte

Les principaux éléments de la mobilité aérienne avancée concernés par ce travail sont les vertiports et les aéronefs eVTOL. Ces aéronefs sont équipés de moteurs électriques, ce qui leur permet de décoller et d'atterrir verticalement. Par conséquent, les aéronefs eVTOL ne nécessitent pas de pistes, les rendant adaptés aux opérations dans des villes denses. Actuellement, il y a un intérêt significatif pour le développement de telles conceptions pour des services tels que les taxis aériens à la demande. Des exemples d'aéronefs de ce type sont le CityAirbus NextGen d'Airbus (Airbus, 2022) et le Volocity de Volocopter (Volocopter, 2022) présenté dans la Figure 1.



FIGURE 1 – Aéronef Volocity (Volocopter, 2022)

Les vertiports peuvent être considérés comme les aéroports spécifiquement conçus pour les véhicules de MAA. La Figure 2 présente la vision de l'infrastructure future future d'un vertiport (Groupe ADP, 2022). Actuellement, plusieurs projets visent à construire des vertiports pour tester les opérations MAA. Un exemple de ce type d'initiatives est la plateforme d'essai de terminal passager pour les futures opérations eVTOL de Groupe ADP et Skyports (Groupe ADP, 2022). Ce vertiport est situé sur l'aérodrome de Pontoise-Cormeilles-en-Vexin dans le département du Val-d'Oise, à quelques kilomètres au nord de Paris, en France. Notamment, la société Volocopter a effectué des vols d'essai avec ses prototypes eVTOL sur ce vertiport. Le projet vise à déployer une flotte de dix VoloCity (aéronefs de Volocopter) et à mettre en place cinq vertiports supplémentaires d'ici 2024.

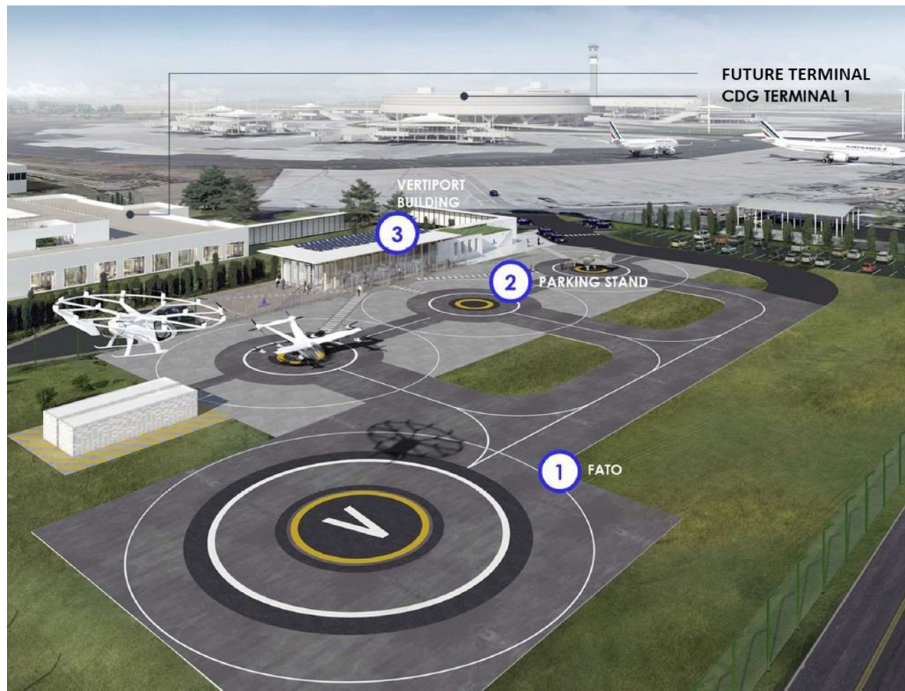


FIGURE 2 – Exemple d’un projet de futur vertiport (Groupe ADP, 2022)

### 3. Études Connexes

Au cours des dernières années, plusieurs études ont été menées sur le problème d’emplacement des vertiports. Shin et al. (2022) ont déterminé les emplacements des vertiports en utilisant un modèle de localisation de hub qui a été résolu à l’aide d’un algorithme heuristique basé sur un algorithme génétique et ont évalué leur approche dans une étude de cas sur les services de taxis aériens. De plus, Chen et al. (2022) ont développé un modèle de hub pour représenter le problème d’emplacement des vertiports et l’ont résolu à l’aide d’un algorithme heuristique. Jeong et al. (2021) ont proposé une méthodologie pour le problème d’emplacement des vertiports qui prend en compte l’effet du bruit des aéronefs dans les zones résidentielles. Dans (Rath and Chow, 2022), les auteurs ont proposé une méthodologie pour l’emplacement des vertiports ou des hubs pour les taxis aériens transportant des passagers vers les aéroports. Les auteurs ont modélisé le problème comme un «p-hub median problem» qui intègre les préférences du consommateur. Yu et al. (2023) proposent une méthodologie qui prend en compte les capacités des vertiports tout en minimisant la congestion du trafic dans les réseaux hybrides (air-sol). Les auteurs ont abordé le problème comme un modèle mathématique avec des contraintes d’équilibre bilinéaires. Amitanand Sinha and Rajendran (2023) ont proposé une méthodologie d’emplacement des vertiports pour les services de taxis aériens en tenant compte de l’accès des clients aux installations routières et des coûts d’opération des vertiports. Il est à noter qu’un nombre limité de recherches ont exploré l’utilisation d’aéronefs eVTOL pour effectuer le transport aéromédical dans les services médicaux d’urgence. Des études telles que (Espejo-Díaz et al., 2023; Goyal and Cohen, 2022; Mihara et al., 2021) concluent que la mise en œuvre réussie du transport aéromédical à l’aide de véhicules eVTOL dépend de l’amélioration de la sécurité de ces aéronefs et de la garantie de la compétitivité de leurs coûts et l’autonomie opérationnelle des aéronefs eVTOL.

## 4. Méthodologie

La Figure 3 présente la méthodologie d’emplacement de vertiports pour les SAMU en trois phases.

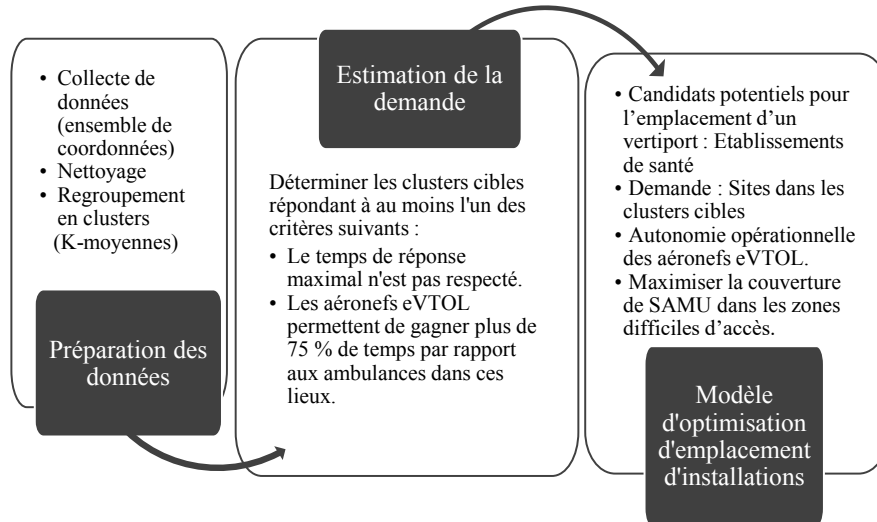


FIGURE 3 – Méthodologie pour déterminer l’emplacement des vertiports

La première phase de cette méthodologie est la préparation des données. Tout d’abord, les coordonnées géographiques des sites où des urgences médicales peuvent survenir dans la région étudiée sont collectées. Étant donné que les urgences médicales peuvent survenir presque partout, le nombre de sites d’urgence potentiels est élevé et peut atteindre des millions de points de données. L’étape suivante de cette phase consiste à nettoyer, formater les données ou à corriger les coordonnées qui se trouvent en dehors de la région étudiée. La dernière étape de cette phase consiste à regrouper les sites d’urgence potentiels en clusters. La raison de ce regroupement est de réduire la dimensionnalité des données pour diminuer le coût computationnel des décisions d’emplacement des installations. Dans ce travail, nous utilisons l’algorithme K-moyennes présenté dans (Bock, 2008) pour regrouper les sites potentiels en K clusters de sites d’urgence potentiels.

La deuxième phase de cette méthodologie consiste à identifier les zones difficiles d’accès. Pour ce faire, nous déterminons quels clusters répondent à au moins l’un des critères suivants. Le premier critère est que le temps de déplacement de l’ambulance terrestre la plus proche dépasse un temps de réponse déterminé (par exemple 30 minutes). Le deuxième critère est que les aéronefs eVTOL permettent de gagner plus de 75% de temps par rapport aux ambulances dans ces clusters.

La dernière phase consiste à déterminer les installations médicales dans lesquelles l’emplacement d’un vertiport augmenterait la couverture des SAMU dans les zones difficiles d’accès représentées par les clusters cibles. Ce travail utilise une adaptation du problème de couverture maximale de Owen and Daskin (1998). L’objectif de ce modèle d’optimisation est de sélectionner un ensemble des installations de manière à maximiser les éléments couverts par au moins une installation, sous certaines contraintes. Il est à noter que, dans ce problème, le paramètre de couverture dépend de la manière dont les eVTOL d’urgence sont utilisés pour répondre aux urgences. Dans ce travail, un cluster cible est couvert par un emplacement potentiel de vertiport si la distance Haversine entre le cluster cible et l’emplacement potentiel de vertiport est inférieure à la moitié

de l'autonomie opérationnelle de l'aéronef eVTOL. En d'autres termes, le cluster est couvert par l'emplacement potentiel de vertiport si l'autonomie opérationnelle de l'aéronef eVTOL permet une mission aller-retour vers le cluster cible.

## 5. Cas d'application

La méthodologie présentée a été testée à travers des données de la région Auvergne-Rhône-Alpes. En France, chaque département dispose d'une unité SAMU qui répond aux demandes locales d'aide médicale d'urgence afin de déterminer une réponse appropriée en fonction de la nature de la demande. Si nécessaire, ils peuvent envoyer des unités SMUR (Service Mobile d'Urgence et Réanimation) qui disposent de véhicules de réponse rapide, d'ambulances et d'hélicoptères pour se rendre sur les sites d'urgence. Il existe 48 unités SMUR dans la région Auvergne-Rhône-Alpes (SAMU Urgences de France, 2022). Précisons qu'en France, le délai d'arrivée maximal sur les sites d'urgence est de 30 minutes pour les zones rurales (Ministère des Solidarités et de la Santé, 2015). Dans cette étude de cas, les établissements potentiels ou candidats à l'emplacement d'un vertiport sont des établissements de santé dotés de service des urgences ou d'unités SMUR. Les coordonnées géographiques des sites où des urgences médicales peuvent survenir dans la région ont été collectées à partir de la plateforme ouverte des données publiques françaises disponible sur <https://www.data.gouv.fr/fr>. En utilisant le logiciel QGIS™, un total de 5495903 paires de coordonnées ont été exportées et regroupées en 10000 clusters (en utilisant l'algorithme k-moyennes) représentant les sites potentiels où des urgences peuvent survenir. De plus, nous avons identifié l'emplacement des unités SMUR dans la région Auvergne-Rhône-Alpes. La Figure 4 présente la carte de la région avec l'emplacement des clusters et des unités SMUR dans la région.

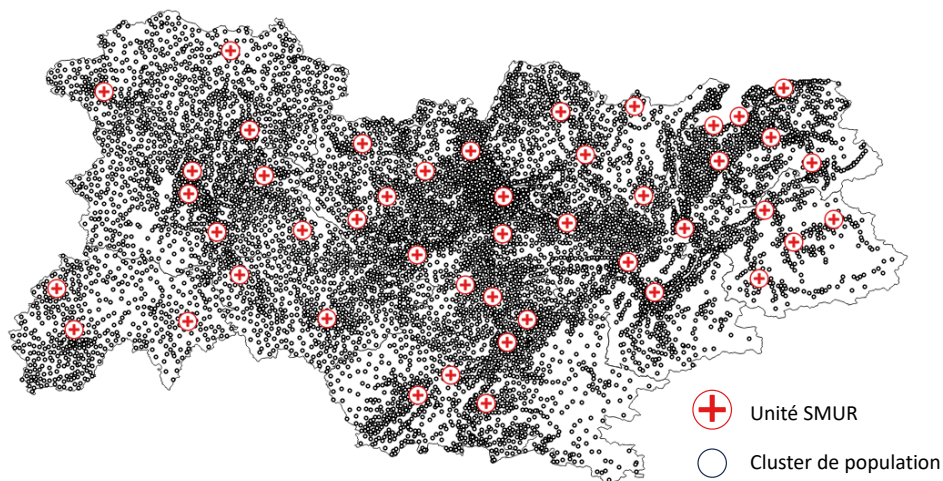


FIGURE 4 – Clusters de population et unités SMUR dans la région Auvergne-Rhône-Alpes

La phase suivante de la méthodologie consiste à déterminer les zones difficiles d'accès représentées par les clusters cibles. Pour le premier critère, nous avons obtenu le temps de déplacement entre l'unité SMUR la plus proche de chaque cluster en utilisant l'API Google Maps Distance Matrix. Cette API fournit le temps de déplacement et la distance entre les emplacements en tenant compte des données historiques sur le trafic et le réseau routier (Google, 2022). Nous rappelons que si le temps de déplacement entre le cluster et l'unité SMUR la plus proche est supérieur à

30 minutes, le cluster est classé comme une zone difficile d'accès (clusters ciblés). Le deuxième critère est que les aéronefs eVTOL permettent de gagner plus de 75% de temps par rapport aux ambulances dans ces clusters. Pour évaluer ce dernier critère, des paramètres tels que le temps de préparation de l'ambulance entre la réception de l'appel et le début du transport, le temps de déplacement ont été pris en compte. La Figure 5 présente la carte de la région avec l'emplacement des clusters cibles et l'emplacement des vertiports candidats (unités SMUR).

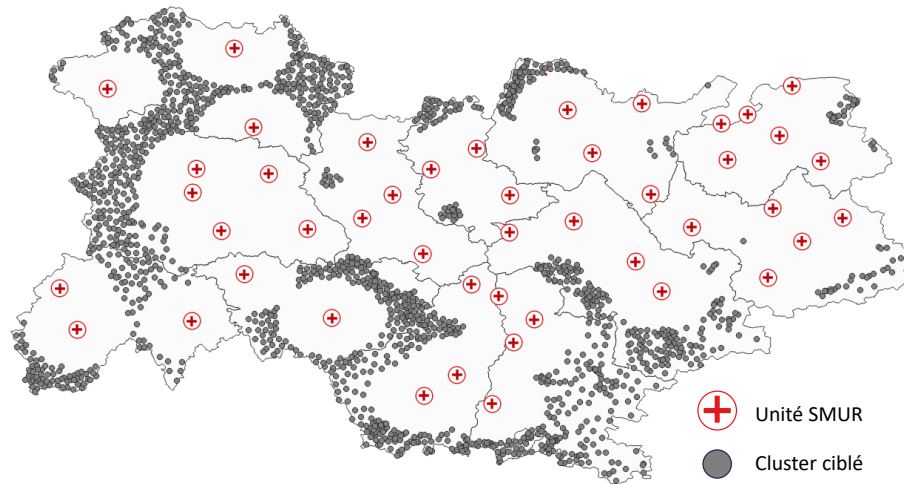


FIGURE 5 – Zones difficiles d'accès (clusters cibles) et unités SMUR dans la région Auvergne-Rhône-Alpes

## 6. Résultats

Nous avons testé la méthodologie présentée à la Section 4 dans l'étude de cas en tenant en compte deux types de propulsion d'eVTOL, à savoir « Lift and cruise » et « tilt rotor », avec des autonomie opérationnelles respectives de 65 km et 120 km. La Figure 6 montre le pourcentage des zones difficiles d'accès couvertes en faisant varier le nombre de vertiports. Nous pouvons conclure que l'autonomie opérationnelle des aéronefs eVTOL a un impact significatif sur le pourcentage des zones difficiles d'accès couvertes pour SAMU.

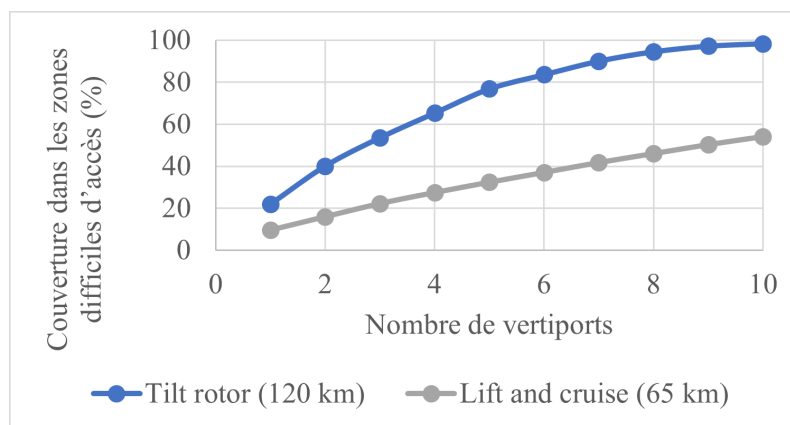


FIGURE 6 – Pourcentage des zones difficiles d'accès couvertes en fonction du nombre de vertiports

La Figure 7 présente un exemple de solutions de la méthodologie dans l'étude de cas de la région Auvergne-Rhône-Alpes avec les emplacements des 3 et 8 vertiports exploitant des avions « tilt rotor » (autonomie opérationnelle de 120km).

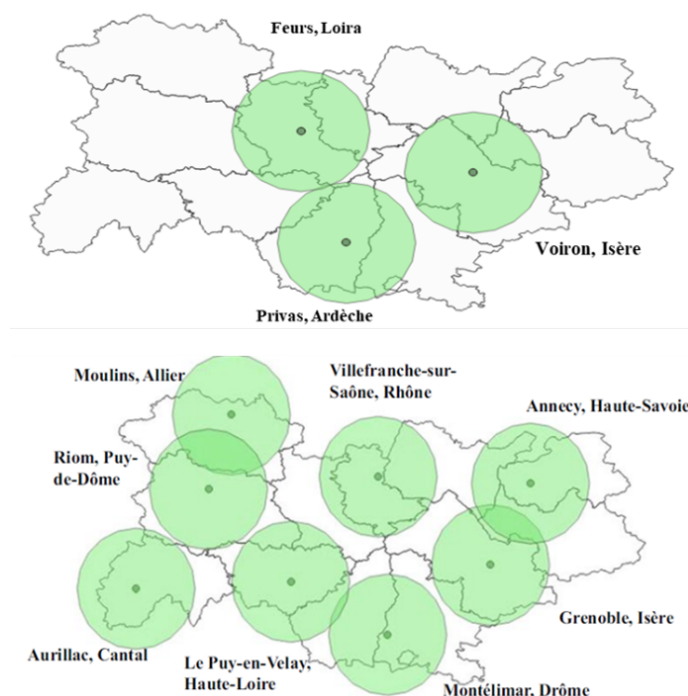


FIGURE 7 – Emplacement géographique des vertiports dans les unités SMUR avec des avions eVTOL (autonomie opérationnelle de 120 km)

## 7. Conclusions

Ce travail a exploré une application potentielle de la technologie de mobilité aérienne avancée dans les services de santé. Plus précisément, ce travail a présenté une méthodologie pour localiser des vertiports pour les avions eVTOL dans le but d'améliorer l'accès au SAMU dans les zones difficiles d'accès. Cette méthodologie est composée d'analyses de données, d'algorithmes de regroupement et de modèles d'emplacement d'installations. Les principaux résultats de l'application de la méthodologie à une étude de cas inspirée de la région Auvergne-Rhône-Alpes en France montrent que l'autonomie des avions eVTOL utilisés pour le SAMU est l'un des facteurs les plus importants de sa mise en œuvre. De plus, les résultats montrent que le transport aéromédical utilisant des avions eVTOL améliorant l'efficacité du SAMU dans les zones difficiles d'accès, devrait être effectué avec des avions ayant une autonomie opérationnelle minimale de 120 km.

## Références

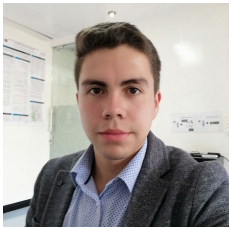
Airbus (2022). Vahana, Our single-seat eVTOL demonstrator. <https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/urban-air-mobility/cityairbus-nextgen/vahana>. consulté le 05 décembre 2023.



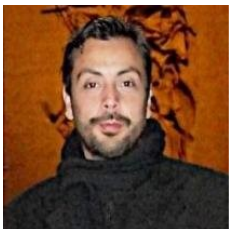
- Amitanand Sinha, A. and Rajendran, S. (2023). Study on facility location of air taxi skyports using a prescriptive analytics approach. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 18 :100761.
- Association for Air Medical Services (2017). The Atlas Database of Air Medical Services (ADAMS). <https://aams.org/page/research>. consulté le 05 décembre 2023.
- Bock, H.-H. (2008). Origins and extensions of the k-means algorithm in cluster analysis. *Electronic Journal for History of Probability and Statistics*, 4(2).
- Chappelle, C., Li, C., Vascik, P. D., and Hansman, R. J. (2018). Opportunities to Enhance Air Emergency Medical Service Scale through New Vehicles and Operations. In *2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, Reston, Virginia. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Chen, L., Wandelt, S., Dai, W., and Sun, X. (2022). Scalable Vertiport Hub Location Selection for Air Taxi Operations in a Metropolitan Region. *INFORMS Journal on Computing*, 34(2) :834–856.
- Cohen, A. P., Shaheen, S. A., and Farrar, E. M. (2021). Urban Air Mobility : History, Ecosystem, Market Potential, and Challenges. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(9) :6074–6087.
- Espejo-Díaz, J. A., Alfonso-Lizarazo, E., and Montoya-Torres, J. R. (2023). Improving access to emergency medical services using advanced air mobility vehicles. *Flexible Services and Manufacturing Journal*.
- Google (2022). Distance Matrix API overview. <https://developers.google.com/maps/documentation/distance-matrix/overview>. consulté le 05 décembre 2023.
- Goyal, R. and Cohen, A. (2022). Advanced Air Mobility : Opportunities and Challenges Deploying eVTOLs for Air Ambulance Service. *Applied Sciences*, 12(3) :1183.
- Groupe ADP (2022). First integrated vertiport inaugurated in Paris, epicentre of sustainable Advanced Air Mobility (AAM) in Europe. <https://presse.groupeadp.fr/first-vertiport-pontoise/?lang=en>. consulté le 05 décembre 2023.
- Jeong, J., So, M., and Hwang, H.-Y. (2021). Selection of Vertiports Using K-Means Algorithm and Noise Analyses for Urban Air Mobility (UAM) in the Seoul Metropolitan Area. *Applied Sciences*, 11(12) :5729.
- Kelly, M. (2020). Sky-High Air Ambulance Prices. *Annals of Emergency Medicine*, 76(5) :A17–A20.
- Mell, H. K., Mumma, S. N., Hiestand, B., Carr, B. G., Holland, T., and Stopyra, J. (2017). Emergency Medical Services Response Times in Rural, Suburban, and Urban Areas. *JAMA Surgery*, 152(10) :983.
- Mihara, Y., Pawnlada, P., Nakamoto, A., Nakamura, T., and Nakano, M. (2021). Cost Analysis of eVTOL Configuration Design for an Air Ambulances System in Japan. Technical report.

- Ministère des Solidarités et de la Santé (2015). Circulaire interministérielle DGOS/R2/DGSCGC no 2015-190 du 5 juin 2015 relative à l'application de l'arrêté du 24 avril 2009 relatif à la mise en œuvre du référentiel portant sur l'organisation du secours à personne et de l'aide médicale urgente. [https://solidarites-sante.gouv.fr/fichiers/bo/2015/15-07/ste\\_20150007\\_0000\\_0045.pdf](https://solidarites-sante.gouv.fr/fichiers/bo/2015/15-07/ste_20150007_0000_0045.pdf). consulté le 05 décembre 2023.
- NEMSIS (2019). National Emergency and Medical Services Information System (NEMSIS) 2019 Data Report. <https://nemsis.org/wp-content/uploads/2022/05/NEMSIS-Annual-Public-Data-Report-2019.pdf>. consulté le 05 décembre 2023.
- Owen, S. H. and Daskin, M. S. (1998). Strategic facility location : A review. *European Journal of Operational Research*, 111(3) :423–447.
- Rath, S. and Chow, J. Y. (2022). Air taxi skyport location problem with single-allocation choice-constrained elastic demand for airport access. *Journal of Air Transport Management*, 105 :102294.
- Reuter-Oppermann, M., van den Berg, P. L., and Vile, J. L. (2017). Logistics for Emergency Medical Service systems. *Health Systems*, 6(3) :187–208.
- SAMU Urgences de France (2022). Structures d'urgence. <https://www.samu-urgences-de-france.fr/fr/sudf/annuaires/autres/>. consulté le 05 décembre 2023.
- Shin, H., Lee, T., and Lee, H.-R. (2022). Skyport location problem for urban air mobility system. *Computers & Operations Research*, 138 :105611.
- U.S. Government Accountability Office (2017). Air ambulance : Data Collection and Transparency Needed to Enhance DOT Oversight. <https://www.gao.gov/products/gao-17-637>. consulté le 05 décembre 2023.
- Volocopter (2022). Volocopter opens first public volocity exhibition in asia. <https://www.volocopter.com/newsroom/first-volocopter-exhibition-asia/>. consulté le 05 décembre 2023.
- Yu, Y., Wang, M., Mesbahi, M., and Topcu, U. (2023). Vertiport Selection in Hybrid Air-Ground Transportation Networks via Mathematical Programs with Equilibrium Constraints. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, pages 1–12.

## Biographie des auteurs



Julián Alberto Espejo-Díaz est doctorant en Génie Industriel à l'Université Jean Monnet de Saint-Étienne en France et doctorant en Logística y Gestión de Cadenas de Suministro à l'Universidad de la Sabana en Colombie. Ses recherches se concentrent sur l'application de méthodologies de recherche opérationnelle dans des domaines tels que la mobilité aérienne avancée, le transport, la logistique humanitaire et les chaînes d'approvisionnement alimentaire.



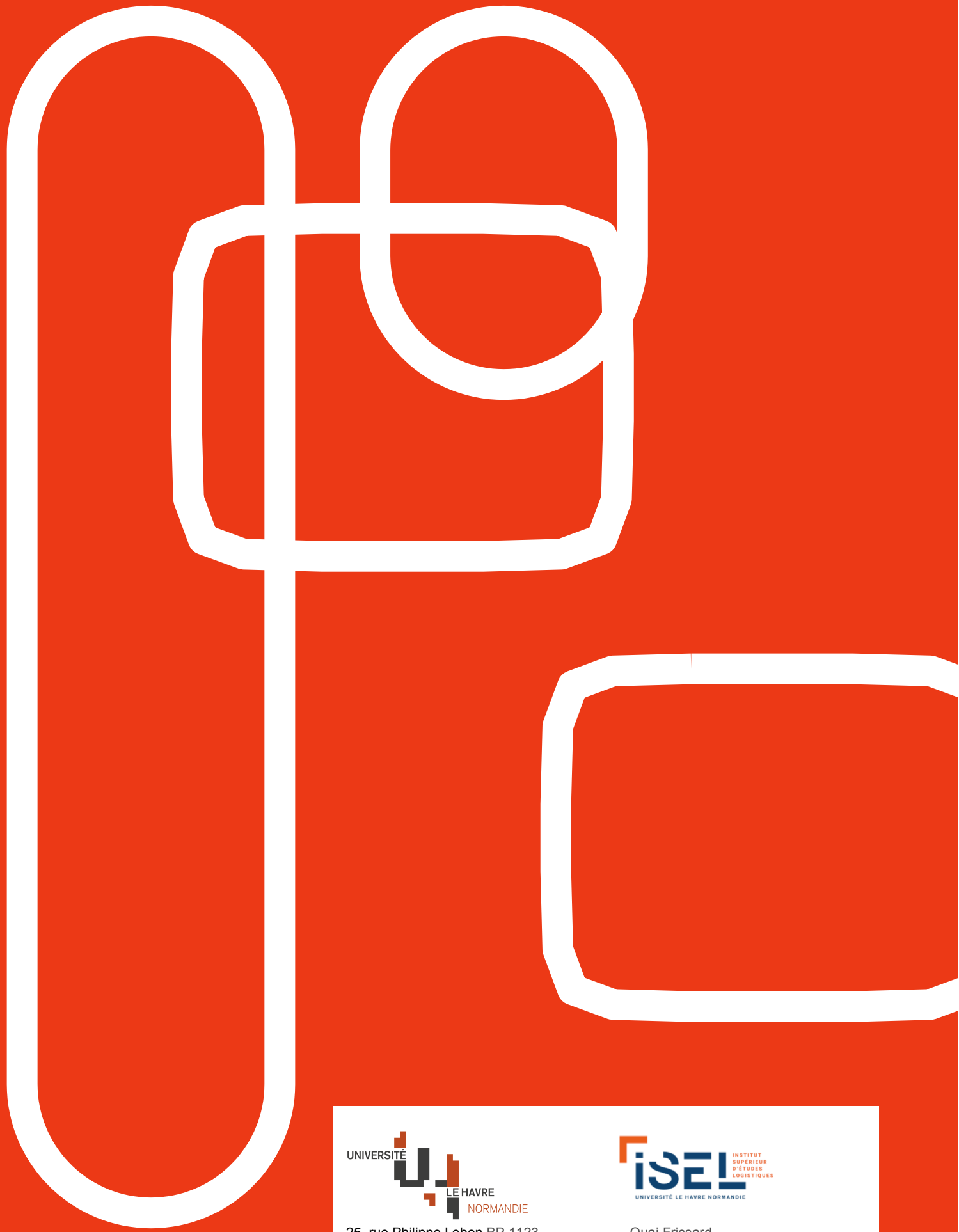
Edgar Alfonso-Lizarazo, docteur en Génie Industriel de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne-France, est actuellement Maître de conférences à l'Université Jean Monnet, Saint-Étienne-France. Ses travaux de recherche au laboratoire LASPI (Laboratoire d'Analyse des Signaux et Processus Industriels) portent sur la modélisation, simulation et optimisation des systèmes de soins et des services de santé.



Jairo R. Montoya-Torres est professeur titulaire à l'Universidad de La Sabana, Colombie, où il agit également en tant que Directeur à la Recherche et à l'Enseignement de la Faculté de Génie, ainsi que Directeur du programme de doctorat en ingénierie et directeur du programme de doctorat en logistique et gestion de la chaîne d'approvisionnement. Il est titulaire d'un doctorat en Génie Industriel de l'École des Mines de Saint-Etienne et de l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne, France, et d'un diplôme de master en Génie Industriel et Gestion de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (Grenoble INP), France. Ses intérêts de recherche actuels incluent la conception et gestion de chaînes d'approvisionnement à l'aide de nouvelles technologies, la logistique urbaine durable et la résilience logistique, ainsi que la planification des opérations à l'aide de procédures d'optimisation, de simulation et hybrides. Sa page Web personnelle et son adresse e-mail sont <https://jrmontoya.wordpress.com/> et [jairo.montoya@unisabana.edu.co](mailto:jairo.montoya@unisabana.edu.co)



François Guillet a obtenu le doctorat en traitement du signal de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, en 1990. De 1991 à 1994, il a été chef du département de génie industriel et de maintenance, Institut Académique de Technologie de Roanne, Université Jean Monnet (UJM) de Saint-Etienne, Roanne, France. En 1995, il contribue à la création du Laboratoire d'Analyse des Signaux et des Processus Industriels (LASPI). Professeur des universités depuis 2003, il a dirigé le LASPI entre 2003 et 2015. Il a été responsable du master Génie Industriel à l'UJM de 2011 à 2020. Il est actuellement Directeur Adjoint du LASPI.



25, rue Philippe Lebon BP 1123  
76063 Le Havre Cedex France



Quai Frissard  
76600 Le Havre