



HAL
open science

Le problème intégré de planification et des tournées de véhicules appliqué aux catastrophes majeures

Guilherme de Castro Pena, Andréa Cynthia Santos, Christian Prins

► **To cite this version:**

Guilherme de Castro Pena, Andréa Cynthia Santos, Christian Prins. Le problème intégré de planification et des tournées de véhicules appliqué aux catastrophes majeures. Cahiers de la logistique, 2021, Optimisation des opérations de déblaiement suite aux catastrophes en milieu urbain, 2, p. 24-34. <hal-03355587>

HAL Id: hal-03355587

<https://hal.science/hal-03355587v1>

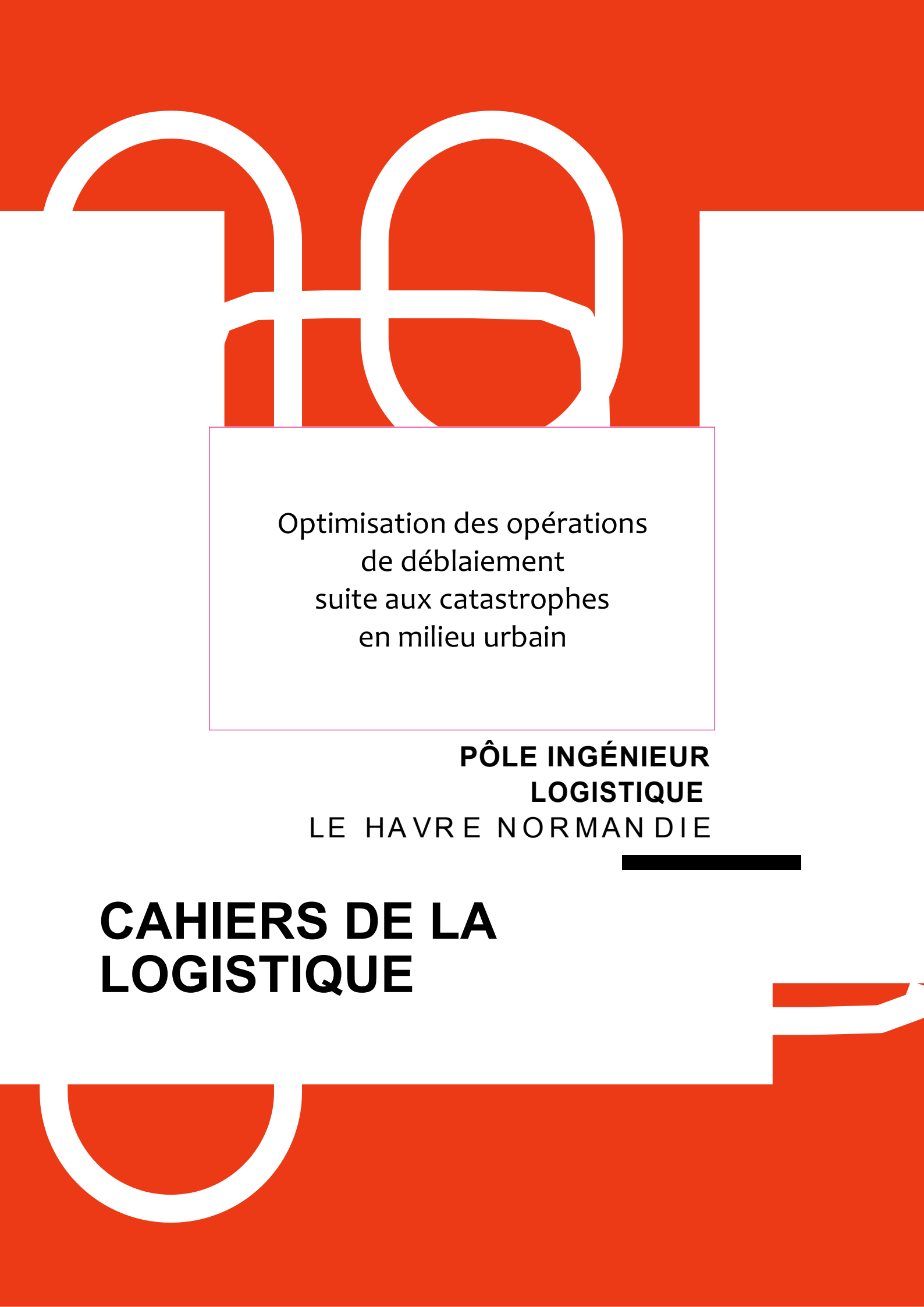
Submitted on 27 Sep 2021

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.



HAL Authorization



Optimisation des opérations
de déblaiement
suite aux catastrophes
en milieu urbain

**PÔLE INGÉNIEUR
LOGISTIQUE**
LE HAVRE NORMANDIE

**CAHIERS DE LA
LOGISTIQUE**

CAHIERS DE LA LOGISTIQUE

CL2021 – N° 02

OPTIMISATION DES OPERATIONS DE DEBLAIEMENT SUITE AUX CATASTROPHES EN MILLIEU URBAIN

Septembre, 2021

Copyright © 2021, ISEL - SFLog



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 au problème de nettoyage des réseaux urbains suite aux catastrophes naturelles et technologiques. La concentration de personnes dans des zones urbaines a considérablement changée le paysage des villes, mais également a réduit les distances entre les habitations des sites sensibles, voire des sites SEVESO. Les interventions post-désastres deviennent donc très complexes dans des centres urbains.

Une des problématiques intéressantes dans ce contexte concerne le nettoyage à court et moyen terme de débris suite à un événement. A court terme, il s'agit de déblayer les réseaux urbains afin d'établir la circulation et de faciliter la distribution de l'aide humanitaire ; et à moyen terme, les problèmes entraînent la nécessité de nettoyer des sites affectés afin de réduire les nuisances pour la population. Nous avons donc le plaisir d'éditer ce volume qui compile des années de réflexions et trois contributions sur des problèmes majeurs dans ce contexte :

- La première contribution, de MSc. Barbalho, Pr. Santos, et Pr. Aloise, porte sur l'optimisation de la planification du nettoyage des réseaux urbains. Ce problème intègre des contraintes des problèmes de planification, mais également du domaine de la conception de réseau. De plus, le problème est considéré à l'échelle des centres urbains (grande échelle). Ces aspects sont nettement plus complexes que les problèmes classiques de planification et d'ordonnancement des ateliers. Les auteurs proposent de le résoudre à l'aide des heuristiques avancées du type GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*) et ILS (*Iterated Local Search*).
- La deuxième contribution, de Msc. Combaud, Pr. Santos, est dédiée à l'étude de différentes fonctions objectifs pour le problème d'optimisation des réseaux urbains. Les auteurs investiguent des fonctions objectifs issues du domaine de la planification de tâches telles que la minimisation de la durée totale des travaux et la minimisation de la somme des dates de finalisation des tâches ; ainsi que des fonctions objectifs issues des problèmes de conception de réseau, comme la minimisation de la somme des plus courts chemins aux destinations et la connexité globale du réseau. Des indicateurs et des analyses très intéressantes sont fournis afin de montrer l'impact de l'usage de ces fonctions objectifs pour la résolution de ce type de problème.
- La troisième contribution, de Msc. Pena, Pr. Santos et Pr. Prins, aborde le problème intégré du nettoyage de sites et de tournées de véhicules dans des zones urbaines. Ce problème vise donc à optimiser à la fois le temps total pour nettoyer la zone, mais aussi le coût total des nombreuses tournées de véhicules nécessaires pour évacuer les débris vers des décharges. L'intégration de ces deux aspects implique des contraintes très complexes comme par exemple la synchronisation des bennes qui enlèvent les débris, aux camions qui les transportent. Les auteurs présentent des heuristiques avancées et modernes telles que le LNS (*Large Neighborhood Search*).

Ce volume apporte donc une vision sur différents problèmes et aspects complexes liés à la gestion et à l'optimisation de débris post-catastrophes majeures en milieu urbain et dense.

Andréa Cynthia Santos

Professeur des Universités

Directrice déléguée à la recherche de l'ISEL

Vice-Présidente déléguée en charge du numérique de l'ULHN

Thierry Derrey

Maître de Conférences

Directeur de l'ISEL

LE PROBLÈME INTÉGRÉ DE PLANIFICATION ET DES TOURNÉES DE VÉHICULES APPLIQUÉ AUX CATASTROPHES MAJEURES

Guilherme de Castro Pena^{1,3}, Andréa Cynthia Santos², Christian Prins¹

¹Université de Technologie de Troyes (LIST3N)
12, rue Marie Curie, CS 42060, 10004, Troyes CEDEX, France
guilherme.pena@utt.fr, christian.prins@utt.fr

²Université Le Havre Normandie, LITIS-RI2C, ISEL
15 rue Philippe Lebon, 76600, Le Havre
andrea-cynthia.duhamel@univ-lehavre.fr

³Universidade Federal de Viçosa - CRP (IEP)
Km 7, MG-230, Rodoviário, 38810-000, Rio Paranaíba/MG, Brasil

RESUME

L'optimisation du nettoyage des débris suite aux catastrophes dans les zones urbaines est très important pour permettre aux habitants de se remettre de leurs effets. Ce travail aborde le problème intégré multi-période de planification et de tournées de véhicules pour nettoyer les débris (de l'anglais *Scheduling Routing Problem to clean debris (SRP-CD)*) après des catastrophes naturelles ou technologiques. Le SRP-CD inclut des questions complexes telles que deux niveaux de synchronisation entre les véhicules nécessaires pour charger, transporter et décharger les débris pendant journées de travail. Au niveau stratégique, l'objectif est de minimiser le nombre de jours pour le nettoyage global, et de minimiser le coût total de routage au niveau opérationnel. Des modèles et méthodes approchés ont été développés. Des expérimentations pour les approches sont réalisées pour mesurer leur performance et robustesse.

MOTS CLÉS: Logistique humanitaire, optimisation combinatoire, métaheuristiques, modèles intégrés d'optimisation.

ABSTRACT

The optimisation of operations to clean debris after disasters in urban areas is very relevant to inhabitants to recover from their effects. This study investigates the integrated multi-period scheduling routing problem to clean debris (SRP-CD) after a natural or industrial disasters. SRP-CD considers complex issues such as two levels of synchronization between vehicles necessary to load, transport and unload debris during limited working days. The goal is to minimize the number of days for the overall cleaning in the strategical level; and minimizing the total costs of vehicle routes in the operational level. Approximate models and methods have been developed. Numerical experiments for the approaches were carried out to measure their performance and robustness.

KEYWORDS: Humanitarian logistics, combinatorial optimization, metaheuristics, integrated optimization models.

1 Introduction

La gestion de crise suite à des catastrophes majeures (tremblements de terre, ouragans, inondations, etc.) nécessite un effort important pour nettoyer la zone urbaine concernée. Lorsque les catastrophes frappent des régions habitées, elles impactent fortement la population, l'environnement et les infrastructures urbaines. Ce problème peut devenir très complexe si une large zone est affectée de manière inattendue.

Cette étude aborde le problème intégré de Planification et de Tournées de véhicules pour la nettoyage des débris (en anglais *Scheduling Routing Problem to clean debris (SRP-CD)*) dans une zone urbaine après des catastrophes majeures, qui peut prendre des mois ou des années après les événements. Le problème considère des ressources limitées telles que des équipes de travail (*work-troops (WT)*) et une flotte de camions à benne basculantes, chargée de transporter les débris vers les décharges. Le réseau de transport est modélisé dans un graphe et les termes *sommet de débris* et *sommet de décharge* correspondent respectivement à un noeud où des débris doivent être nettoyés, et à un noeud où les camions déchargent les débris. De plus, un horizon temporel global et une journée de travail limitée sont pris en compte. L'objectif est double : du point de vue stratégique, la décision majeure concerne l'attribution des *WTs* aux sommets de débris dans l'horizon temporel avec pour objectif de minimiser le nombre total de jours pour nettoyer l'intégralité de la région ; dans le contexte opérationnel, les camions effectueront plusieurs trajets dans chaque journée pour transporter les débris, où l'objectif est de minimiser les coûts total des tournées de véhicules. Le problème a donc deux niveaux de synchronisation, entre les *WTs* et les camions, et entre les camions au moment du chargement.

L'intégration de différents niveaux de décision dans les problèmes d'optimisation est une tendance croissante dans la littérature scientifique des problèmes de tournées de véhicules (en anglais *Vehicle Routing Problem - VRP*) (Coelho et al., 2016). Les problèmes intégrés sont un domaine difficile car la complexité globale de l'intégration peut augmenter en fonction de la complexité de chaque problème. Comme indiqué dans Prodhon and Prins (2014) pour le problème de localisation et routage, les gains à résoudre un problème de manière intégrée sont d'environ 15% par rapport à la résolution des problèmes indépendants. De plus, les problèmes intégrés d'optimisation permettent de travailler avec des scénarios plus réalistes considérant des contraintes pertinentes impliquées dans l'application réelle. Ceci est le cas du SRP-CD avec les deux niveaux de synchronisation.

Dans notre modélisation, le SRP-CD est étroitement lié au niveau stratégique, au problème de planification de projets avec contraintes de ressources (en anglais *Resource-Constrained Project Scheduling Problem - (RCPS)*) (Hartmann and Briskorn, 2010). Le RCPS est défini comme un projet contenant un ensemble de tâches à traiter, qui doivent être terminées sans ordre d'exécution des tâches. Chaque tâche a des besoins en ressources pour être réalisée, une durée et certaines d'entre elles peuvent avoir des relations de priorité ou de précédence. L'objectif de minimiser le *makespan* est généralement utilisé. Comparé au SRP-CD, les tâches dans RCPS peuvent être considérées comme les sommets de débris à nettoyer par un ensemble de *WTs* et de camions, mais le SRP-CD a l'intégration du VRP et peut être modélisé sur un graphe en raison du réseau routier.

La partie opérationnel du SRP-CD est modélisée comme un problème de tournées de véhicules avec pleine charge (en anglais *Full Truckload Vehicle Routing Problem - (FTVRP)*) (Desrosiers et al., 1988). Le FTVRP consiste à désigner des itinéraires pour les camions afin d'effectuer un certain nombre de trajets à pleine charge entre les sites. L'objectif est de minimiser

la distance totale parcourue par les camions.

2 État de l'art

Nous présentons ci-dessous un aperçu des travaux abordant des aspects du SRP-CD dans la littérature classique, mais aussi les applications les plus proches du SRP-CD.

Lacomme et al. (2019) ont abordé le RCPSP avec tournées (*RCPSPR*), où chaque activité d'un projet exigeait une quantité de ressources à exécuter et les camions effectuaient des collectes et livraisons de ressources entre les activités. Soares et al. (2019) abordent un problème de tournées de véhicules avec collectes et livraisons avec pleine charge et la synchronisation de multiples véhicules, dans une chaîne d'approvisionnement en biomasse. Trois types de véhicules ont été utilisés pour effectuer le transport des matériaux entre les sommets de collecte et livraison dans un horizon d'une seule journée de travail. L'objectif était de minimiser les coûts de transport. L'étude Grimault et al. (2017) aborde un problème similaire avec la synchronisation de ressources dans le cadre des travaux publics et de la construction de routes. Le problème a été décrit dans un horizon temporel d'une journée de travail, où un ensemble de camions répondait aux demandes de transport de matériel. L'objectif était de minimiser le coût global des itinéraires (Dans le SRP-CD, l'horizon temporel est composé de plusieurs jours, et l'objectif est la minimisation des jours et la minimisation des coûts des itinéraires). Ces problèmes sont liés au SRP-CD au niveau de la synchronisation, mais le SRP-CD a deux objectifs et un niveau de synchronisation supplémentaire.

Applications en logistique de crise, nettoyage, en réparation de réseaux urbains et autres abordent des aspects liés au SRP-CD. L'étude Duque et al. (2016) a abordé le problème de planification des tournées des équipes de réparation de réseau dans les opérations de secours post-catastrophe, avec une seule équipe de réparation. L'idée était de partir d'un dépôt unique pour rétablir la connectivité du réseau et fournir une aide humanitaire. L'objectif est de minimiser le temps d'inaccessibilité des sommets bloqués.

Le problème de la réhabilitation routière d'urgence de Sakuraba et al. (2016) comprend le problème d'accessibilité du réseau routier pour transporter des équipes de secours ; et le problème de planification des équipes de travail pour planifier les réparations des routes et améliorer l'accès aux zones de réfugiés, et par conséquent, améliorer la distribution de l'aide humanitaire. Ce travail a été étendu dans Barbalho et al. (2020), où des nouvelles méthodes ont été développées pour ce dernier problème. Par rapport au SRP-CD, dans les études précitées, l'intégration de la planification aux tournées pour le transport des débris, qui incluent une synchronisation entre les *WTs* et les camions, n'est pas ciblée car leurs objectifs résident dans la phase de réponse pour retrouver l'accessibilité ou améliorer l'accès des équipes de secours. De plus, les zones de décharge pour les débris ou temps de service pour les opérations ne sont pas prises en compte.

Un problème proche au SRP-CD se trouve dans le contexte de l'exploitation minière. Le problème consiste à définir des itinéraires pour le transport des matériaux dans les champs miniers (Alarie and Gamache, 2002) en considérant les pelles, les camions et la minimisation des coûts. Ce problème présente quelques différences par rapport au SRP-CD comme, une zone connue et de taille moyenne, des opérations planifiées dans un temps fixe, et une fonction objectif qui cherche à minimiser les coûts. Une autre étude utilisant l'optimisation a été trouvée dans (Souza et al., 2010), où un modèle vise à optimiser les déviations de la production, les objectifs de qualité et le nombre de véhicules nécessaires aux opérations.

3 Définition du SRP-CD

Pour formaliser le problème, quelques notations sont définies. Le réseau de transport au SRP-CD est modélisé sur un graphe simple, non orienté et connecté $G = (V, E)$, où V est l'ensemble des sommets et E est l'ensemble des arêtes. V comprend un dépôt d'origine où les véhicules se trouve en début du processus d'optimisation, plus les points de débris et de décharge. Chaque point de débris a un volume de débris à nettoyer et chaque arête modélise le chemin le plus court en termes de temps reliant deux sommets dans le réseau réel. De plus, W représente le nombre de *WTs* (chacun est composé de bulldozers, d'excavateurs et des ressources humaines) et K est l'ensemble de camions qui sont similaires et ont une capacité exprimée en tonnes.

Chaque *WT* est affecté à un sommet de débris si et seulement s'il n'y a pas de *WT* dans le même sommet, et une *WT* reste au sommet jusqu'à ce que tous les débris soient nettoyés. De plus, une *WT* commence une journée de travail en se déplaçant vers un sommet de débris et en enlevant les débris ou en enlevant les débris si elle est déjà affecté à un sommet. Par rapport aux camions, ils visitent les sommets si et seulement s'il existe une *WT* déjà affecté. En plus, les opérations de chargement et de déchargement ont un temps de service fixe et les camions commencent et finissent une journée de travail au dépôt.

La Figure 1 représente un exemple pour le SRP-CD où 0 est l'origine, $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15\}$ sont les sommets de débris et $\{16, 17\}$ sont les sommets de décharge, 4 *WTs* et $K = \{K_1, K_2, K_3, K_4\}$ est la flotte de camions avec de capacité de 2 tonnes chacun. L'horizon de temps maximal est de 22 jours, et les temps de service pour la charge et la décharge est de 1 unité de temps. Le graphe est présenté dans la Figure 1-(a), où le dépôt, chaque sommet de débris et chaque décharge sont identifiés respectivement par un carré plein, un cercle plein et un carré en pointillés. De plus, des temps de parcours en unités de temps sont associés aux arêtes. La planification globale est détaillé dans la Figure 1-(b), où la solution présente un total de 18 jours pour nettoyer tous les sommets de débris. La Figure 1-(c) montre les détails de les tournées des 4 camions lors de la "première journée", où les routes ont été assignées aux sommets de débris 1, 6, 12 et 13. Les trajets des camions vides et les trajets des camions pleins sont représentés, respectivement, par des flèches en pointillés et des flèches pleines. Le carré plein représente le dépôt ou l'opération de chargement dans un sommet de débris et le carré pointillé indique l'opération de décharge. Au cours d'une journée de travail, les camions K_1 et K_2 ont pu visiter les sommets 1 et 6 avec des itinéraires synchronisés, puisque deux camions ne peuvent pas être chargés dans la même unité de temps. Le camion K_3 a visité les sommets 13 et 12, et le camion K_4 a visité le sommet de débris 6. Les temps de chaque itinéraire sont également visibles sur la figure, y compris les temps de chargement et de déchargement. Le camion K_1 a un itinéraire de 21 unités de temps, dont 16 unités de temps pour le déplacement. Le camion K_2 a un itinéraire similaire à celui de K_1 mais il y a un temps d'attente pour être chargé. K_3 a un itinéraire de 22 unités de temps dont 17 unités de temps correspondent à des déplacements. Enfin, K_4 a un itinéraire de 16 unités de temps dans lequel 13 unités de temps correspondent aux déplacements.

4 Méthodes pour le SRP-CD

Nous avons développé un ensemble d'heuristiques et de métaheuristiques pour le SRP-CD. détaillées ci-dessous. Les fonctions objectifs sont représentées par \mathcal{F}_1 et \mathcal{F}_2 , qui sont réalisées dans deux phases d'optimisation. \mathcal{F}_1 minimise le nombre de jours pour nettoyer tous les sites de

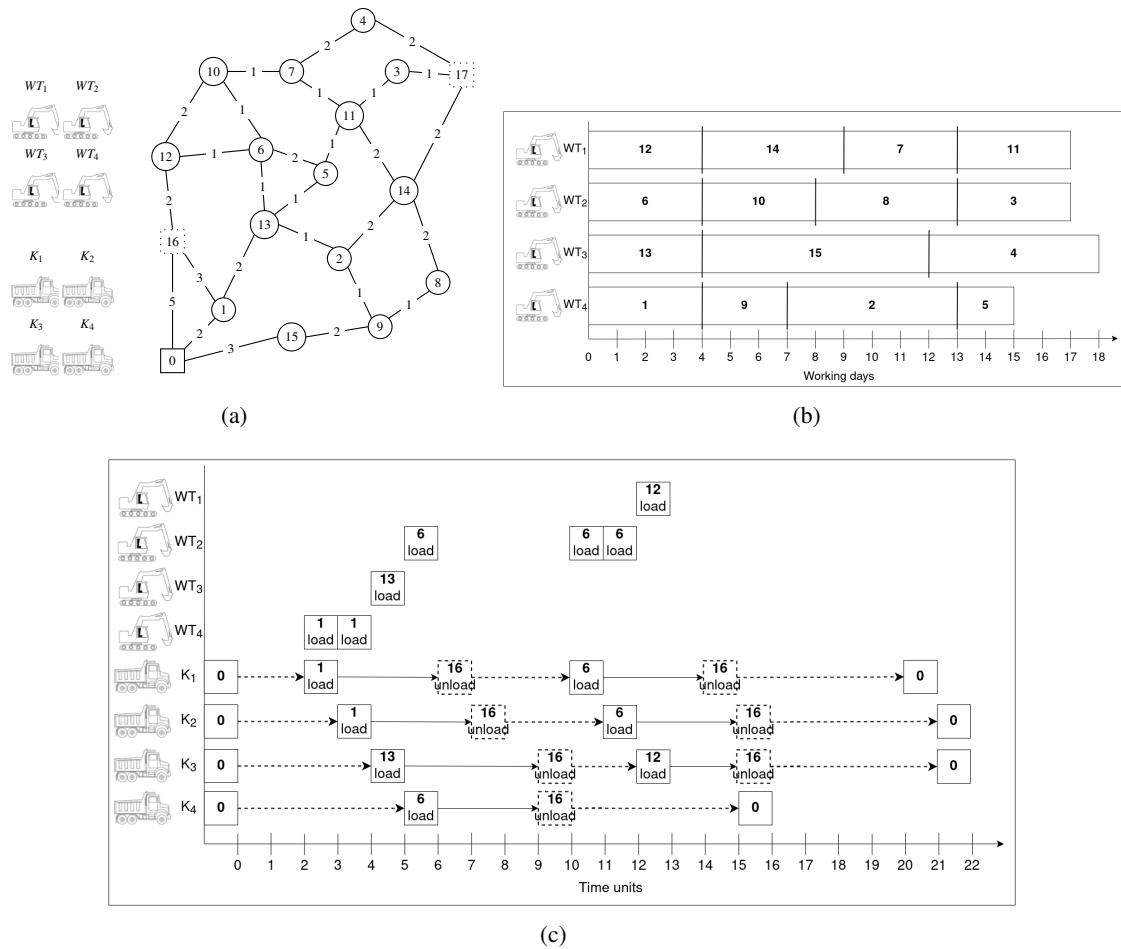


FIGURE 1 – Exemple pour le SRP-CD avec (a) le graphe et la flotte, (b) la planification des WTs et (c) les tournées de camions pour la première journée de travail.

débris, et \mathcal{F}_2 optimise le temps de trajet total des camions, en satisfaisant l'objectif primaire.

4.1 Heuristiques constructives

Les heuristiques utilisent plusieurs critères d'évaluation tant au niveau stratégique que opérationnel pour construire des solutions réalisables pour le SRP-CD. Cela signifie qu'au moment de la construction de la solution, le sommet à traiter sera choisi selon l'un de ces critères suivants : la plus petite distance, la plus grande distance, la plus petite quantité de débris, la plus grande quantité de débris, la plus petite valeur du ratio entre le volume de débris et la distance, ou encore la plus élevée valeur du ratio entre le volume de débris et la distance. Un critère supplémentaire est utilisé pour la phase opérationnelle et consiste affecter ***

Les heuristiques sont basés sur une première étape dédiée à la planification des WTs , et une deuxième pour définir les tournées des camions. Selon les critères choisis, les WTs sont affectés aux sommets de débris. Puis, des tournées sont définis selon l'un des critères cités. Lorsque tous les camions sont rentrés au dépôt, la journée de travail est terminée. Étant donné qu'il existe deux phases dans l'heuristique de construction, six critères pour la première phase et sept critères pour la deuxième phase, 42 combinaisons sont possibles. La meilleure solution construite parmi les 42 critères sera retourné, appelé de GCH (de l'anglais *Greedy Constructive Heuristic*). La heuristique constructive, appelée RCH (de l'anglais *Random Constructive Heuristic*), prend la

meilleure solution construite de manière aléatoire pendant 20 secondes d'exécution.

4.2 Métaheuristique basée sur recherche locale à grande voisinage

La recherche locale à grande voisinage (de l'anglais *Large Neighborhood Search (LNS)*) est une métaheuristique qui effectue des améliorations itératives basées sur trois procédures principales : suppression, insertion et acceptation. Les itérations se terminent lorsqu'un critère d'arrêt est atteint. La LNS a été proposée pour la première fois par Shaw (1998). Dans le contexte du SRP-CD, la méthode utilise les procédures de suppression et d'insertion dans la planification des *WTs* comme suit : étant donné une solution réalisable, la procédure de suppression retire de manière aléatoire un sommet de débris de la solution. Après la suppression d'un sommet de débris, les itinéraires des véhicules sont également supprimés et doivent être refaits après l'insertion avec l'un des critères présentés dans la Section 4.1. L'insertion est réalisée selon l'une des deux recherches locales (Meilleure amélioration - BI ou Première amélioration - FI) pour réinsérer le sommet supprimé. La procédure d'acceptation garde les solutions améliorées après la suppression et l'insertion. Les procédures de suppression, d'insertion et d'acceptation sont appliquées de manière itérative jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait, par exemple un nombre fixe d'itérations, un temps d'exécution fixe ou un nombre fixe d'itérations sans aucune amélioration.

4.3 Méthode hybride basée sur la LNS et le recuit simulé

Le recuit simulé (de l'anglais *Simulated Annealing (SA)*) a été initialement proposé par Kirkpatrick et al. (1983) pour certains problèmes d'optimisation. Le SA est une métaheuristique inspirée du processus de recuit physique pour les solides cristallins, où après avoir été chauffé, le solide est lentement refroidi pour réduire les effets sur le matériau, ce qui permet d'obtenir un solide avec une intégrité structurelle supérieure. La méthode inclut un mouvement *hill-climbing* pour essayer d'échapper aux optima locaux (Kirkpatrick et al., 1983). Dans le contexte du SRP-CD, la méthode hybride couple l'idée des opérations de suppression et insertion de la LNS et le schéma du *hill-climbing* du SA. Étant donné une solution réalisable, une température initiale et un taux de refroidissement est défini à chaque itération, pour générer une solution de voisinage. La procédure de suppression enlève un sommet de débris de la solution de manière aléatoire. Les itinéraires des véhicules sont refaits après l'insertion avec l'un des critères susmentionné à la Section 4.1. L'insertion réinsère de manière aléatoire le sommet supprimé. Si après un nombre d'itérations, la meilleure solution trouvée ne change pas, la méthode applique une perturbation en supprimant entre 1 et la moitié de cette quantité de sommets de débris et en les réinsérant selon une des recherches locales (BI ou FI). La solution voisine est acceptée comme la nouvelle solution courante lorsqu'elle est meilleure ou lorsque le mouvement *hill-climbing* est exécuté. Ensuite, la température actuelle est refroidie. La méthode s'arrête lorsque la température atteint un seuil $\epsilon = 10^{-4}$.

5 Résultats

Les expérimentations avec les méthodes proposées ont été réalisées pour vérifier leurs performances en termes de qualité des solutions et de temps d'exécution. Les tests numériques ont été effectués sur un processeur Intel(R) Core(TM) i5-8350U @1.70GHz avec 16GB de RAM et

Ubuntu 18.04.1 LTS. Les approches ont été développées en C++, *IBM ILOG CPLEX* 12.8, avec les paramètres par défaut et *CPLEX Concert Technology* en C++ ont été utilisés pour le modèle.

Un mécanisme de génération de données a été proposé, où les instances contiennent toutes les paramètres du SRP-CD. La méthode effectue une distribution géographique des sommets de débris sur un plan cartésien. Il en résulte trois topologies de réseau, appelées ici de *(C)luster*, *(A)léatoire*, et *(M)ixte*. La distance euclidienne est associée à chaque arête représentant le temps de parcours entre deux sommets. Deux ensembles d’instances ont été créés S1 et S2, dont les caractéristiques des instances sont présentées dans le Tableau 1.

	# Inst. C - A - M	Nombre de points de débris	Nombre de points de décharge	Nombre de WTs	Nombre de camions	Capacité de camions	Temps de service	Horizon de temps
S1	30 - 30 - 30	10, 20, 30, 40, 50	2	2, 3, 4	2, 3, 4, 6, 8	2	1	40, 55, 60, 65
S2	30 - 30 - 30	100, 200, 300, 400, 500	3	5, 6, 7	5, 6, 7, 10, 12, 14	2	10	480, 720

TABLE 1 – Caractéristiques des ensembles d’instances.

5.1 Résultats numériques

Les résultats pour les heuristiques prennent en compte les performances en termes de qualité des solutions et de temps d’exécution dans en utilisant les instances de S1 et S2. Des expérimentations pour le réglage des paramètres ont été effectuées à l’aide de l’IRACE (de l’anglais *Iterated racing for automatic algorithm configuration*) (López-Ibáñez et al., 2016), qui fonctionne avec un mécanisme d’apprentissage automatique. Pour la *RCH* et les métaheuristiques, les résultats considèrent le meilleur résultat de 10 exécutions différentes pour chaque instance, en utilisant différentes graines pour la génération des nombres aléatoires.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 2, où les meilleurs résultats sont mis en évidence en gras. Chaque ligne représente les méthodes, et les résultats considèrent les 30 instances de S1, les 30 instances de S2 et les 60 instances de S1 + S2. A partir des résultats obtenus pour chaque méthode ($\mathcal{F}(m)$) et la meilleure solution connue ($\mathcal{F}(b)$), un écart $Dev = \mathcal{F}_1(m) - \mathcal{F}_1(b)$ est calculé pour \mathcal{F}_1 , et un écart relatif $Dev(\%) = 100 \times [\mathcal{F}_2(m) - \mathcal{F}_2(b)] \div \mathcal{F}_2(b)$ est calculé pour \mathcal{F}_2 . En considérant les colonnes intérieures, Nb_best représente le nombre de meilleures solutions connues parmi les méthodes évaluées ; α montre la moyenne Dev des instances de chaque colonne ; β fournit la moyenne $Dev(\%)$ des instances pour chaque colonne, et $t(s)$ donne le temps d’exécution moyen en secondes. Une méthode est considérée comme meilleure lorsqu’elle a le plus grand Nb_best , et en cas d’égalité, lorsqu’elle a le plus petit α , puis lorsqu’elle a le plus petit β .

Pour les résultats des métaheuristiques, la LNS commence à partir des solutions construites par la *RCH* ou par la *GCH* et donc, elles sont nommé *RCH + LNS* ou *GCH + LNS*. Similaire pour la méthode hybride, donc elles sont nommé *RCH + hybride* ou *GCH + hybride*. Les résultats du Tableau 2 indiquent pour la topologie cluster que la méthode *RCH + LNS* a donné de meilleurs résultats que les autres méthodes et a trouvé environ 48% (29 sur 60) des meilleures solutions connues. Cependant, en S1, la meilleure méthode était *RCH + hybride* avec 77% des meilleures solutions connues et, en S2, la meilleure méthode était *RCH + LNS* avec 70% des meilleures solutions connues. Pour la topologie aléatoire, la méthode *RCH + LNS* a donné de meilleurs résultats, où elle a trouvé environ 43% des meilleures solutions connues. Cependant, en S1, la meilleure méthode était *GCH + hybride* avec 53% des meilleures solutions connues et, en S2, la

meilleure méthode était *RCH + LNS* avec 67% des meilleures solutions connues. Pour la topologie mixte, la méthode *RCH + hybride* a donné de meilleurs résultats que les autres méthodes et a trouvé environ 40% des meilleures solutions connues. Cependant, en S1, la meilleure méthode était *GCH + hybride* avec 57% des meilleures solutions connues et, en S2, la meilleure méthode était *RCH + LNS* avec 57% des meilleures solutions connues. Nous avons remarqué que les améliorations obtenues en utilisant les méthodes *GCH + LNS*, *RCH + LNS*, *GCH + hybride* et *RCH + hybride* par rapport aux heuristiques constructives deviennent très pertinentes, en particulier pour S2.

Méthodes	S1				S2				S1 + S2				
	Nb_best	α	β	t(s)	Nb_best	α	β	t(s)	Nb_best	α	β	t(s)	
C	GCH	0	3.27	5.53	~ 0	0	2.20	8.90	0.07	0	2.73	7.22	0.03
	RCH	2	1.93	2.98	20	0	4.97	21.51	20	2	3.45	12.25	20
	GCH + LNS	11	0.40	0.34	0.22	0	1.10	2.90	693.34	11	0.75	1.62	346.78
	RCH + LNS	8	1.07	1.30	20	21	0.27	-0.33	580.12	29	0.67	0.49	300.06
	GCH + hybride	18	0.17	0.10	1.85	8	0.10	1.44	453.10	26	0.13	0.77	227.48
	RCH + hybride	23	0.07	0.07	21.37	1	0.13	1.56	480.74	24	0.10	0.82	251.06
A	GCH	0	4.53	8.93	~ 0	0	2.17	9.08	0.03	0	3.35	9.01	0.02
	RCH	6	2.73	5.21	20	0	4.70	20.45	20	6	3.72	12.83	20
	GCH + LNS	3	0.63	1.04	0.22	0	1.57	4.57	546.17	3	1.10	2.80	273.20
	RCH + LNS	6	1.60	2.89	20	20	0.33	-0.20	499.80	26	0.97	1.35	259.90
	GCH + hybride	19	0.07	0.22	1.82	5	0.10	1.20	454.08	24	0.08	0.71	227.95
	RCH + hybride	16	0.13	0.12	21.32	5	0.07	1.21	486.38	21	0.10	0.67	253.85
M	GCH	0	3.37	9.65	~ 0	0	3.13	10.65	0.03	0	3.25	10.15	0.02
	RCH	6	2.03	6.51	20	0	5.23	23.41	20	6	3.63	14.96	20
	GCH + LNS	8	0.93	2.64	0.26	0	2.47	4.31	688.24	8	1.70	3.48	344.25
	RCH + LNS	7	1.03	3.26	20	17	0.50	0.82	587.69	24	0.77	2.04	303.85
	GCH + hybride	17	0.07	0.34	1.80	5	0.10	1.38	461.32	22	0.08	0.86	231.56
	RCH + hybride	16	0.10	0.17	21.30	8	0.07	1.27	485.73	24	0.08	0.72	253.52

TABLE 2 – Résultats pour les méthodes pour chacune des topologies C, A et M.

6 Conclusions et perspectives futures

Cette étude présente des méthodes heuristiques, une métaheuristique du type LNS et une métaheuristique pour résoudre le SRP-CD. Ce problème présente un intérêt lors des catastrophes majeures pour le nettoyage du réseau routier. Trois topologies de réseau urbain ont été utilisées dans les expérimentations et les paramètres des méthodes ont été calibrés en utilisant le logiciel IRACE, qui utilise de l'apprentissage automatique.

Selon les résultats, du point de vue des ensembles des instances, *GCH + hybride* et *RCH + hybride* ont produits les meilleurs résultats pour les instances S1, où *RCH + hybride* est plus performant pour la topologie cluster, tandis que *GCH + hybride* est plus performant pour les topologies aléatoire et mixte. Pour les instances S2, *RCH + LNS* produit des résultats supérieures aux autres méthodes pour les trois topologies. Si l'on considère les topologies, il ressort que le *RCH + LNS* obtient les meilleurs résultats pour les topologies cluster et aléatoire, tandis que *RCH + hybride* trouve les meilleurs résultats pour la topologie mixte.

Cette étude ouvre plusieurs directions de recherche. Plusieurs questions ouvertes ont été soulevées concernant l'intégration de problèmes d'optimisation dans ce contexte de nettoyage de débris, tels que le type de problèmes en fonction du volume des débris et la nécessité dans certains cas de définir des priorités. En termes d'applications, une étude de cas sur des données réelles peut être proposée pour évaluer les performances et recueillir plus d'informations pour améliorer les

méthodes.

Références

- Alarie, S. and Gamache, M. (2002). Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 16(1) :59–76.
- Barbalho, T. J., Santos, A. C., and Aloise, D. J. (2020). Metaheuristics for the work-troops scheduling problem. *International Transactions in Operational Research*.
- Coelho, L. C., Renaud, J., and Laporte, G. (2016). Road-based goods transportation : a survey of real-world logistics applications from 2000 to 2015. *INFOR : Information Systems and Operational Research*, 54(2) :79–96.
- Desrosiers, J., Laporte, G., Sauve, M., Soumis, F., and Taillefer, S. (1988). Vehicle routing with full loads. *Computers & Operations Research*, 15(3) :219–226.
- Duque, P. A. M., Dolinskaya, I. S., and Sörensen, K. (2016). Network repair crew scheduling and routing for emergency relief distribution problem. *European Journal of Operational Research*, 248(1) :272–285.
- Grimault, A., Bostel, N., and Lehuédé, F. (2017). An adaptive large neighborhood search for the full truckload pickup and delivery problem with resource synchronization. *Computers & Operations Research*, 88 :1–14.
- Hartmann, S. and Briskorn, D. (2010). A survey of variants and extensions of the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of operational research*, 207(1) :1–14.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., and Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598) :671–680.
- Lacomme, P., Moukrim, A., Quilliot, A., and Vinot, M. (2019). Integration of routing into a resource-constrained project scheduling problem. *EURO Journal on Computational Optimization*, 7(4) :421–464.
- López-Ibáñez, M., Dubois-Lacoste, J., Cáceres, L. P., Birattari, M., and Stützle, T. (2016). The irace package : Iterated racing for automatic algorithm configuration. *Operations Research Perspectives*, 3 :43–58.
- Prodhon, C. and Prins, C. (2014). A survey of recent research on location-routing problems. *European Journal of Operational Research*, 238(1) :1–17.
- Sakuraba, C. S., Santos, A. C., Prins, C., Bouillot, L., Durand, A., and Allenbach, B. (2016). Road network emergency accessibility planning after a major earthquake. *EURO Journal on Computational Optimization*, 4(3-4) :381–402.
- Shaw, P. (1998). Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems. In *International conference on principles and practice of constraint programming*, pages 417–431. Springer.

- Soares, R., Marques, A., Amorim, P., and Rasinmäki, J. (2019). Multiple vehicle synchronisation in a full truck-load pickup and delivery problem : A case-study in the biomass supply chain. *European Journal of Operational Research*, 277(1) :174–194.
- Souza, M. J., Coelho, I. M., Ribas, S., Santos, H. G., and Merschmann, L. H. d. C. (2010). A hybrid heuristic algorithm for the open-pit-mining operational planning problem. *European Journal of Operational Research*, 207(2) :1041–1051.

Biographie des auteurs



L'auteur Guilherme de Castro Pena est Professeur assistant à l'*Universidade Federal de Viçosa (UFV)*, Brésil, l'*UFV - Campus Rio Paranaíba*. Il est actuellement doctorant en Optimisation et Sûreté des Systèmes à l'Université de Technologie de Troyes au laboratoire LIST3N. Il travaille sur l'optimisation combinatoire et la recherche opérationnelle, avec des applications en logistique de crise, systèmes d'information géographique et calcul intensif.



Andréa Cynthia Santos est Professeur des Universités en Informatique à l'ULHN (Université Le Havre Normandie), Vice-présidente déléguée en charge du numérique et de transformation digitale de l'ULHN et Directrice Déléguée à la Recherche de l'école d'ingénieurs ISEL (Institut Supérieur d'Études Logistiques). Elle réalise ses travaux de recherche au LITIS (Laboratoire d'informatique, de Traitement de l'Information). Sa recherche entrent dans le cadre de la Recherche Opérationnelle appliquée à des problèmes d'optimisation dans le cadre de crises majeures (naturelles, industrielles et sanitaires) et ville durable. Andréa a porté plusieurs projets de recherche et industriels. Elle a réalisé plus de 130 publications dans des revues internationales et dans des conférences nationales et internationales.



L'auteur Christian Prins est Professeur des universités à l'Université de Technologie de Troyes, France depuis 1999. De 2000 à 2005, il a été directeur du département de génie industriel et, de 2008 à 2012, directeur du Laboratoire d'optimisation des systèmes industriels (LOSI). Il travaille actuellement au laboratoire LIST3N et s'intéresse à l'optimisation combinatoire et à la recherche opérationnelle, avec des applications aux systèmes de production, de logistique et de transport.