



HAL
open science

Optimisation des opérations de déblaiement suite aux catastrophes en milieu urbain

Andréa Cynthia Santos, Thierry Derrey

► To cite this version:

Andréa Cynthia Santos, Thierry Derrey. Optimisation des opérations de déblaiement suite aux catastrophes en milieu urbain. Cahiers de la logistique, 2, 2021, Optimisation des opérations de déblaiement suite aux catastrophes en milieu urbain. hal-03355303

HAL Id: hal-03355303

<https://hal.science/hal-03355303v1>

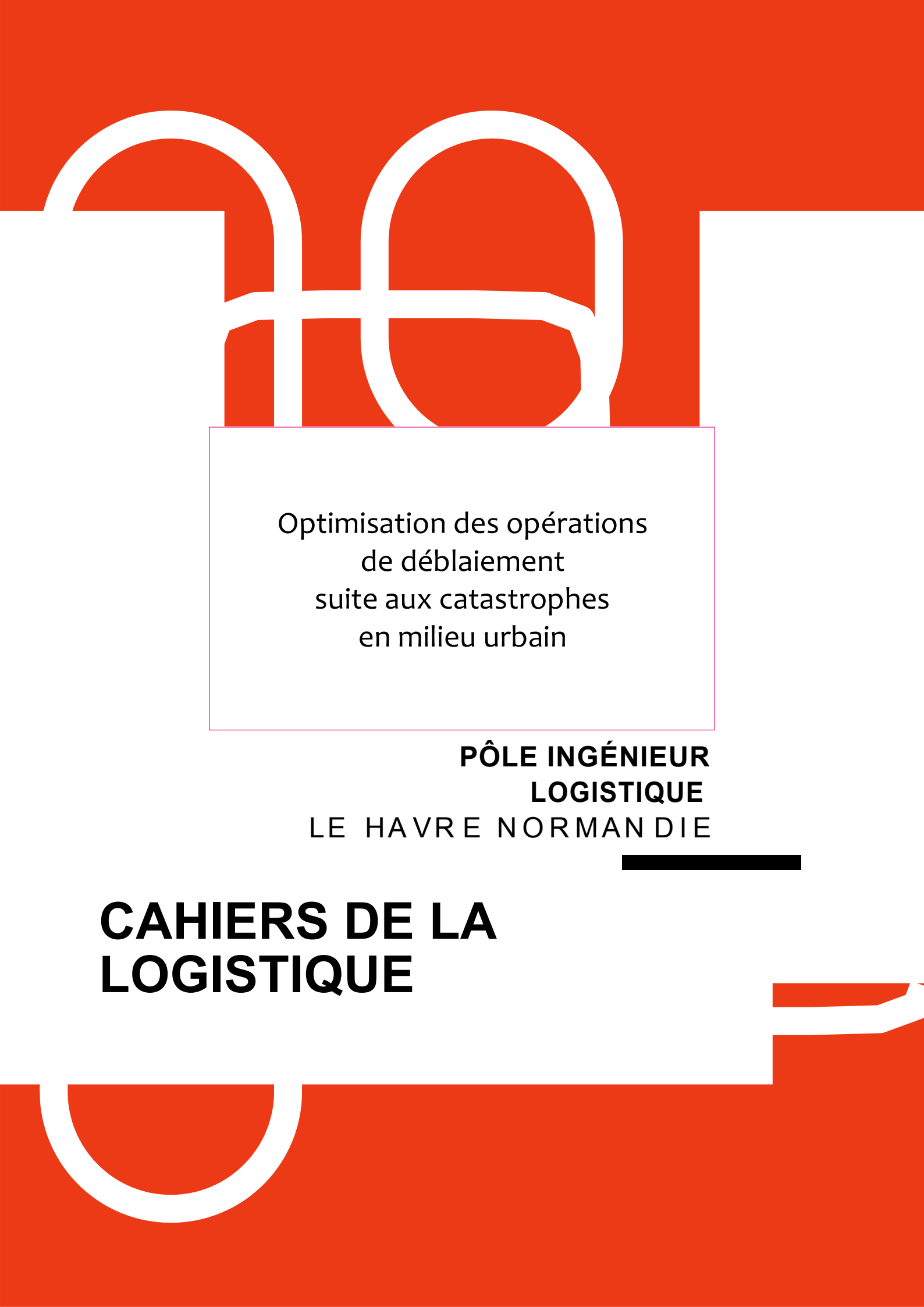
Submitted on 27 Sep 2021

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.



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



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

MÉTHODES APPROCHÉES POUR LE PROBLÈME DE PLANIFICATION DU NETTOYAGE DE DÉBRIS DANS DES RÉSEAUX URBAINS

Thiago Jobson Barbalho¹, Andréa Cynthia Santos¹, Dario José Aloise²

¹Université Le Havre Normandie, LITIS-RI2C, ISEL
15 rue Philippe Lebon, 76600, Le Havre
{thiago-jobson.barbalho, andrea-cynthia.duhamel}@univ-lehavre.fr

²Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, DI
478 rue Almino Afonso, 59.610-210, Mossoró, Brésil
aloisedj@gmail.com

RESUME

Après une catastrophe, comme lors d'un tremblement de terre majeur, le réseau routier urbain peut être endommagé ou bloqué par des débris de bâtiments effondrés. Cela a un impact négatif sur l'accessibilité de la population. Dans un tel contexte, la population a une tendance à se déplacer et à se rassembler dans des endroits considérés comme sécurisés dans la ville. L'accessibilité du réseau routier devient un enjeu important pour les opérations logistiques chargées de l'assistance et de la distribution des vivres à la population. Dans cette étude, nous développons une recherche locale dédiée et deux méta-heuristiques permettant de trouver une planification efficace pour réparer le réseau urbain. Nous menons ensuite nos expérimentations sur plusieurs scénarios théoriques et sur un scénario réel de la ville de Port-au-Prince en Haïti après le séisme de 2010. Le graphe, représentant le réseau urbain, compte 16 660 sommets et 19 866 arêtes avec plus de 500 arêtes bloquées. Enfin, nous montrerons que nos méthodes améliorent significativement les résultats de la littérature.

MOTS CLÉS: Logistique de crises majeures, planification, réseau urbain.

ABSTRACT

In the aftermath of major disasters like earthquakes, the urban road networks can be blocked due to debris from collapsed buildings. This impacts the accessibility to route first help, food and drugs to the population. In such a context, the population tends to move and gather together in security sites in the city. The road network accessibility becomes an important issue for logistics operations responsible for the relief and the distribution of supplies to the population. In this study, we develop a dedicated local search and two metaheuristics for calculating an efficient scheduling for repairing or removing debris on urban networks. Several experiments were conducted on theoretical scenarios and on a real-world scenario of Port-au-Prince city in Haïti after the 2010 earthquake. The graph representing the urban network of Port-au-Prince has 16,660 vertices and 19,866 edges with more than 500 edges being blocked. We show that our methods improve significantly the previous results from the literature.

KEYWORDS: Crises management logistics, scheduling, urban network.

1. Introduction

Des catastrophes naturelles qui se produisent chaque année dans le monde causent des pertes conséquentes humaines et économiques. A titre d'exemple, en 2020, 389 catastrophes naturelles ont été recensées, à l'origine de la perte de 15,080 vies humaines et touchant à différents degrés 98.4 millions de personnes avec des impacts financiers s'élevant à 171.3 milliards de dollars. Un exemple d'un tel événement a été observé au Haïti en 2010 et plus récemment en 2021, où le réseau routier urbain a été partiellement bloqué par des débris de bâtiments tombés. Un problème lorsque les rues sont bloquées est qu'elles peuvent isoler des régions de la ville et limiter l'accessibilité de la population. Au Haïti en 2010, il n'y avait plus de chemins entre chaque paire de points du réseau de transport urbain, ce qui est appelé en théorie des graphes de l'absence de forte connexité. D'une manière générale, dans les situations d'urgence, on cherche à améliorer l'accessibilité urbaine, afin que les équipes de secours puissent atteindre les populations qui ont besoin d'aide. Dans ce contexte, l'accessibilité du réseau est une question importante pour les opérations logistiques car elle influe sur la distribution de l'aide humanitaire et le rétablissement du niveau normal des services à la population.

Dans la littérature scientifique, plusieurs études examinent les moyens d'améliorer la résilience et nettoyer le réseau routier en cas de catastrophes naturelles. Des modèles prédictifs se retrouvent principalement pour la phase d'anticipation, tandis que des modèles d'optimisation tels que l'ordonnancement ont été développés pour la phase post-catastrophe. Nous passons en revue quelques travaux connexes ci-dessous.

Certains travaux ont développé des modèles prédictifs qui visent à estimer les dommages possibles du réseau en cas de catastrophe naturelle tels que Hirayama et al. (2010), Yücel et al. (2018) et Nagurney and Qiang (2012). Ces études sont importantes pour évaluer les dommages potentiels aux réseaux d'infrastructure tels que les transports, l'énergie électrique, etc et fournissent également des scénarios de test où les scientifiques peuvent développer et tester leurs méthodes dans des ensembles de données qui ressemblent à des catastrophes naturelles réelles.

D'autres travaux se concentrent sur les problèmes d'ordonnancement et planification pour améliorer l'accessibilité. Par exemple, une méta-heuristique *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) couplée à une *Variable Neighbourhood Search* (VNS) a été proposée par Duque and Sörensen (2011) pour allouer une quantité limitée de ressources pour améliorer l'accessibilité entre les régions rurales et les centres de distribution contraintes par un budget financier et de main d'œuvre. Une autre étude dédiée à la réhabilitation des autoroutes interurbaines se trouve dans Feng and Wang (2003), où le problème a pour objectif de minimiser le risque des secours. Les auteurs ont appliqué leurs méthodes à un scénario du tremblement de terre de Nantou qui s'est produit dans une région de Taïwan en 1999, contenant un graphe avec 52 sites et 62 routes. Dans les travaux de Sakuraba et al. (2016), les auteurs étudient le problème d'accessibilité du réseau routier après un séisme majeur, en considérant le séisme de Port-au-Prince de 2010 comme étude de cas. Le travail de Barbalho et al. (2020) étend ensuite le travail de Sakuraba et al. (2016) en introduisant deux propositions de métaheuristiques : les méthodes GRASP et *Iterated Local Search* (ILS) et une recherche locale dédiée pour résoudre efficacement les instances du problème de Sakuraba et al. (2016). Cet article fournit un résumé accessible des contributions présentées dans Barbalho et al. (2020).

Contrairement aux problèmes d'ordonnancement, certaines études se concentrent sur la partie opérationnelle du nettoyage des débris des bâtiments effondrés. En général, les problèmes

se composent de modèles de routage de véhicules pour enlever les débris dans des décharges temporaires ou permanentes. L'étude de Pramudita et al. (2014) est un point d'entrée intéressant pour ce type de recherche, où un problème de routage est utilisé pour résoudre l'élimination opérationnelle des débris. L'objectif est de définir des itinéraires pour un ensemble de véhicules qui démarrent et terminent leur trajet aux dépôts tout en minimisant le coût de leur trajet. Un graphe réaliste avec 44 sommets et 3 dépôts est utilisé dans les tests numériques, où la quantité de débris est basée sur l'estimation présentée dans Hirayama et al. (2010) avec des tremblements de terre et des inondations ayant frappés la région métropolitaine de Tokyo. Un dernier exemple est celui présenté dans Ajam et al. (2019), où les auteurs étudient un problème de dégagement de route post-désastre avec un seul véhicule. L'objectif est de trouver le meilleur itinéraire, en termes de distance, qui part d'un dépôt et répare les chemins vers des zones critiques. L'étude propose une méta-heuristique basée sur GRASP et VNS pour calculer le meilleur ordre de visite des sommets critiques. Comme cas d'étude, les auteurs ont appliqué la méta-heuristique à deux ensembles de données du réseau routier d'Istanbul, avec respectivement 74 et 250 sommets.

Le reste de cet article est organisé comme suit : nous expliquons le problème de planification dans des réseaux urbains dans la Section 2. Le modèle mathématique de ce problème a été proposé par Sakuraba et al. (2016) avec plusieurs heuristiques constructives. Nous présentons les méthodes développées pour résoudre efficacement ce problème dans la Section 3. Après avoir testé expérimentalement nos méthodes, les résultats numériques et les analyses sont fournis dans la Section 4. Enfin, les conclusions sont présentés dans la Section 5.

2. Le problème de planification dans des réseaux urbains

Le problème de planification dans des réseaux urbains est appelé dans la littérature comme le *Work-troops Scheduling Problem* (WSP). Ce problème est défini sur un graphe simple connexe avec plusieurs sommets (représentant les carrefours, les rond-points, croisements de ressources humaines, etc) et des arêtes (représentant les rues et les routes). Nous considérons les *work-troops* (WT) comme les équipes et équipements nécessaires pour nettoyer les routes bloquées ou endommagées dans le réseau urbain. Le WSP consiste à décider comment répartir sur le réseau routier les WT chargés du déblaiement des rues sur un horizon temporel afin d'améliorer l'accessibilité le plus rapidement possible. Dans des cas réels comme Port-au-Prince, cela correspond à un gros problème de planification, où le graphe représentant le réseau urbain possède 16 660 sommets, 19 866 arêtes et plus de 500 routes bloquées. Cet énorme problème nécessite une attention aux performances des méthodes (structures de données et complexité des algorithmes) afin de fournir des bonnes solutions dans un temps de calcul raisonnable.

On modélise le WSP comme un problème de planification sur un graphe représentant le réseau urbain. L'ensemble des sommets est divisé en trois types : les sommets de transbordements (extrémités de routes, carrefours, rond points, etc), les origines (les points où les WT commencent et terminent leurs déplacements) et les destinations (points de rassemblement spontanés sur le graphe où se trouve la population); l'ensemble des arêtes représente les routes et rues bloquées et non bloquées. Pour chaque route bloquée, nous prenons en compte trois valeurs différentes qui représentent la longueur, la largeur de la route et le temps nécessaire pour la réparer. Pour effectuer la réparation du réseau, nous considérons un nombre limité de WT initialement disponibles aux origines du graphe. Ces WT commencent chaque journée de travail à ces origines et y retournent une fois la journée terminée, répétant ce processus jusqu'à ce que le réseau soit complètement

réparé. On dit que le problème est dynamique car, lorsqu'une route est bloquée, ceci permet à nouveau le passage des véhicules. Lorsque cela se produit, le graphe est mis à jour et les WT peuvent être affectées à la réparation d'une autre route.

Pour résoudre des cas réels comme celui de Port-au-Prince, le processus implique la collecte de données obtenues à partir d'images satellites après la catastrophe, couplées à des informations du réseau préalablement numérisées, fournissant un graphe avec des données réelles associées à la population, état des routes, etc. À Port-au-Prince, la première image haute résolution a été acquise par le satellite optique GeoEye-1, 17 heures après le séisme. La première évaluation des dommages sur la ville a été publiée environ 41 heures après le séisme. Au cours des deux semaines suivantes, des centaines d'images satellites ont été acquises et de nombreuses cartes ont été produites par plusieurs entités.

Pour résoudre de manière optimale une instance du WSP, nous utilisons une Programmation Linéaire en Nombres Entiers (PLNE) où l'idée générale est d'appliquer deux types de flux : le premier est utilisé pour calculer l'accessibilité du réseau et le deuxième pour calculer les chemins des WT vers les arêtes bloquées, afin de les réparer. La formulation garde ensuite une trace des arêtes bloquées qui sont réparées, mettant à jour les chemins les plus courts et permettant aux WT de se déplacer sur ces routes. Bien que cette méthode puisse trouver la meilleure planification possible pour le problème, elle ne convient que pour les petits graphes avec peu de sommets et d'arêtes. Pour les instances de données plus volumineuses, il est généralement nécessaire d'utiliser des méthodes approchées telles que les heuristiques et les métaheuristiques qui ne peuvent pas garantir la planification optimale, mais qui sont généralement très efficaces pour résoudre les grandes instances de problèmes dans un temps de calcul raisonnable et avec une très bonne qualité.

3. Méthodes approchées

Dans cette étude, nous avons choisi d'implémenter le GRASP et l'ILS pour résoudre le WSP. Ces deux métaheuristiques ont été appliquées avec succès à un grand nombre de problèmes d'optimisation dans le passé. Le GRASP est une méta-heuristique composée de deux phases : une première phase pour construire une solution initiale avec une procédure de recherche adaptative aléatoire et gloutonne et une seconde phase où une recherche locale est appliquée pour améliorer la solution initiale. D'autre part, l'ILS est une méta-heuristique qui applique plusieurs modifications aléatoires à une solution (dans le contexte de l'ILS, c'est ce qu'on appelle la procédure de perturbation) suivie d'une recherche locale. L'idée générale d'ILS est de rechercher des solutions diverses mais en préservant des parties des solutions optimisées. Dans les sections ci-dessous, nous décrirons plus en détail les méthodes développées.

3.1 GRASP pour le WSP

La caractéristique principale du GRASP est qu'il nécessite une heuristique constructive gloutonne et aléatoire pour construire la solution initiale. Gloutonne signifie que le meilleur élément est ajouté à la solution à chaque itération. Pour le WSP, cela peut signifier par exemple, inclure une réparation d'une route qui est utilisée dans plusieurs chemins vers les destinations, ou encore une route qui réduit les plus courts chemins entre une origine et une destination. L'aspect aléatoire signifie qu'au lieu de prendre le meilleur élément, un choix aléatoire sera réalisé. Ceci permet de diversifier la solution et éventuellement échapper aux biais de la construction gloutonne. Pour le

WSP, il existe quelques heuristiques qui peuvent être adaptées à la stratégie gloutonne et aléatoire. C'est le cas par exemple de l'heuristique de classement. Il s'agit d'une procédure simple qui dénombre d'abord le nombre de fois où chaque arête bloquée apparaît dans les chemins les plus courts à partir de chaque paire d'origine et de destination, puis les classe par ordre décroissant d'apparition. À chaque itération on ajoute, en suivant l'ordre de la liste, la première arête qui respecte les contraintes du problème (nombre disponibles de WT, déplacement des WT jusqu'à l'arête ciblée en passant par des routes non-bloquées, entre autres). Lorsque deux ou plusieurs arêtes bloquées ont la même classification, le choix décisif se porte sur l'arête (route) qui a le plus petit temps de réparation.

La Figure 1 représente l'algorithme pour le GRASP en utilisant un diagramme de flux. Pour améliorer la solution initiale, la méta-heuristique utilise une procédure de recherche locale qui modifie légèrement à plusieurs reprises une solution en supposant qu'elle peut éventuellement en produire une meilleure. Un mouvement de recherche locale consiste à permuter l'ordre de réparation de deux arêtes bloquées dans la solution. Par exemple, supposons que les arêtes e_i et e_j soient respectivement la première et la dernière à être réparées. Échanger e_i et e_j conduirait alors à e_i étant la dernière et e_j étant la première. Puis, l'impact du changement est évalué pour voir si les plus courts chemins sont réduits après cette modification. La méta-heuristique continue de construire et d'améliorer de nouvelles solutions jusqu'à ce qu'un nombre d'itérations prédéfini soit atteint.

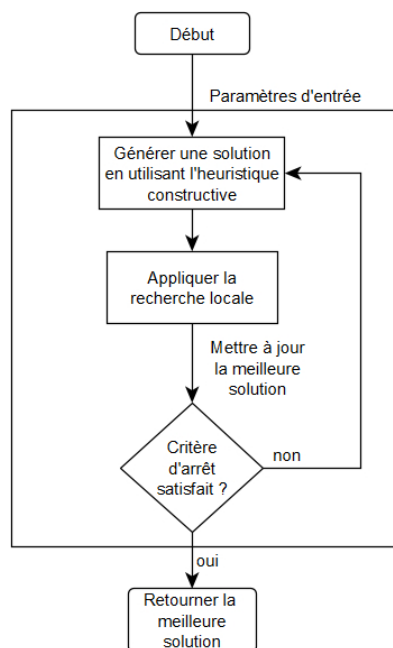


FIGURE 1 – Schéma de l'algorithme GRASP.

3.2 ILS pour le WSP

De la même manière que le GRASP, l'ILS requiert également une heuristique constructive pour la solution initiale, mais les aspects gloutons et aléatoires ne sont pas imposés. De plus, l'ILS utilise également une procédure de recherche locale comme le fait GRASP. La principale différence entre les deux métaheuristiques est que l'ILS ne génère pas plusieurs solutions initiales. Afin d'introduire de la diversité, une procédure de perturbation est appliquée tout en maintenant

certaines parties de la solution, par ailleurs déjà optimisées par la recherche locale.

La Figure 2 représente l'algorithme pour l'ILS. L'heuristique de classement est utilisée pour générer la solution initiale, la procédure de recherche locale est similaire à celle utilisée dans le GRASP. Enfin, nous avons développé une nouvelle procédure de perturbation basée sur des mouvements de permutations aléatoires. Elle applique un certain nombre d'échanges choisis au hasard pour modifier une solution même si cette modification n'améliore pas la solution. Ces permutations sont effectuées jusqu'à ce qu'au moins 30% de la solution soient modifiées. La méthode part d'une solution et alterne plusieurs fois les perturbations et la recherche locale jusqu'à ce qu'un nombre d'itérations prédéfini soit atteint, mettant à jour la solution en place chaque fois qu'une meilleure est trouvée.

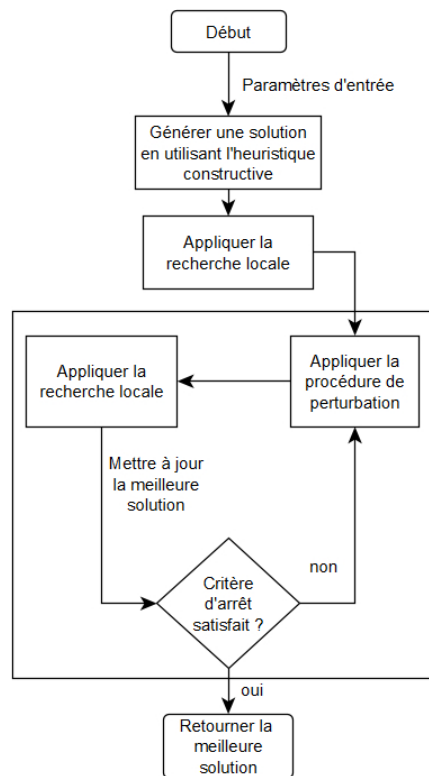


FIGURE 2 – Schéma de l'algorithme l'ILS.

4. Expérimentations numériques

Nous avons effectué plusieurs expériences pour évaluer les performances, la robustesse et la capacité à résoudre le problème en utilisant les méthodes proposées. Les métaheuristiques ont été implémentées dans le langage C++ et les tests ont été effectués sur un processeur Intel Core i7 à 3,4 GHz et 16 Go de RAM. Nous avons utilisé l'ensemble d'instances de Sakuraba et al. (2016) composé de 80 instances générées sur un graphe avec 10 sommets, 20 arêtes et $\{5, 10, 15, 20\}$ routes bloquées; et l'instance de Port-au-Prince avec 16 660 sommets, 19 866 routes et plus de 500 routes bloquées. Cette instance a été obtenue après traitement des données effectué par les partenaires de l'*International Charter Space and Major Disasters* (ICSMD, 2019), avec une expertise de plus de 30 ans dans la production de cartes après catastrophes majeures. Des expérimentations avec le GRASP et l'ILS ont été réalisées avec un temps d'exécution limité à 30 secondes pour les instances

de petite et moyenne taille et 5 heures pour l'instance de Port-au-Prince. Les résultats numériques ont été comparés avec les résultats présents dans la littérature scientifique de Sakuraba et al. (2016).

La méthode GRASP a obtenu 73 des 80 solutions optimales. Pour les autres solutions où les valeurs optimales n'ont pas été trouvées, on observe des écarts à la solution optimale inférieurs ou égaux à 0,03%. Le temps d'exécution moyen était de 1,8 seconde et la méthode GRASP n'a pas consommé plus de 10 secondes pour exécuter cet ensemble d'instances. Quant à l'ILS, il produit des résultats meilleurs que le GRASP, atteignant 76 des 80 solutions optimales. Les écarts par rapport à la solution optimale sont d'au plus 0,01%. Le temps d'exécution moyen est de 2,4 secondes et l'ILS n'a pas consommé plus de 13 secondes pour finaliser l'exécution de ces instances. Dans Sakuraba et al. (2016), les meilleurs résultats obtenus étaient 52 des 80 solutions optimales pour ces instances. L'écart moyen par rapport à solution optimale est égal à 2,2%. Les métaheuristiques proposées améliorent les résultats trouvés dans la littérature en termes de valeur de la fonction objectif.

Pour analyser la robustesse (capacité de la méthode à trouver une solution cible de qualité, malgré les composantes aléatoires utilisées dans les méthodes) et l'efficacité (temps de calcul) des métaheuristiques, nous avons réalisé des tests numériques en utilisant des graphiques du type *Time to Target Plots* (TTTplots). Ces simulations ont été réalisées en exécutant chaque méthode indépendamment 200 fois pour une instance donnée. En utilisant différentes racines du générateur de nombres aléatoires, nous spécifions une valeur cible et, pour chaque exécution, nous calculons le temps pris par chaque méthode pour atteindre la valeur cible spécifiée. En général, la robustesse de la méthode est mesurée par la distance à laquelle la courbe se trouve de l'axe y, plus elle est proche de cet axe, plus elle est robuste; tandis que l'efficacité est déterminée par l'allure de la courbe. Lorsqu'elle est droite, cela signifie que la méthode est capable de trouver rapidement la solution cible.

La Figure 3 présente un TTTPlot pour une instance avec 15 routes bloquées, où la valeur cible est définie à l'optimum. On note que l'ILS converge rapidement vers la valeur cible, tandis que le GRASP prend plus de temps pour le faire et présente une performance moins robuste. En termes de probabilité, l'ILS a 100% de probabilité, selon ces résultats, d'atteindre la cible dans les 0,6 seconde, tandis que le GRASP prend un peu plus de 1,1 seconde de temps d'exécution. Il convient de mentionner que les deux métaheuristiques utilisent des composants très proches, comme l'heuristique basée sur le classement et la même recherche locale. La différence repose sur les particularités de ces méthodes comme le *multi-start* pour le GRASP et une procédure de perturbation pour l'ILS. La stratégie d'ILS consistant à conserver des parties de solutions optimales est très importante pour les résultats obtenus.

4.1 Résultats de l'étude de cas de Port-au-Prince

Le graphe de l'étude de cas de Port-au-Prince lié au séisme de 2010 contient 16 657 sommets et 19 558 arêtes dont 536 sont bloquées. Les expériences réalisées par Sakuraba et al. (2016) ont montré que toutes les routes bloquées peuvent être réparées par 8 WT en au moins 106 jours.

Sur le graphe de Port-au-Prince, la première période de temps joue un rôle clé, puisque la plupart des chemins sont obtenus après le premier jour de réparation. En résolvant et en analysant l'instance d'Haïti avec nos métaheuristiques, nous avons trouvé une somme des distances égale à 270 km après la première période de temps. Cela signifie que si nous devons envoyer une WT de

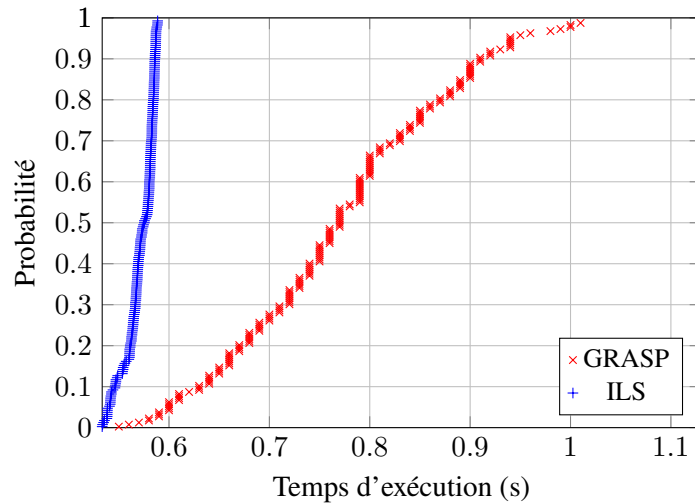


FIGURE 3 – TTTPlot pour une instance de le problème.

l'origine à toutes les autres destinations, toutes les WT ensemble auraient parcouru un total de 270 km au moment de leur arrivée. Après cela, les améliorations ne sont que de 0,8% de la somme des distances. Le Tableau 1 présente les réductions des distances par période de temps pour les deux métaheuristiques en fonction de leur temps d'exécution. Après 1 heure d'exécution, le GRASP a trouvé une réduction de 13,2 km tandis que l'ILS a trouvé 18,5 km dans la somme des chemins des plus courts, pour toutes les périodes. Après 2 heures, la somme des plus courts chemins est réduite de 23 km et de 30 km après 4 heures de temps d'exécution. Ensuite, les améliorations ultérieures sont marginales et correspondent à des petites modifications locales en mètres.

Temps d'exécution (en heures)	GRASP réduction de distance (en km)	ILS réduction de distance (en km)
1	13,2	18,5
2	23,6	23,9
3	28,2	28,3
4	29,6	29,7
5	29,7	29,7

TABLE 1 – Réductions de la distance des plus courts chemins entre les origines et les destinations.

La Figure 4 est un extrait du réseau routier de Port-au-Prince et de son état après la réparation des arêtes bloquées. Le cercle et les carrés représentent respectivement l'origine du réseau et la localisation des destinations. Dans la Figure 4a, les lignes noires représentent les routes bloquées ; tandis que dans la Figure 4b, elles représentent les chemins les plus courts entre l'origine et les destinations. La recherche locale permet de calculer rapidement une planification de réparation des routes bloquées entraînant une amélioration importante des distances.

Les simulations numériques réalisées montrent que les temps d'exécution des métaheuristiques proposées sont intéressantes même pour les grandes instances comme Port-au-Prince.

5. Conclusions

Dans cette étude, nous avons développé les méthodes GRASP et ILS pour le WSP, qui ont été appliquées avec succès à plusieurs problèmes d'optimisation dans la littérature. Nous avons

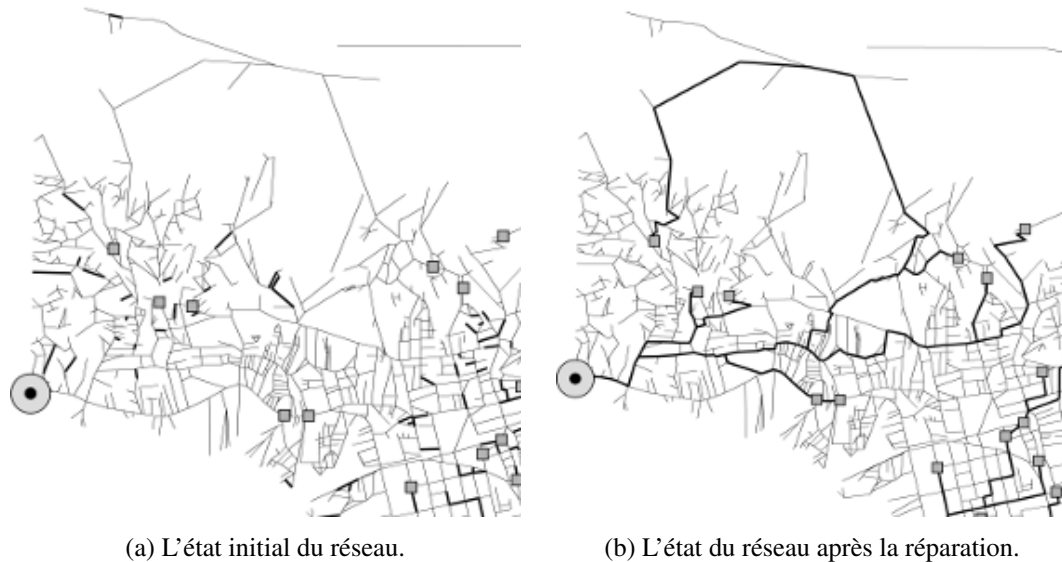


FIGURE 4 – Port-au-prince avant et après la réparation du réseau.

adapté l’heuristique de classement de Sakuraba et al. (2016) pour la phase constructive du GRASP et la génération de la solution initiale de l’ILS. Nous avons développé une recherche locale dédiée pour améliorer les solutions trouvées. La procédure de perturbation pour ILS consiste à appliquer des échanges aléatoires dans une recherche de diversité de solutions, tout en maintenant leurs parties sous-optimales. En utilisant les deux méthodes, les résultats améliorent considérablement ceux existants dans la littérature.

Considérant l’ensemble d’instances simulées de Sakuraba et al. (2016), les métaheuristiques ont pu améliorer jusqu’à 50% des résultats existants. Le GRASP a obtenu 73 des 80 solutions optimales de cet ensemble de tests, tandis que l’ILS a trouvé 76 des 80 solutions optimales. Pour les solutions où la valeur optimale n’est pas trouvée, le GRASP et l’ILS produisent des écarts à l’optimum d’au plus 0,03% et 0,01%, respectivement. Pour l’instance de Port-au-Prince, les deux métaheuristiques ont pu converger vers une très bonne solution. Il s’agit d’un résultat intéressant qui peut indiquer que certaines instances simulées présentent une structure difficile pour la métaheuristique proposée, que l’on ne retrouve pas dans l’étude de cas de Port-au-Prince.

Cette étude ouvre plusieurs pistes de recherche comme le développement d’autres démarches de recherche locale. De plus, les excellents résultats obtenus par les métaheuristiques proposées encouragent l’intégration d’autres aspects à ce problème, l’utilisation de drones pour coordonner les WT et d’autres fonctions objectifs issues de l’ordonnancement comme, par exemple, la durée totale des travaux et la somme des dates de finalisation des tâches.

Références

- Ajam, M., Akbari, V., and Salman, F. S. (2019). Minimizing latency in post-disaster road clearance operations. *European Journal of Operational Research*, 277(3) :1098 – 1112.
- Barbalho, T. J., Santos, A. C., and Aloise, D. J. (2020). Metaheuristics for the work-troops scheduling problem. *International Transactions in Operational Research*.
- Duque, P. M. and Sörensen, K. (2011). A GRASP metaheuristic to improve accessibility after a disaster. *OR Spectrum*, 33(3) :525–542.

- Feng, C.-M. and Wang, T.-C. (2003). Highway emergency rehabilitation scheduling in post-earthquake 72 hours. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5(1).
- Hirayama, N., Shimaoka, T., Fujiwara, T., Okayama, T., and Kawata, Y. (2010). Establishment of disaster debris management based on quantitative estimation using natural hazard maps. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 140.
- ICSMD (Accessed on December 15th,2019). International charter “Space and major disasters”. <https://www.disasterscharter.org>.
- Nagurney, A. and Qiang, Q. (2012). Fragile networks : Identifying vulnerabilities and synergies in an uncertain age. *International Transactions in Operational Research*, 19(1-2) :123–160.
- Pramudita, A., Taniguchi, E., and Qureshi, A. G. (2014). Location and routing problems of debris collection operation after disasters with realistic case study. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 125 :445 – 458. Eighth International Conference on City Logistics 17-19 June 2013, Bali, Indonesia.
- 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) :381–402.
- Yücel, E., Salman, F., and Arsik, I. (2018). Improving post-disaster road network accessibility by strengthening links against failures. *European Journal of Operational Research*, 269(2) :406 – 422.

Biographie des auteurs



Thiago Barbalho est un doctorant en Informatique, Optimisation et Recherche Opérationnelle à l'Université Le Havre Normandie. Il réalise ses travaux de recherche au LITIS (Laboratoire d'informatique, de Traitement de l'Information) sur la logistique humanitaire suite aux catastrophes naturelles, industrielles et crises sanitaires.



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.



Dario José Aloise est Professeur des universités en informatique à l'Université de l'État du Rio Grande du Norte au Brésil. Il est docteur en Ingénierie des Systèmes et informatique par l'Université Fédérale de Rio de Janeiro au Brésil. Dario a une expertise en informatique et génie industrielle et réalise des travaux de recherche en recherche opérationnelle, notamment d'optimisation, et d'analyse et complexité algorithmique. Essentiellement, les méthodes appliquées dans sa recherche scientifique sont des heuristiques et des métaheuristiques pour la résolution de problèmes NP-difficiles. Dario a piloté plusieurs projets de recherche en plusieurs domaines, comme dans le secteur pétrolier, et a une forte implication dans l'initiation scientifique des étudiants en formation initiale et dans des programmes de master et doctorat.

ÉTUDE DE FONCTIONS OBJECTIFS POUR LE PROBLÈME DE PLANIFICATION DU NETTOYAGE DE DÉBRIS DANS DES RÉSEAUX URBAINS

Felix Combaud¹, Andréa Cynthia Santos²

¹UFR Sciences et Techniques de Nantes

2 Chemin de la Houssinière, 44322 Nantes

felix.combaud@etu.univ-nantes.fr

²Université Le Havre Normandie, LITIS-RI2C, ISEL

15 rue Philippe Lebon, 76600, Le Havre

andrea-cynthia.duhamel@univ-lehavre.fr

RESUME

Les problèmes de planification ont une importance dans plusieurs niveaux de la chaîne logistique. Ils ont été notamment étudiés dans le cadre de la planification de tâches dans des ateliers. Ces problèmes connaissent un nouvel essor dans le cadre de la gestion de crise, où la planification de tâches est modélisée sur un graphe, représentant les réseaux de transport urbains. L'ordre d'exécution des tâches a donc un impact sur le réseau en termes de connectivité, débits du trafic, distribution de l'aide humanitaire, etc. Un exemple d'application concerne le nettoyage des débris suite à des tremblements de terre. Dans ce travail, nous nous intéressons à ces modèles intégrés de planification et de conception de réseau. Notamment, nous analysons l'impact de différentes fonctions objectifs issus des modèles de planification classique et de conception de réseaux dans les modèles intégrés, en utilisant des indicateurs liés au contexte de crise.

MOTS CLÉS: Logistique de crises majeures, planification, réseau urbain, modèles intégrés d'optimisation.

ABSTRACT

Scheduling problems are relevant in several levels of a supply chain. They are particularly studied in the context of production systems. However, new issues have been raised for such problems due to crises management, where the scheduling is modeled in a graph, which represents an urban network. In this case, the tasks execution order impacts the urban network in terms of connectivity, traffic flow, supplies distribution, etc. An example of application concerns the debris clearance after major earthquakes. In this study, we investigate integrated models coupling aspects from scheduling and network design ones. Especially, we analyze the impact of different objective functions coming from classical scheduling and network design models, using indicators related to the crisis context.

KEYWORDS: Crises management logistics, scheduling, urban network, integrated optimization models.

1. Introduction

Les problèmes de planification ont une importance dans plusieurs niveaux de la chaîne logistique. Ils ont été notamment étudiés dans le cadre de la planification et de l'ordonnancement de tâches dans des ateliers (Allahverdi, 2016). Ces problèmes connaissent un nouvel élan dans le cadre de la gestion de crise, où la planification de tâches dans le temps est modélisée sur un graphe, représentant un réseau de transport urbain. L'ordre d'exécution des tâches a donc un impact sur le réseau en termes de connectivité, débits du trafic, distribution de l'aide humanitaire, etc. Les séismes à grande échelle, comme celui qui a frappé Port-au-Prince au Haïti en 2010, sont un exemple d'application pour le problème de nettoyage des débris avec des impacts sur le réseau urbain.

La réhabilitation optimisée du réseau routier présente alors un défi important (Feng and Wang, 2003). D'une part, dans les premiers jours qui suivent une catastrophe, la réhabilitation permet de distribuer de l'aide humanitaire et d'atténuer les impacts sur les populations. D'autre part, à moyen et long termes, cela permet le retour de l'économie locale, des services, entre autres. Outre ces aspects, les zones urbaines deviennent très sensibles aux événements catastrophiques due à une augmentation progressive de la densité de la population dans ces zones. Puis, selon EM-DAT (2019), sur la période de 2009 à 2019, les tremblements de terre sont les catastrophes causant le plus grand nombre de morts et le troisième type de catastrophes en termes d'impacts financiers pour la reconstruction.

Dans la littérature scientifique, il y a quelques travaux de référence comme celui de (Sakuraba et al., 2016b,a). Les auteurs étudient le problème d'accessibilité du réseau routier après un séisme majeur, en considérant le séisme de Port-au-Prince de 2010 comme étude de cas. Le problème est formalisé sous le nom de *Work-Troops Scheduling Problem* (WSP) et consiste à décider comment répartir sur le réseau routier les équipes et équipements (appelés des Work-Troops - WT) chargés du déblaiement des rues. Au sein des problèmes de recherche opérationnelle, le WSP appartient à la famille des problèmes de planification intégrant des aspects du réseau urbain, issus du domaine de conception de réseau. Cela consiste au sens général à réaliser un calendrier optimal, selon divers critères, d'attribution de ressources à des tâches sur plusieurs segments de temps. On considère ici la ville comme un graphe avec ses nœuds représentant les intersections et des points particuliers (le port, l'aéroport, les points de rassemblement de la population,...). Puis, les différentes rues, bloquées ou non, relient deux nœuds, représentant les arcs du graphe. L'affectation d'une ou plusieurs WT à une rue permet de la débloquent, modifiant ainsi l'état du réseau urbain. Cela implique donc d'atteindre à chaque pas de temps de nouveaux nœuds du réseau urbain. Le problème a donc deux aspects dynamiques : l'un structurel lié à la possibilité d'avoir des nouvelles routes bloquées due à des répliques des séismes et l'autre lié au déblocage des routes. Les travaux cités précédemment traitent le deuxième aspect.

Les travaux (Sakuraba et al., 2016b,a) étudient le WSP avec pour objectif de réduire la somme des plus courts chemins permettant d'accéder aux différents nœuds de regroupement de la population. Ceci est pondéré par le nombre de personnes dans ces nœuds de regroupement. C'est un modèle avec une fonction objectif inspirée du domaine de la conception de réseau. Une telle modélisation va donc, lors des premiers pas de temps de la résolution, trouver les rues à débloquent pour obtenir les chemins les plus courts menant à chaque regroupement de population. Toutefois, lorsque ces chemins optimaux sont obtenus, nous atteignons un point stable et la fonction objectif ne progresse plus, même si le modèle continue à travailler pour libérer l'ensemble du réseau routier.

Outre ce point, l'utilisation d'une pondération du nombre de personnes dans la fonction objectif rend difficile des analyses comparatives.

Les auteurs proposent également des heuristiques lexicographiques, basées sur des classements (*ranking* en anglais) et sur les méthodes des économies (*savings* en anglais). En (Barbalho et al.), des métaheuristiques multi-start et itératives sont proposées.

Dans ce travail, nous nous intéressons à ces modèles intégrés de planification et de conception de réseau. Notamment, nous analysons l'impact de différentes fonctions objectifs issues (a) des modèles de planification classique comme la durée totale des travaux (communément appelé de *makespan* (MKS), de l'anglais) et la somme des dates de finalisation des tâches (communément appelé de *sum of completion time* (CT), de l'anglais); (b) des modèles de conception de réseau telles que la somme des plus court chemins aux destinations (référée ici comme PCC) et la connexité globale (CG) du réseau. Nous réalisons des analyses en utilisant des indicateurs de performance, ainsi que des indicateurs liés au contexte de crise afin de mesurer l'impact de ces fonctions objectifs sur ce modèle intégré pour le WSP. Enfin, nous nous sommes intéressés à la définition de la borne de l'horizon de temps T et ses implications dans les solutions. Le reste de ce document est organisé comme suit : les modèles sont décrits dans la Section 2. Les résultats et analyses sont fournis dans la Section 3. Ensuite, les conclusions et perspectives futures sont présentées dans la Section 4.

2. Modèles pour le WSP

La Figure 1 fournit une vision globale des fonctions objectifs étudiés dans ce travail. Ils seront expliqués dans cette section d'une façon descriptive et en ayant recours à des Équations pour les fonctions objectifs. Le lecteur intéressé par la définition et les détails de l'écriture des formules mathématiques sont invités à consulter le travail (Sakuraba et al., 2016b).

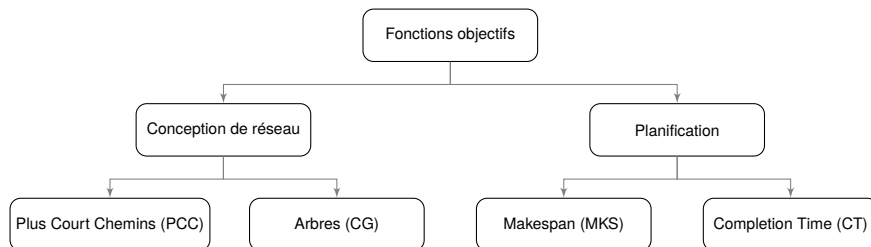


FIGURE 1 – Vision des fonctions objectifs qui peuvent être utilisées dans le modèle intégré WSP.

2.1 Modèle de plus court chemins

Le modèle proposé par Sakuraba et al. (2016a) s'intéresse davantage à l'aspect conception de réseau du problème. En effet, ce dernier vise la réparation de routes qui débloquent rapidement les plus courts chemins. Le modèle a pour avantage de permettre l'accès rapide à une grande proportion de la population. Par conséquent, les troupes de secours peuvent utiliser les quelques chemins optimaux d'accès à la population dans les premières unités de temps après le désastre.

Le modèle PCC utilise la fonction objectif donnée dans l'Équation (1), où p_i est la population regroupée dans le nœud i et s_i^t est la somme accumulée des PCC jusqu'au nœud i dans la période t . Ce modèle contient des contraintes classiques de flot pour garantir la continuité des chemins passant par des rues débloquentes jusqu'aux destinations à chaque pas de temps. Des

contraintes de flot des WT afin d'assurer qu'il y a un chemin non encombré pour passer les WT jusqu'à l'extrémité d'une rue à nettoyer. Des contraintes de planification des WT, responsables d'affecter les WT aux rues à débayer. Enfin, il a aussi des contraintes pour le calcul du PCC, suivies des définitions des variables.

$$\min Z = \sum_{i \in D} \sum_{t=1}^T p_i s_i^t \quad (1)$$

2.2 Modèle de connectivité

Le deuxième modèle étudié appartient au domaine de la conception de réseau, basé sur la notion de connectivité. Cette notion vient décrire un état du réseau où depuis n'importe quel point on peut atteindre tous les autres. Cela signifie en pratique, qu'il n'y a pas de portions du réseau routier qui seraient totalement isolés par des routes bloquées. Nous nous intéressons ici au temps minimal nécessaire pour obtenir cette connectivité. Cela nous permet d'obtenir au plus tôt cet accès total sans favoriser des points de rassemblement qui auraient été plus peuplés. Cet aspect est notamment intéressant lorsque la population est très dispersée.

Dans le modèle de connectivité du graphe (CG), le principe est d'utiliser une structure minimale capable d'indiquer que le graphe est connexe. Ceci peut se faire en utilisant un arbre couvrant qui est défini comme suit : un arbre couvrant est un graphe avec exactement $n - 1$ arêtes (n est le nombre de sommets du graphe) dont l'ajout d'une nouvelle arête forme un cycle et la suppression d'une arête quelconque déconnecte le graphe (Santos et al., 2016). En CG, l'idée est qu'on arrivera à cet arbre au fur et à mesure que les rues seront débloquées.

Pour obtenir la structure d'arbre, les variables h_{ij}^t sont ajoutées au modèle (si $h_{ij}^t = 1$ alors l'arête $[i,j]$ appartient à l'arbre dans la période t , sinon $h_{ij}^t = 0$), ainsi que l^t ($l^t = 1$ lorsque la structure d'arbre est finalement obtenu). Les contraintes classiques de conservation de flot sont modifiées dans ce modèle : un flot est envoyé à chaque sommet du graphe afin de former la structure minimale de connectivité. Dans le modèle PCC, un flot est envoyé à chaque destination. La fonction objectif (2) impose la solution à avoir une structure d'arbre le plus rapidement possible, tandis que les inégalités (3) garantissent que lorsque la somme des $h_{ij}^t = n - 1$, alors $l^t = 1$, en cas contraire $l^t = 0$. Notons que, techniquement, ce modèle minimise le temps d'obtention de la connectivité.

$$\max Z = \sum_{t=1}^T t \times l^t \quad (2)$$

$$l^t (n - 1) \leq \sum_{[i,j] \in E} h_{ij}^t \quad \forall t = \{1 \dots T\} \quad (3)$$

2.3 Modèle de makespan

Le *makespan* est un terme appartenant au domaine de la planification et de l'ordonnement de tâches qui vient décrire le temps écoulé entre le début et la fin d'un travail. L'objectif étant de minimiser ce temps afin d'obtenir les meilleurs délais possibles. Cet objectif peut présenter plusieurs intérêts pour la gestion d'un problème de logistique humanitaire ou de nettoyage de routes. Le premier intérêt concerne la population, car réduire le temps total de nettoyage des routes permet de retourner plus rapidement à une situation proche de la normale au sein de la ville. Cela

présente aussi un intérêt pour les secours, car les équipes pourront se déplacer en utilisant tout le maillage du réseau urbain. Enfin, du point de vue de la gestion de crise et des décideurs, réduire le temps total permettrait de réduire certains coûts, par exemple, en limitant la durée d'utilisation des WTs.

Ce modèle calcule la date de fin des réparations sans tenir compte d'éléments, tel que l'accès aux plus courts chemins. Cela signifie que la partie gestion de flots de plus courts chemins présente dans les deux modèles précédents n'apparaît plus. Le modèle conserve cependant les contraintes relatives au nettoyage des routes et à l'utilisation des WTs (flots des WTs). Le principal ajout concerne les variables binaires m^t , $t = \{1 \dots T\}$ qui permettant de mesurer le temps de fin du travail de nettoyage. Cette variable est définie pour chaque unité de temps du problème, et m^t vaut 1 si le nettoyage se termine au temps t , 0 sinon. La fonction objectif vient par la suite multiplier cette variable à son temps associé, pour que le résultat de la fonction objectif donne le temps de fin. Les contraintes (5) ont pour rôle de fixer $m^t = 1$ lorsque toutes les routes sont débloquentées, 0 sinon. Étant donné que le problème est en minimisation, le modèle va chercher le plus petit temps pour finaliser le déblaiement.

$$\min Z = \sum_{t=1}^T t \times m^t \quad (4)$$

$$m^t \leq \sum_{[i,j] \in B} z_{ij}^t / |B| \quad \forall t = \{1 \dots T\} \quad (5)$$

2.4 Modèle de *sum of completion time*

Le quatrième modèle est aussi inspiré du domaine de la planification et de l'ordonnancement de tâches, appelé de *Sum of completion time*. Dans ce type de modèle, au lieu de considérer la date de fin comme dans le modèle de *Makespan*, le modèle considère la somme des dates de fin de réparation de toutes les routes. L'objectif étant également de minimiser cette somme, en essayant de terminer au plus vite des réparations de routes.

Dans le domaine de l'ordonnancement, ce problème peut parfois être résolu par des stratégies dites de "plus court processus en premier", qui favorisent la finalisation des tâches les plus courtes en premier. Cependant, dans le WSP, certains aspects liés au réseau urbain peuvent engendrer des comportements différents. Par exemple, il est possible d'avoir des tâches qui sont rapides à finaliser, mais qui sont inaccessibles au début de l'optimisation à cause d'un enchaînement de routes bloquées, empêchant ainsi les trajets des WTs jusqu'à ces routes rapides à déblayer. Ce modèle cherche, dès que possible, à débloquent rapidement de nombreuses routes. Cela a l'avantage de rapprocher le réseau routier de son état initial en peu de temps et par conséquent de permettre une circulation plus fluide des équipes de secours.

Dans ce modèle, les contraintes liées au calcul des plus court chemins ne sont pas considérés. Par contre, les contraintes relatives au débloquentage des routes et à la gestion des WTs (flots de WTs) figurent dans le modèle. Afin de réaliser la *Sum of completion time*, les variables n_{ij}^t sont ajoutées au modèle et définies pour chaque route bloquée et pour chaque unité de temps. Les variables n_{ij}^t prennent la valeur 1 si la route allant de i à j est débloquentée au temps t , 0 sinon. Dans la fonction objectif, une multiplication est réalisée entre chacune de ces variables et son temps associé afin de récupérer le temps de fin de chaque route. De plus, les contraintes (7) sont aussi additionnées au modèle avec pour objectif de déterminer les périodes

de temps pour lesquelles la variable pourra prendre la valeur 1. Si $z_{ij}^t = 1$, alors l'arête $[i, j]$ est débloquée dans la période t , par conséquent $n_{ij} \leq 1$, sinon $n_{ij} \leq 0$.

$$\min Z = \sum_{[i,j] \in B} \sum_{t=1}^T t \times n_{ij}^t \quad (6)$$

$$n_{ij}^t \leq z_{ij}^t \quad \forall [i, j] \in B, t = \{1 \dots T\} \quad (7)$$

3. Expérimentations numériques et analyses

Les différents modèles mathématiques étudiés ont été implémentés dans le langage Julia à travers JuMP. Le logiciel de Programmation Linéaire en Nombres Entiers (PLNE) CPLEX, version 20.1, a été utilisé pour résoudre les quatre modèles. Enfin, les expérimentations numériques ont été conduites dans un ordinateur possédant un processeur IntelCore i7-1165G7 @2.80Ghz.

Les expérimentations ont plusieurs objectifs tels qu'étudier l'impact des modèles en considérant des indicateurs de qualité liés au contexte de crise, détaillés ci-dessous. Cela permet d'observer si nos hypothèses et nos intuitions sur les attendus des modèles se confirment, ainsi que de comprendre des éventuels phénomènes. Les indicateurs de qualité utilisés sont :

- (a) l'accessibilité, notée A, indique le temps auquel les plus courts chemins vers des points (sommets du graphe) de rassemblements de la population sont atteints.
- (b) le temps de réparation, noté RT, fournit le temps de fin de réparation de la dernière route bloquée.
- (c) la somme des temps de fin, noté ST, représente la somme des temps de fin de réparation de chaque route bloquée.
- (d) l'inactivité, noté iWT, donne le nombre de fois où une WT se trouve inactive avant la fin des réparations.

Deux types de graphiques classiques sont utilisés afin de présenter les résultats : des diagrammes de Gantt qui permettent de montrer la planification du temps pour les différents modèles et les graphiques en barre afin de comparer les modèles selon chacun des indicateurs présentés précédemment.

Concernant les instances utilisées pour réaliser ces expérimentations, nous avons construit plusieurs graphes avec $\{10, 15, 20\}$ sommets, où le nombre d'arêtes est calculé en fonction du nombre de sommets et est égal à deux fois ceux-ci. Trois schémas de blocages sont utilisés : (i) blocages de routes dans les plus courts chemins des origines aux destinations ; (ii) blocages de routes en dehors des plus courts chemins ; et (iii) une valeur similaire de les routes bloquées se trouvent en dehors et dans les plus courts chemins. Le nombre d'arêtes impliqués dans les plus courts chemins δ est utilisé pour calculer le nombre d'arêtes bloquées pour chacune de ces trois configurations (i), (ii) et (iii) : soit le nombre d'arêtes bloquées est égal à 100% de δ , soit est égal à 50% de δ . Cela nous génère un total de six instances, nommées : pccB100 et pccB50 pour le schéma (i) ; pccNonB100 et pccNonB50 pour le schéma (ii) ; et mixt100 et mixt50 pour le schéma (iii). Varier les schémas de blocages nous permet de rendre compte des différents cas de figures pouvant apparaître lors d'un désastre et d'étudier les difficultés que pourraient rencontrer certains modèles sur certaines de ces configurations.

3.1 Analyse de l'horizon de temps T

Les différents modèles que nous avons étudiés sont tous soumis à une valeur T qui détermine le nombre d'unités de temps fixées dans le modèle pour effectuer les réparations de route. Dans l'article de (Sakuraba et al., 2016a), la valeur du T est fixée initialement à $T = \lceil R/Q \rceil$, où R est le nombre total d'unités de blocages et Q est le nombre de WTs. Cette valeur de T est très contraignant car c'est une borne inférieure pour le nombre de périodes.

Nous avons l'hypothèse que cette fixation de T aura des impacts et des effets négatifs pour l'optimisation. En effet, en imaginant que chaque WT peut travailler sur une route bloquée à chaque pas de temps, alors il faudra bien T unités de temps pour tout débloquent. Cependant, notre hypothèse est que l'optimisation d'un objectif précis peut entraîner des retards dans le déblocage global du réseau routier. Dans ce cas, allouer le temps total à sa borne inférieure peut entraîner un résultat non optimal pour la fonction objectif, qui pourrait être atteint en laissant une plage de temps plus importante. En plus de ces cas précis concernant l'optimisation d'un objectif, on peut également imaginer que la présence de goulots d'étranglement dans le graphe ne permettent pas d'obtenir une solution, pour la borne inférieure de T . Ce cas peut survenir si à un moment précis il n'y pas assez de routes disponibles pour que toutes les WTs travaillent (pas de chemins pour faire passer les WTs jusqu'aux routes à débloquent), et que la largeur des routes ne permet pas un travail groupé sur celles restantes.

Déterminer une valeur précise de T est une tâche difficile. On pourrait considérer la borne supérieure qui peut être obtenu lorsque une seule WT travaille pour tout débloquent. Dans ce cas, $T = R$. Cependant, utiliser la borne supérieur engendre une augmentation systémique du nombre de variables et de contraintes du modèle. Cela rend la résolution du problème très difficile par un logiciel de PLNE. Nous avons décidé de fixer la valeur de T à deux fois la borne inférieure afin d'étudier les possibles impacts sur les solutions, tout en conservant une quantité raisonnable de variables et de contraintes.

Pour évaluer cet impact, nous avons regardé plus précisément les résultats obtenus par le modèle de *Sum of completion time*. Cela parce qu'à priori, ce modèle présente l'intérêt à conserver un temps total de réparation bas et de finir un grand nombre de tâches rapidement. Ces deux intérêts peuvent entrer en contradiction lorsqu'une situation de goulot d'étranglement, comme celles citées précédemment, sont présentes.

Les analyses ont été réalisées en utilisant deux valeurs de T , l'une fixée à la borne inférieure et l'autre égal à deux fois la borne inférieure. Les Figures 2 et 3 illustrent les résultats obtenus pour l'une instance. La *Sum of completion time* est égal à 30 lorsque T est fixé à sa borne inférieure. Si l'on relâche un peu la valeur de T , la valeur de *Sum of completion time* est égal à 29. Il est possible d'apercevoir dans la Figure 3 que le travail des WTs reste concentré sur une seule route à la fois pour finalement dépasser la borne inférieure de $T = 10$. Le dépassement est causé parce que la largeur de la route 3-5 ne permet pas d'accueillir simultanément toutes les WTs pour la débloquent. Cet exemple confirme qu'un mauvais choix de la valeur de T peut empêcher de trouver la solution optimale pour une fonction objectif donnée, comme celle du modèle CT.

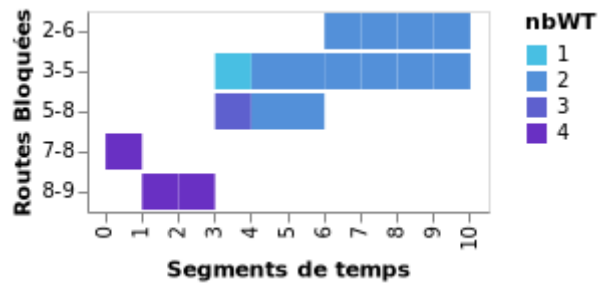


FIGURE 2 – Solution obtenue avec un $T = 10$ pour le modèle CT

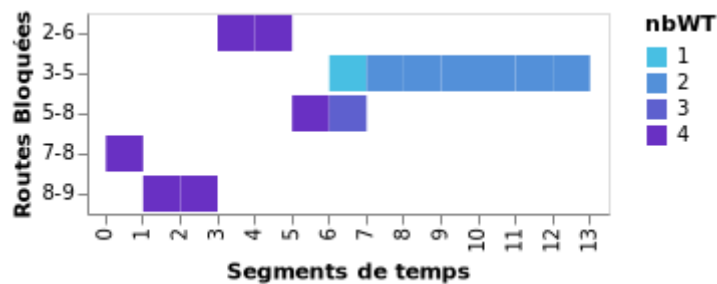


FIGURE 3 – Solution obtenue avec un $T = 20$ pour le modèle CT

3.2 Résultats pour les indicateurs de performances

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus pour les quatre modèles pour les indicateurs de qualité dans les Tableaux de 1 à 3.2. La première colonne indique le nom des instances. Puis, pour chaque modèle (PCC, MKS, CT et CG), les quatre indicateurs (A, RT, ST et iWT) sont fournis. Il est pertinent de souligner que pour le modèle PCC, le logiciel PLNE a prouvé l'optimalité seulement pour les instances à 10 sommets dans le Tableau 1. Dans les autres tableaux, les analyses ont été réalisées sur la meilleure solution entière trouvée après 2h de temps de calcul.

En observant les valeurs des indicateurs iWT, nous remarquons une différence de comportement entre les fonctions objectifs issues de la planification et celles venant de la conception de réseau. En effet, la valeur élevée de l'inactivité pour les modèles issus de la conception de réseau entraîne un temps plus long de réparation. Ce temps est obtenu car leur fonction objectif vise un point précis de l'état du graphe (accessibilité) sans tenir compte du temps de résolution total qui est élevé par l'augmentation du T . Le modèle PCC va donc optimiser l'accessibilité, sans se soucier de l'optimisation de T . Ce modèle utilise toute la plage de temps T , même si cela engendre un arrêt des WTs. La réduction de cette inactivité est donc un point important d'amélioration afin d'obtenir une solution plus proche d'une gestion réelle de crise, tout en conservant l'ajout de la plage de temps étendue. Le modèle CG présente globalement une performance inférieure, selon les critères proposés, au regard des autres modèles. Le fait qu'il cherche la connectivité globale du réseau ne garantit pas des valeurs intéressantes pour l'accessibilité (A).

Pour les modèles issus de la planification, nous observons des temps de réparation au niveau de la borne inférieure de T . En effet, ces modèles étant basés sur le temps, ils vont chercher à minimiser le temps d'inactivité des WTs, tout le long de la résolution, et pas uniquement avant d'atteindre un objectif précis. Nous remarquons également les bonnes performances du modèle de *Sum of completion time* sur l'aspect de l'accessibilité, bien que ce critère ne soit pas l'objectif

cible. Cela est dû à la quantité importante de chemins débloqués rapidement lors de la résolution, qui permet en moyenne une obtention plus rapide de l'accessibilité par rapport au modèle de *Makespan*. Concernant les solutions produites par le modèle *Makespan*, on note de nombreuses interruptions, c'est-à-dire, des WT's qui commencent à traiter une route et qui sont déplacés vers d'autres sans que le travail soit finalisé. Le *Makespan* ne cherchant à minimiser que la date finale, sans autres directives, cela entraîne la possibilité de nombreuses solutions interchangeables. C'est donc l'avantage du modèle de *Sum of completion time* qui durant toute la durée de résolution vient orienter la réparation sur des chemins précis et ceci jusqu'à la fin des réparations.

Ces expérimentations ont mis en lumière la nécessité de réaliser une optimisation en deux phases à partir d'un couplage entre les modèles de conception de réseau et de planification, notamment de *Makespan*. Le modèle de *Sum of completion time* étant déjà globalement plus robuste que les autres, il pourrait être un compromis pour fournir une solution de bonne qualité pour les aspects réseau et planification. Il y a plusieurs possibilités de traiter une optimisation en deux phases. Par exemple, par le biais d'une fixation de variables, ou encore une optimisation lexicographique. Dans le premier cas, nous avons testé la stratégie d'utiliser les modèles de conception de réseau pour la première optimisation car leur fonction objectif permet d'obtenir l'accessibilité pour l'un et le temps de la connexité pour l'autre. On sait que en dessous de ces temps l'ordonnancement est optimal. Ceux-ci peuvent être fixés pour les premières unités de temps. Puis par la suite, il est possible d'optimiser via la fonction objectif de *Makespan* ou de *Sum of completion time* pour réduire le temps total. Cela nous permet d'obtenir des solutions plus proches d'une utilisation réelle.

Indicateurs de qualités de l'instance sur différents modèles																
Instances	PCC				MKS				CT				CG			
	A	RT	ST	iWT	A	RT	ST	iWT	A	RT	ST	iWT	A	RT	ST	iWT
pccB100	6	19	83	36	10	10	67	0	9	10	47	0	18	19	115	36
pccB50	4	20	65	40	10	10	40	0	5	10	28	0	20	20	77	40
pccNonB100	1	20	132	40	1	10	74	0	1	10	46	0	1	20	87	40
pccNonB50	1	20	85	40	1	10	45	0	1	13	29	12	1	20	76	40
mixt100	5	20	115	40	10	10	68	0	10	10	47	0	10	20	98	40
mixt50	1	20	68	40	1	10	37	0	1	10	26	0	1	14	45	16

TABLE 1 – Résultats pour les instances avec 10 sommets et 20 arêtes

Indicateurs de qualités de l'instance sur différents modèles																
Instances	PCC				MKS				CT				CG			
	A	RT	ST	iWT	A	RT	ST	iWT	A	RT	ST	iWT	A	RT	ST	iWT
pccB100	10	19	66	36	10	10	47	0	7	11	40	4	20	20	100	40
pccB50	3	19	41	36	10	10	37	0	2	10	26	0	20	20	68	40
pccNonB100	1	20	90	40	1	10	45	0	1	10	40	0	1	20	103	40
pccNonB50	1	20	73	40	1	10	33	0	1	10	25	0	1	20	68	40
mixt100	4	18	71	32	10	10	63	0	9	11	41	4	17	20	105	40
mixt50	10	20	63	40	9	10	39	0	2	13	26	12	18	20	73	40

TABLE 2 – Instances avec 15 sommets et 30 arêtes

Indicateurs de qualités de l'instance sur différents modèles																
Instances	PCC				MKS				CT				CG			
	A	RT	ST	iWT	A	RT	ST	iWT	A	RT	ST	iWT	A	RT	ST	iWT
pccB100	11	20	114	40	8	10	91	0	10	10	52	0	15	20	120	40
pccB50	6	15	45	20	10	10	47	0	10	10	29	0	20	20	87	40
pccNonB100	1	20	135	40	1	10	91	0	1	10	52	0	1	20	140	40
pccNonB50	1	20	80	40	1	10	50	0	1	11	32	4	1	20	94	40
mixt100	2	19	96	36	9	10	86	0	5	12	52	8	18	20	146	40
mixt50	4	19	66	36	10	10	48	0	3	10	31	0	20	20	98	40

TABLE 3 – Instances avec 20 sommets et 40 arêtes

4. Conclusions

Ce travail d'analyse s'est organisé autour de la problématique suivante : comment évaluer de manière globale un problème comportant les aspects de deux domaines différents, la conception de réseau et l'ordonnancement. Le premier modèle proposé par Sakuraba et al. s'intéressait à l'aspect conception de réseau par le biais de sa fonction objectif basée sur les plus courts chemins. Nous avons pu observer que sur une approche cherchant à obtenir un état spécifique du réseau, ici l'accessibilité, nous obtenons un point stable dans la progression quand cet état est atteint. Ce phénomène apparaissant avant la réparation complète du réseau routier, cela entraîne toute une période de la résolution où nous n'avons pas de mesures et de leviers sur l'ordre des réparations qui s'effectue.

Pour résoudre ce problème nous avons étudié plusieurs fonctions objectifs issues de l'ordonnancement (Makespan, Sum of Completion Time) ou de la conception de réseau (Connexité), afin de prendre en compte des aspects du problème que le premier modèle ne mesurait pas. Durant nos expérimentations et nos comparaisons de solutions, nous avons pu observer que le modèle de Sum of Completion Time donne des résultats plus intéressants. En effet, en prenant en compte le temps de fin de réparation de chaque route, nous avons une solution qui permet de réduire le temps total, tout en offrant un ordonnancement qui améliore de façon efficace l'état du réseau. Les deux autres modèles permettent toutefois d'obtenir des bornes pour le Makespan, ou une autre approche de secours à la population dans un contexte particulier avec la Connexité Globale. Notre travail propose également une analyse du nombre de périodes T laissé au modèle pour sa résolution car cet aspect était peu documenté dans l'article initial. Nous avons pu observer qu'augmenter ce nombre de périodes permettait d'améliorer la valeur de certaines fonctions objectifs. Cependant, cela impacte la qualité des fonctions objectifs de conception de réseau sur les indicateurs d'inactivité des Work-Troops et de temps total de réparation.

En perspectives de ce travail, nous insistons sur l'intérêt d'effectuer une optimisation en deux phases afin de coupler différents modèles entre eux, pour diminuer leur points faibles et d'obtenir des ordonnancements plus proches d'une gestion réelle. Cette optimisation en deux phases pourrait tirer partie de la spécificité des modèles de conception de réseau en utilisant la date d'obtention de leur point stable. On pourrait ainsi conserver cette partie de l'ordonnancement, et par la suite optimiser sur un autre critère les tâches restantes.

Références

- Allahverdi, A. (2016). A survey of scheduling problems with no-wait in process. *European Journal of Operational Research*, 255(3) :665–686.
- Barbalho, T. J., Santos, A. C., and Aloise, D. J. Metaheuristics for the work-troops scheduling problem. *International Transactions in Operational Research*, In press(n/a).
- EM-DAT (Accessed on December 3th, 2019). International disaster database. <http://www.emdat.be/publications>.
- Feng, C.-M. and Wang, T.-C. (2003). Highway emergency rehabilitation scheduling in post-earthquake 72 hours. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5(1).
- Sakuraba, C. S., Santos, A. C., and Prins, C. (2016a). Work-troop scheduling for road network accessibility after a major earthquake. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 52 :317 – 324.
- Sakuraba, C. S., Santos, A. C., Prins, C., Bouillot, L., Durand, A., and Allenbach, B. (2016b). Road network emergency accessibility planning after a major earthquake. *EURO Journal on Computational Optimization*, 4(3) :381–402.
- Santos, A. C., Duhamel, C., and Andrade, R. (2016). *Trees and Forests*, pages 1–27. Springer International Publishing.

Biographie des auteurs



Felix Combaud est un étudiant en Master Optimisation et Recherche Opérationnelle à l'UFR de Sciences et Techniques de Nantes. Dans le cadre de sa validation de Master, il effectue un stage sur le thème de la Logistique Humanitaire supervisé par Andréa Santos au LITIS.



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 transformations 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 entretient 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.

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

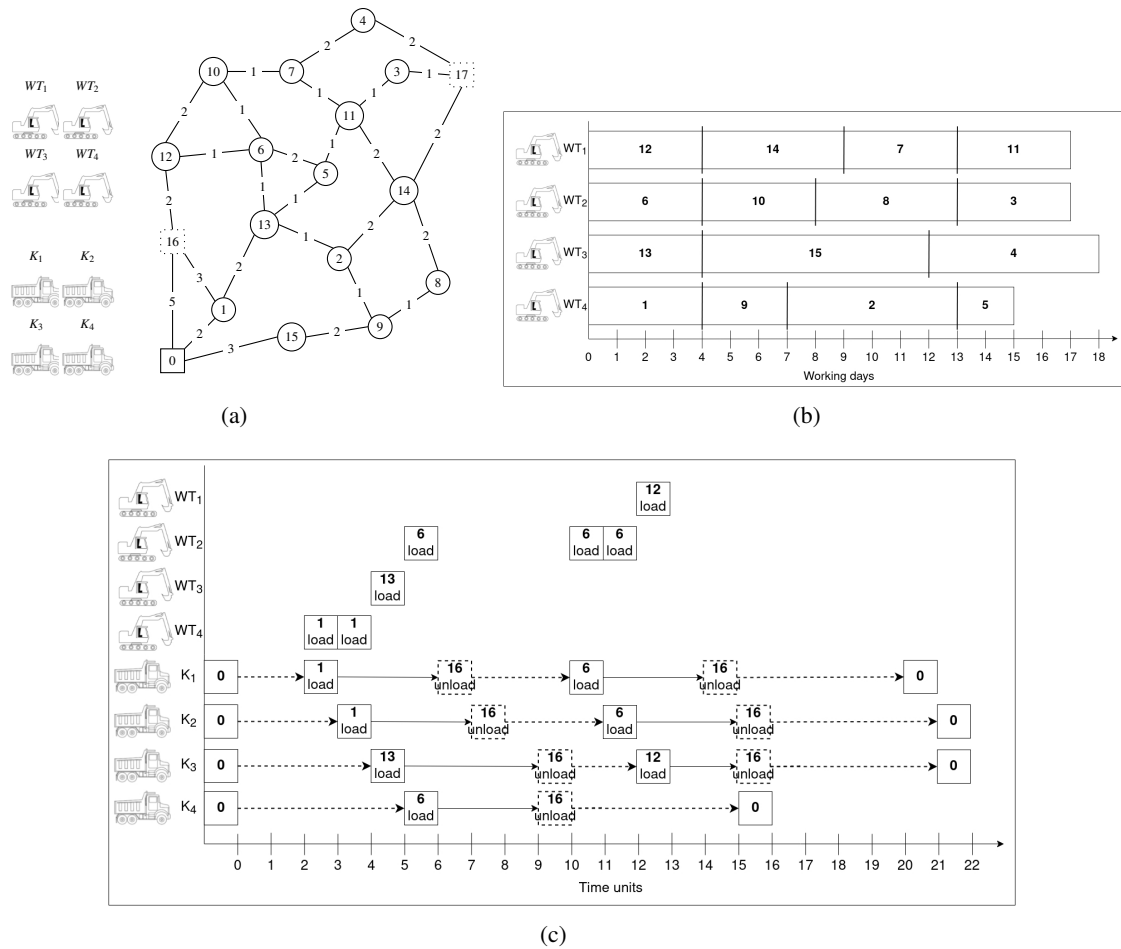


FIGURE 1 – Exemple pour le SRP-CD avec (a) le graphe et la flotte, (b) la planification des WTs et (c) les tournées de camions pour la première journée de travail.

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 entretient 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.



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



Quai Frissard
76600 Le Havre



Quai Frissard BP 1123
76063 Le Havre cedex France