



HAL
open science

Méthodes approchées pour le problème de planification du nettoyage de débris dans des réseaux urbains

Thiago Jobson Barbalho, Andréa Cynthia Santos, Dario José Aloise

► To cite this version:

Thiago Jobson Barbalho, Andréa Cynthia Santos, Dario José Aloise. Méthodes approchées pour le problème de planification du nettoyage de débris dans des réseaux urbains. Cahiers de la logistique, 2021, Optimisation des opérations de déblaiement suite aux catastrophes en milieu urbain, 2, p. 1-11. hal-03355337

HAL Id: hal-03355337

<https://hal.science/hal-03355337v1>

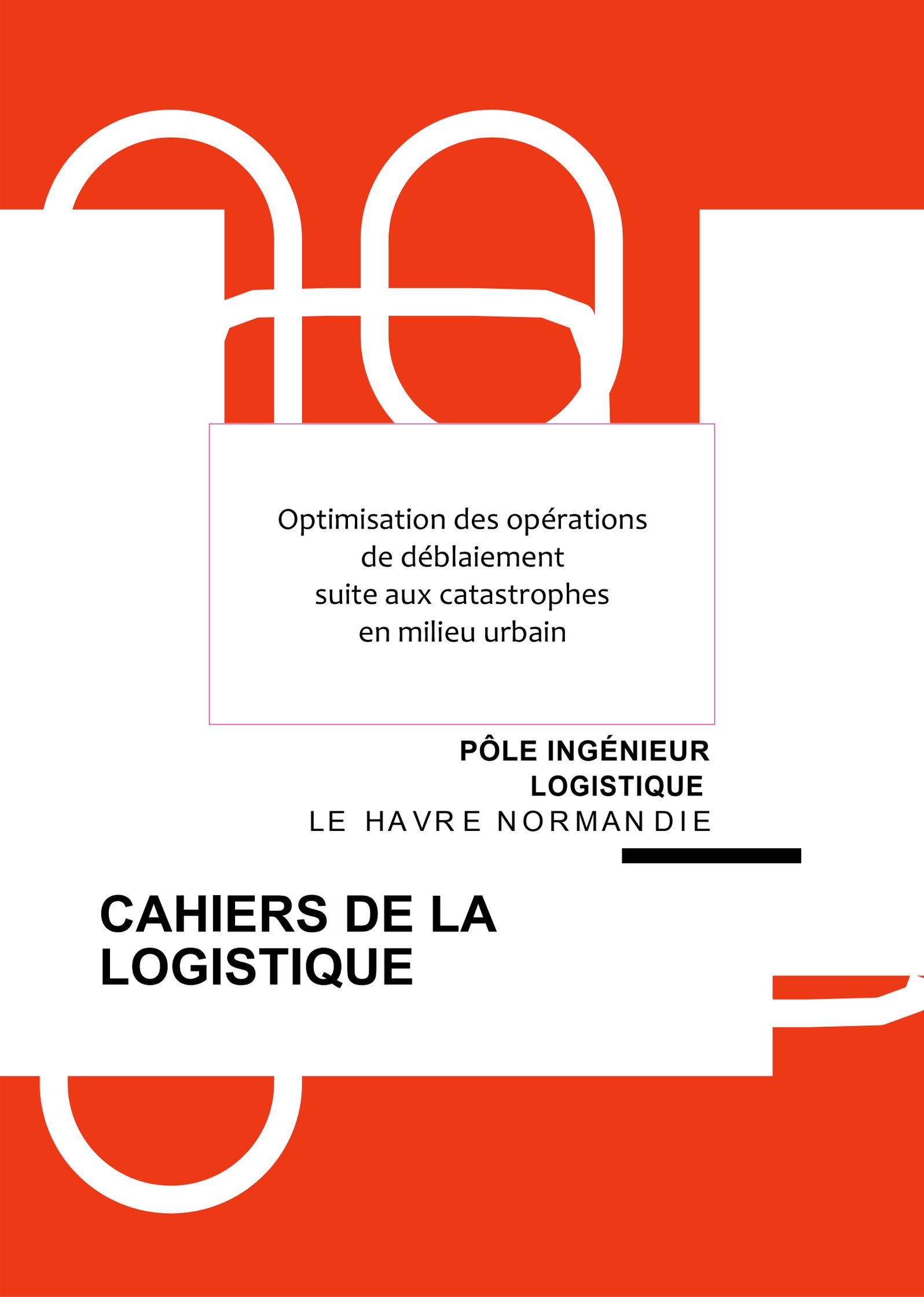
Submitted on 27 Sep 2021

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.

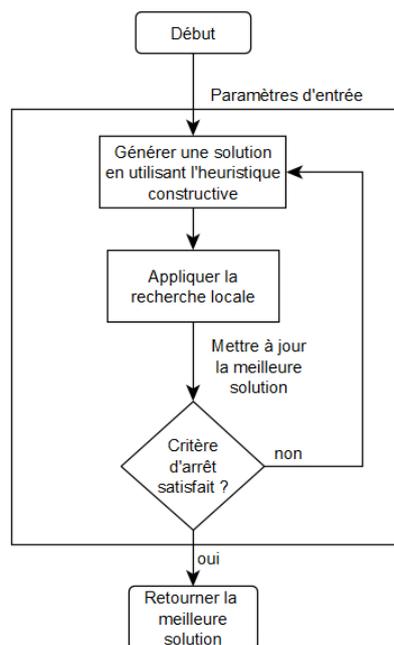


FIGURE 1 – Schéma de l'algorithme GRASP.

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.

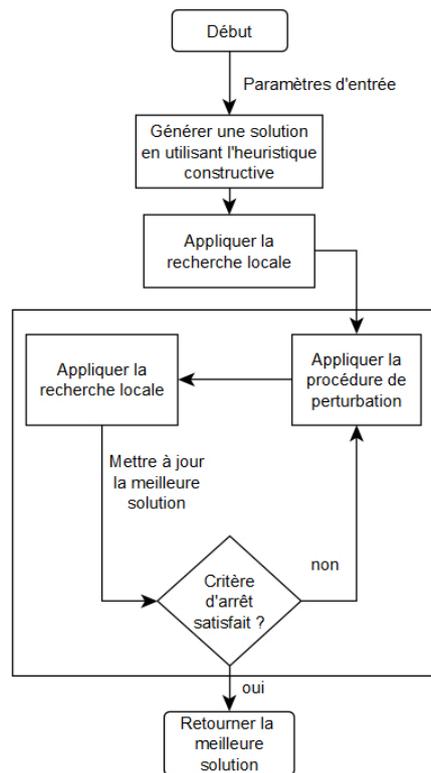


FIGURE 2 – Schéma de l’algorithme l’ILS.

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

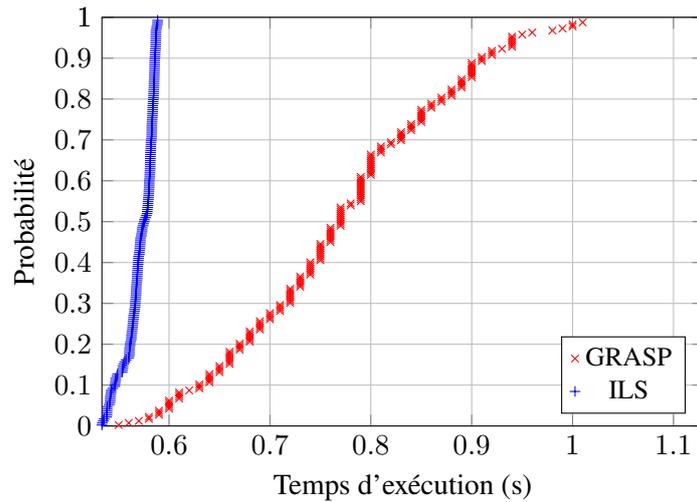


FIGURE 3 – TTTPlot pour une instance de le problème.

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

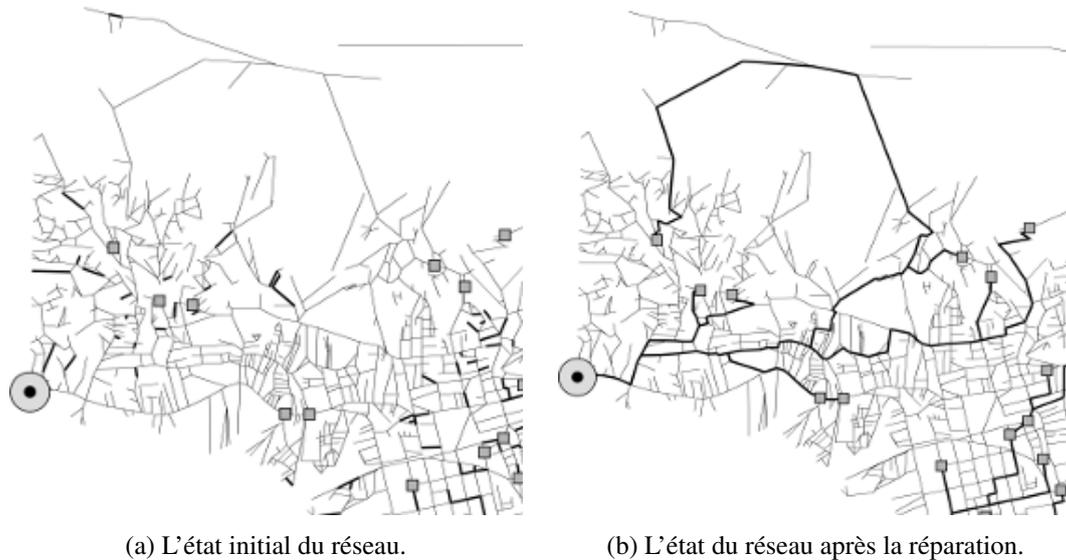


FIGURE 4 – Port-au-prince avant et après la réparation du réseau.

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.