



HAL
open science

Étude de fonctions objectifs pour le problème de planification du nettoyage de débris dans des réseaux urbains

Felix Combaud, Andréa Cynthia Santos

► **To cite this version:**

Felix Combaud, Andréa Cynthia Santos. Étude de fonctions objectifs 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. 12-23. hal-03355542

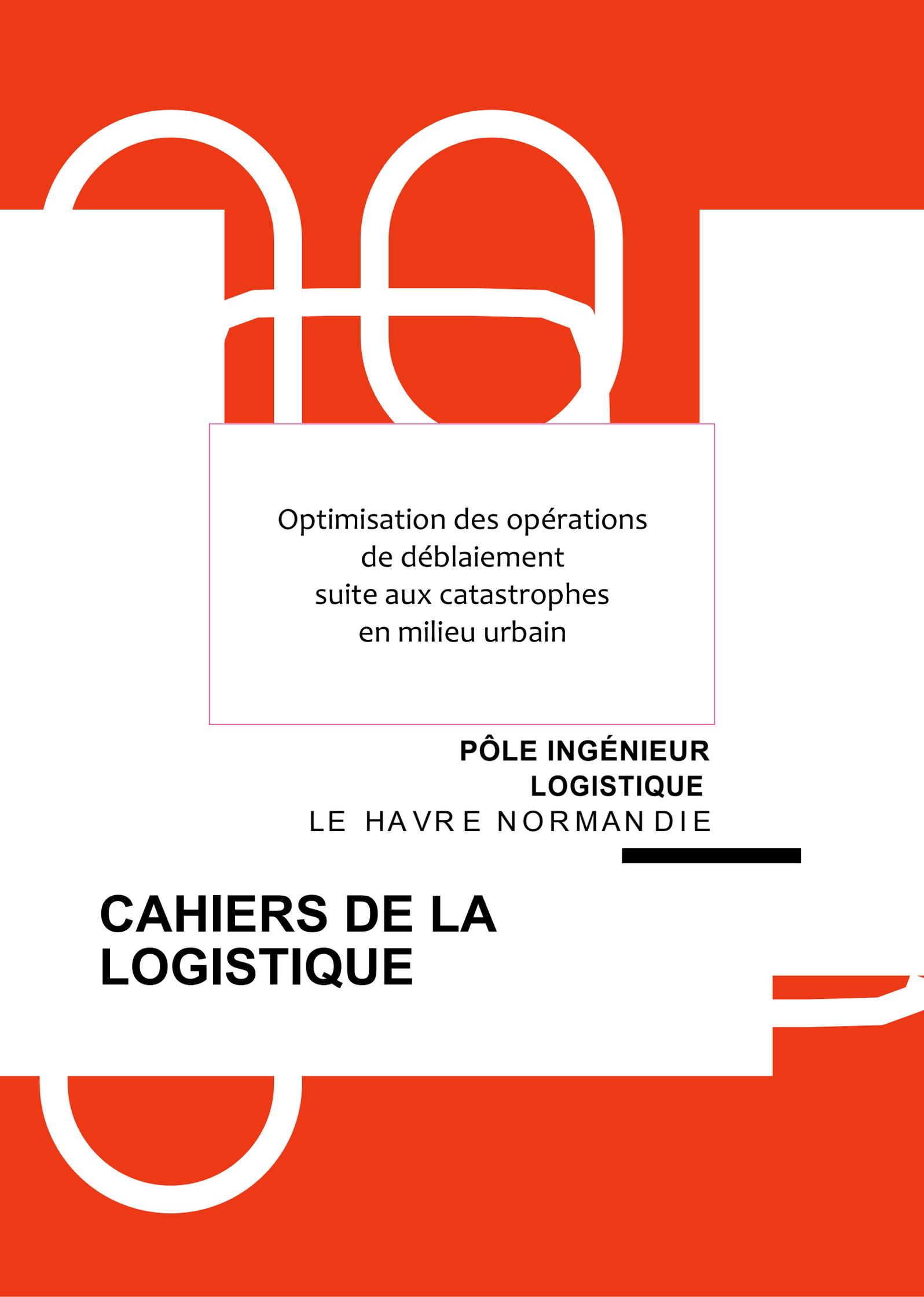
HAL Id: hal-03355542

<https://hal.science/hal-03355542>

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.



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

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).

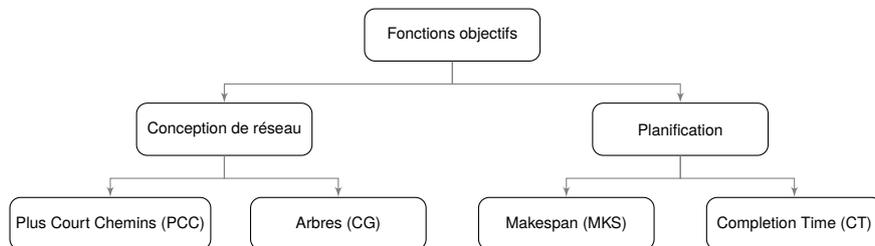


FIGURE 1 – Vision des fonctions objectifs qui peuvent être utilisées dans le modèle intégré WSP.

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 débloquentées.

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'ordonnement 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'ordonnement, 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 débloquer. 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 débayer), 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 débloquer. 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 relaxe 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 débloquée. 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.

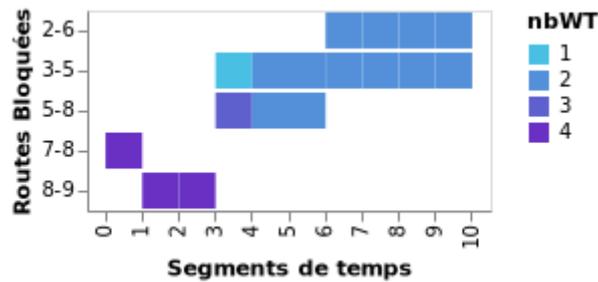


FIGURE 2 – Solution obtenue avec un $T = 10$ pour le modèle CT

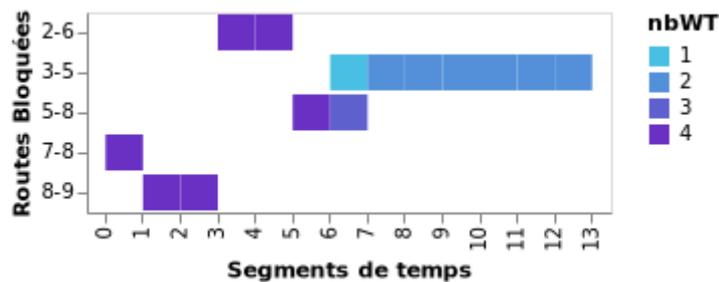


FIGURE 3 – Solution obtenue avec un $T = 20$ pour le modèle CT

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.