

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

LA P -MÉDIANE HUMANITAIRE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCE DE LA GESTION

PAR

JEAN-JOËL LALANNE

JUIN 2012

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements vont à mes deux directeurs de recherche, Jean-Marie Bourjolly et Gilbert Laporte. Leur support, leur expérience et leur intérêt pour ce sujet d'actualité ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.

Je tiens à remercier particulièrement Marta Pascoal pour son programme en C et son aide, Serge Bisailon pour son aide considérable en CPLEX et le professeur Bahar Yetis Kara pour ses données sur le réseau turc.

Je tiens également à remercier le personnel de soutien du département management technologique de l'UQAM et du CIRRELT car leur support logistique et technique a été impeccable. Merci à Merhan Ebrahimi (son support et son aide occupent une place importante durant toute ma maîtrise), Julie Beaulieu, Marie-Hélène Proulx, France Grenier, Josée Vignola, Daniel Charbonneau, Luc Rocheleau et Lucie-Nathalie Cournoyer.

Finalement, un merci tout spécial à ma famille et à mes amis (Anne Couturier, Audrée - Sylvain - Alex et Ariane Vaillancourt, Ouassima Touharia, Aïcha Leila, Jessika Delar, Gregory Rix et Alcin Hubert) qui m'ont soutenu et ont toujours cru en ma capacité de mener cette entreprise à terme. Merci pour votre écoute, vos encouragements et vos précieux conseils!

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	vi
RÉSUMÉ	vii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 La localisation d'entrepôts	5
1.2 La localisation dynamique d'entrepôts	8
1.3 La localisation dans un réseau stochastique	9
1.4 La fiabilité des entrepôts	11
1.5 La couverture d'un réseau	12
1.6 Exemples de localisation suite à une catastrophe humanitaire	13
1.7 Conclusion	14
CHAPITRE II	
MÉTHODOLOGIE	16
2.1 Présentation du problème	16
2.2 Présentation des modèles	17
2.2.1 Le problème de la p -médiane (PPM) classique	17
2.2.2 Le problème de la p -médiane humanitaire (PPMH)	18
2.2.3 Première variante du PPMH	19
2.2.4 Deuxième variante du PPMH	20
2.3 Présentation des algorithmes (construction de la matrice H)	21
2.4 Les méthodes employées pour résoudre les modèles	25
CHAPITRE III	
EXPÉRIENCES NUMÉRIQUES	27
3.1 Le cas humanitaire	28
3.1.1 Exemple 1	28

3.1.2 Exemple 2	35
3.2 La première variante du modèle humanitaire	43
3.2.1 Données d'ORLIB	43
3.2.2 Le réseau turc	45
3.3 La deuxième variante du modèle humanitaire	50
3.3.1 Données du problème de la p -mediane provenant d'ORLIB	50
3.3.2 Le réseau turc	51
CONCLUSION	55
RÉFÉRENCES	57

LISTE DES FIGURES

Figures	Page
Figure 3.1 : Réseau 1 de base	29
Figure 3.2 : Réseau 1 avec H	34
Figure 3.3 : Réseau 2 de base	35
Figure 3.4 : Réseau 4 avec H	39
Figure 3.5 : Réseau 2 : solution	41
Figure 3.6 : Solution du réseau turc pour $c = 1$ et $p = 50$	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux		Page
Tableau 3.1 :	Représentation “forward star” du réseau 1	31
Tableau 3.2 :	Représentation “reverse star” du réseau 1	32
Tableau 3.3 :	Solution pour le réseau 2	40
Tableau 3.4 :	Variation de la solution optimale par rapport à c	44
Tableau 3.5 :	Turquie : variation de p et so lorsque $c = 1$ par rapport au PGU . .	45
Tableau 3.6 :	Turquie : variation de p et so lorsque $c = 2$ par rapport au PGU . .	46
Tableau 3.7 :	Turquie : variation de so pour un p fixé lorsque $c = 1$	47
Tableau 3.8 :	Turquie : variation de so pour un p fixé lorsque $c = 2$	47
Tableau 3.9 :	Turquie : variation de la solution optimale par rapport à p et c . . .	49
Tableau 3.10 :	pmed1 : variation de la solution optimale par rapport à p et s	50
Tableau 3.11 :	pmed10 : variation de la solution optimale par rapport à p et s . . .	51
Tableau 3.12 :	Turquie : variation de s pour $p = 20$	52
Tableau 3.13 :	Turquie : variation de la solution optimale par rapport à p et s . . .	54

RÉSUMÉ

Dans ce mémoire, nous présentons plusieurs variantes du problème de la p -médiane (PPM) classique. Le PPM classique est un problème de localisation-partitionnement. Il consiste à localiser p entrepôts parmi n groupes d'utilisateurs (p et n entiers avec $p \leq n$), de sorte que si l'on rattache chaque groupe d'utilisateurs à son entrepôt le plus proche, la somme totale des distances des groupes d'utilisateurs à leur entrepôt soit minimale. Les entrepôts ne peuvent être placés qu'aux emplacements des groupes d'utilisateurs.

Suite à une catastrophe humanitaire (ou naturel) provoquée, par exemple, par un séisme ou un ouragan, de nombreuses infrastructures du pays touché sont détruites. Nous nous intéressons au problème de localisation d'entrepôts destinés à l'organisation d'interventions en prévision de telles catastrophes. Le but est de permettre que les groupes d'utilisateurs (ou de victimes) aient une grande probabilité de recevoir les soins et besoins vitaux nécessaires assez rapidement tout en respectant le budget disponible pour l'aide humanitaire. Le modèle du PPM classique n'est pas adapté à ce type de problème puisqu'il ne tient pas compte des infrastructures qui risquent d'être détruites lors d'un désastre naturel. Ainsi, les solutions qu'il produit ne pourront pas être intégrées dans les décisions logistiques de prépositionnement de dépôts et de matériel d'intervention et de support à la population (ou groupes d'utilisateurs).

Dans cette étude, nous tenterons de trouver des solutions à ce type de problème en proposant des variantes du PPM dites "humanitaires" qui prendront en compte de nouvelles contraintes et la probabilité de survie de certaines infrastructures face à un séisme. Un paramètre important, la matrice des distances d'accès, sera modifiée en conséquence. L'objectif est de minimiser la distance d'accès totale tout en respectant le budget disponible. Nous présentons des modèles linéaires utilisant des variables binaires. Des expériences numériques sont effectuées, à l'aide du logiciel d'optimisation CPLEX, sur des réseaux expérimentaux et un réseau réel. Les résultats obtenus nous montrent comment varie la distance d'accès totale en fonction du nombre d'entrepôts que l'on souhaite localiser et certains autres paramètres. Ainsi, ayant conscience de l'impact des variantes étudiées, le gestionnaire prendra de meilleures décisions de localisation d'entrepôts en prévision d'une catastrophe de ce type.

Mots-clés : Problème de la p -médiane classique (PPM), problème de la p -médiane humanitaire (PPMH), prépositionnement d'entrepôts, catastrophe humanitaire, séisme, aide humanitaire, probabilité de survie d'infrastructures, matrice des distances d'accès.

INTRODUCTION

Depuis plus d'une dizaine d'années, nous constatons une augmentation des activités sismiques à travers le monde. Faisons le point sur certains des séismes les plus récents. Le 26 décembre 2004, au nord-ouest de l'île de Sumatra en Indonésie, un séisme de magnitude 9 s'est produit. C'est la plus puissante jamais enregistrée dans cette zone depuis 100 ans. Il a provoqué un tsunami qui a frappé l'Indonésie, le Sri Lanka, le sud de l'Inde et l'ouest de la Thaïlande. Le bilan en pertes humaines est d'environ 280 000 morts [1]. Face à l'ampleur de cette catastrophe, le plus grand effort d'aide humanitaire a été réalisé qui s'élève à plus de 4 milliards de dollars [2].

Le 8 octobre 2005, au Cachemire pakistanais, près de la frontière entre l'Inde et le Pakistan, un séisme de magnitude 7,6 est survenu. Ce séisme est le dernier des grands séismes himalayens qui ont affecté la chaîne depuis 100 ans (1905 Kangra, 1934 Bihar, 1950 Assam) [3]. Les pertes humaines s'élèvent à plus de 73 000 morts et 69 000 blessés. Les voies de transport sont très endommagées (dommages estimés à environ 5 milliards de dollars américains) ce qui rend l'accès à la population très difficile. L'aide humanitaire a répondu présent en fournissant des vivres (PAM : Programme alimentaire mondial), des hommes et une aide financière conséquente [4].

Le 12 mai 2008, un séisme d'une magnitude 8 sur l'échelle de Richter a été enregistré dans la province du Sichuan en Chine. Le bilan de cette catastrophe est de 69 197 morts, près de 2000 enfants orphelins, environ 380 000 blessés et des millions de sans-abris. Les infrastructures sont très touchées notamment les écoles. Face à ce désastre, le gouvernement chinois a réagi de manière remarquable en mettant en place des abris temporaires, en distribuant des denrées alimentaires aux sans-abris et en offrant des soins médicaux à la charge du gouvernement. Néanmoins, l'ampleur des dégâts les obligera à accepter rapidement l'aide internationale [5].

Le 12 janvier 2010 à 16h56 heure locale, c'est au tour d'Haïti d'être touché par un

séisme d'une magnitude de 7 à 7.3 sur l'échelle de Richter. Plusieurs secousses secondaires, depuis le choc majeur, certaines approchant la magnitude 6 ont été enregistrées susceptibles de provoquer de nouveaux dégâts [6]. Dans ce pays considéré comme l'un des plus pauvres au monde, le bilan est d'environ 230 000 morts, 300 000 blessés et 1.2 million de sans-abris [7]. De nombreux bâtiments ont été détruits dont ceux de l'État haïtien, tel que le palais national, plusieurs ministères, le parlement, des églises, etc. La Croix-Rouge, la France, les États-Unis et le Canada ont réagi rapidement en déployant des aides conséquentes [8].

Plus récemment, le 11 mars 2011, un tremblement de terre de magnitude 9 est survenu au large de Sendai (Nord-Est de l'île de Honshu, Japon) [9]. Il a engendré un tsunami dont les vagues ont atteint plus de 10 mètres de haut par endroits [10]. Le bilan est de 10 804 morts, 16 244 disparus, près de 200 000 foyers privés d'électricité, environ 177 500 réfugiés en situation critique (dont 600 suites à l'incendie d'une centrale nucléaire d'Onagawa [10]) et jusqu'à 216 milliards de dollars de dégâts. Le Japon a réagi de manière remarquable pour faire face à ce désastre, il a versé 55 milliards de yens (480 millions d'euros) aux banques situées au Nord-Est [11].

Les pays touchés par ces catastrophes ont besoin d'une aide humanitaire internationale urgente. Dans la majorité des cas, des épidémies apparaissent dues aux conditions d'hygiène et d'humidité. La destruction des routes et d'autres infrastructures rend difficile l'accès à certaines zones sinistrées. De manière générale, l'aide internationale doit identifier et enterrer rapidement les victimes avant qu'elles ne causent des problèmes de santé majeurs, déployer des dispositifs d'assistance et de personnels médicaux afin d'aider les hôpitaux, construire des abris temporaires, fournir des vivres (notamment la distribution d'eau potable, de nourriture et de vêtements) et enfin, protéger les gens les plus touchés. Tout ceci nécessite une lourde organisation logistique et la localisation d'entrepôts pour le matériel d'urgence.

Nous nous intéressons au problème de localisation d'entrepôts destinés à l'organisation d'interventions en prévision à de telles catastrophes. Le budget des organisations internationales (ex : Croix-Rouge, CARE), disponible pour l'aide humanitaire, étant li-

mité et les infrastructures endommagées, le gestionnaire (ou chef de projet) ne peut pas penser à la solution utopique de localiser des entrepôts près de chaque groupe d'usagers. Le défi est donc de pouvoir localiser des entrepôts qui permettent aux groupes d'usagers d'avoir une forte probabilité de recevoir les soins et besoins vitaux nécessaires assez rapidement tout en respectant le budget. C'est à ce niveau que se situe notre travail où l'on souhaite aider le gestionnaire dans ces prises de décisions logistiques liées à la localisation des entrepôts. Ces localisations auront plusieurs impacts dont celui du nombre d'usagers qui pourront recevoir de l'aide. Ce travail se rapproche d'un problème de déploiement des véhicules ambulanciers où l'on cherche à déterminer les différents points d'attente à utiliser pour la localisation des véhicules entre deux affectations. En effet, les services préhospitaliers d'urgence (SPU) sont confrontés à des demandes de services incertaines où plusieurs paramètres varient, dont la localisation, la fréquence, l'heure, la journée et la semaine. De plus, ils doivent respecter un temps de réponse entre le temps de réception de l'appel et l'arrivée du véhicule sur le site afin de ne pas mettre davantage à risque la survie du patient. Le type de services d'urgence qui se rapproche le plus de notre problème est celui où les serveurs sont fixes [12].

Notre étude sera basée sur le problème de la p -médiane classique qui nous permet de localiser des entrepôts tout en minimisant la distance d'accès totale. La matrice des distances d'accès sera modifiée en tenant compte des exigences d'une catastrophe telle qu'un séisme. Parmi ces exigences, citons par exemple, le temps d'accès entre deux groupes d'usagers qui ne devra pas dépasser une certaine limite, car dans le cas contraire certains usagers ne pourront pas recevoir l'aide à temps, ou, les arcs reliant deux groupes d'usagers qui devront avoir une certaine probabilité de survie face au séisme afin d'être considérés dans la solution.

Ainsi, nous allons, après avoir fait une revue de la littérature, présenter le modèle du problème que nous considérons et des variantes. Par la suite, plusieurs expériences numériques basées sur des scénarios seront effectuées auxquels seront associés des coûts, ce qui aidera le gestionnaire dans ces décisions logistiques de localisation d'entrepôts de matériel d'intervention et de support à la population. Et enfin, nous concluons en

énonçant les apports de ce travail dans le domaine de la logistique humanitaire et la gestion des opérations, ses limites et des pistes pour quelques travaux futurs.

CHAPITRE I

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Les travaux en logistique humanitaire ont subi une forte croissance il y a environ une dizaine d'années. Comme nous le verrons, un bon nombre de ces travaux abordent des problématiques relatives aux moyens préventifs et aux réponses face à des catastrophes humanitaires. Dans ce travail, nous cherchons des endroits fiables afin d'y placer des entrepôts en prévision de catastrophes humanitaires telles qu'un séisme et pour que les groupes d'utilisateurs puissent recevoir de l'aide assez rapidement tout en respectant le budget réservé pour ces opérations de secours. Dans la littérature, de nombreux travaux sur des sujets connexes ont été effectués. Parmi ces sujets, nous accorderons une attention particulière à : la localisation d'entrepôts, la localisation dynamique d'entrepôts, la localisation dans un réseau stochastique, la fiabilité des entrepôts, la notion de couverture d'un réseau et des exemples de localisation à la suite d'une catastrophe humanitaire. Nous distinguerons les contributions générales de ceux traitant de problématiques proches des nôtres.

1.1 La localisation d'entrepôts

Les articles [19], [22], [28] abordent des aspects généraux de la localisation d'entrepôts. Un portrait des problèmes de localisation dans la recherche est dressé en 1989 par Brandeau et Chiu [19]. La théorie de la localisation avait été introduite en 1909 par Weber qui a localisé un entrepôt pour minimiser le temps de trajet total entre l'entrepôt et un ensemble de clients. Mais c'est en 1964 qu'Hakimi a généralisé le problème en

considérant la localisation d'un ou plusieurs entrepôts dans un réseau en minimisant la somme des distances ou en maximisant la distance entre les entrepôts et des points du réseau. À partir de ce moment, la recherche en théorie de la localisation s'est fortement accrue. Les modèles de localisation ont un vaste champ d'application (exemple : le marketing), ils peuvent être intégrés à d'autres modèles (exemple : la théorie des jeux) et les fonctions objectifs deviennent de plus en plus réalistes. Par conséquent, des classes de problème, des modèles et des algorithmes ont été décrits. Les deux principales techniques de résolution des problèmes de localisation sont l'approche exacte et l'approche heuristique.

En 1998, les stratégies de localisation d'entrepôts sont résumées par Owen et Daskin [22]. Ces auteurs choisissent de faire le point sur les publications qui proposent des modèles et des approches de solutions appliquées à de nombreuses industries. Les problèmes dynamiques (difficultés liées au choix du moment) et stochastiques (exprimer l'incertitude à travers les paramètres ou dans la planification de scénarios) sont considérés. Des progrès dans la recherche et la technologie ont augmenté la capacité à faire face à des problèmes réels de ce type. Mais des améliorations sont attendues dans les méthodes heuristiques et le développement de modèles flexibles qui peuvent considérer autant les approches dynamiques que stochastiques dans la localisation d'entrepôts.

En 2009, la localisation d'entrepôts en présence de perte totale ou partielle d'information est analysée par Berman, Krass et Menezes [28]. Le problème consiste à localiser un nombre d'entrepôts qui seront par la suite sujets à des instabilités dont on ignore l'origine. Le client doit chercher un entrepôt opérationnel en se rendant, à chaque fois, au plus proche entrepôt non visité. Les auteurs créent un modèle basé sur le problème de la p -médiane nommé "Problème de la médiane en présence d'entrepôts non fiables avec des informations incomplètes" ("Median Problem with Unreliable Facilities and Incomplete Information" (MPUF-II)). Ils font les deux hypothèses suivantes : les probabilités de survie des entrepôts sont indépendantes et de même valeur. En utilisant leurs propres méthodes heuristiques, ils ont pu donner des conseils, basés sur des calculs numériques, sur la manière de gérer les opérations. Cet article ouvre un vaste champ d'opportunité pour de futurs sujets de recherche tels que le comportement de recherche

du client, le modèle multiobjectif ou la capacité et la colocation.

Les articles [20], [27], [29] et [40] traitent de problématiques qui se rapprochent du nôtre. En 1990, pour des situations d'urgence qui nécessitent plusieurs unités de réponses, des modèles de recouvrement-localisation sont développés par Batta et Mannur [20]. L'exemple qui les a motivés est celui où des incendies nécessiteraient les services de plusieurs camions de pompier. Ils ont examiné des modèles basés sur le problème de recouvrement par localisation d'ensembles (the location set covering problem) et le problème de recouvrement maximal (the maximal covering problem) dans le contexte où plusieurs unités sont nécessaires pour certaines demandes. Diverses exigences de recouvrement sont analysées par rapport au nombre d'unités nécessaire pour une demande. Leur modèle peut aussi être utilisé pour le déploiement d'ambulances dans un environnement urbain. Après calcul, les solutions qu'ils obtiennent sont à 94 pour cent de la couverture maximale.

Dans leur article Balcik et Beamon (2008) [27] montrent comment déterminer l'emplacement et la quantité de denrées humanitaires nécessaire en réponse à un désastre local qui survient rapidement. Cette étude va aider à prendre des décisions de prélocalisation. Néanmoins, les auteurs soulignent que les décisions de prélocalisation peuvent être très coûteuses bien qu'elles accélèrent la mobilisation et la livraison de l'aide. Leur modèle est une variante du modèle de localisation avec couverture maximale (the maximal covering location model). Les applications numériques montrent un lien entre le temps de réponse, le pourcentage de demandes satisfaites et les fonds pré- ou postcatastrophe nécessaires.

En 2010, le problème de la localisation d'entrepôts de secours en vue d'un éventuel séisme sur la ville d'Istanbul est étudié par Gömez, Köksalan et Salman [29]. La municipalité souhaite obtenir des informations sur l'organisation avant le séisme et des réponses après. En tenant compte de ces demandes, les auteurs ont décomposé le problème suivant deux niveaux : des emplacements locaux où seront stockés les équipements de secours avant le séisme et des emplacements en région qui organiseront la distribution aux usagers après le séisme. Leur solution est composée d'emplacements existants, mais aussi

nouveaux, surtout en région. Ils poursuivent deux objectifs : premièrement, minimiser la distance entre des lieux qui seront touchés par le séisme et les emplacements pour les entrepôts ; deuxièmement, localiser un nombre minimum d'entrepôts respectant des distances limites et des critères de secours pour faire face aux vulnérabilités régionales. Plusieurs scénarios et modèles ont été testés au regard de ces deux objectifs. À la suite d'applications numériques, les auteurs observent que très peu d'entrepôts devront être localisés et que les emplacements qu'ils proposent sont robustes par rapport aux variations de certains paramètres et modèles.

En 2011, le stockage de matériel d'urgence en prévision d'une catastrophe humanitaire pour l'organisation CARE internationale est traité par un groupe de trois chercheurs de l'institut de technologie de Georgia : Duran, Gutierrez et Keskinocak [40]. CARE est une des plus grandes organisations internationales d'aide humanitaire. Les chercheurs veulent évaluer l'effet du stockage stratégique de matériel d'urgence à travers le monde en prévision d'une catastrophe humanitaire sur le temps de réponse total. Le stockage permet d'éliminer le temps d'approvisionnement. De plus, les matériaux d'urgence peuvent être localisés près d'une zone de forte demande potentielle et des arrangements pour le transport peuvent être réalisés à l'avance. Un modèle linéaire mixte en nombre entier est développé. Ce dernier fournit, à partir d'un ensemble d'entrepôts et un inventaire des matériaux d'urgence disponibles, les entrepôts à choisir et les matériaux d'urgence à y stocker tout en minimisant le temps de réponse totale. En complément de la stratégie d'approvisionnement directe des fournisseurs, le stockage permet de gagner en efficacité au niveau de l'approvisionnement et de diminuer le temps de réponse total. Les résultats ont permis aux gestionnaires de CARE de stocker des articles dans trois pays du monde (Dubai en 2008, Panama et Cambodge en 2009).

1.2 La localisation dynamique d'entrepôts

L'article [13] aborde un aspect d'ordre général de la localisation dynamique d'entrepôts. En 1973, la localisation dynamique d'un entrepôt sur un horizon de r -périodes qui permet des délocalisations est étudiée par Wesolowsky [13]. La localisation statique d'un

entrepôt a fait ses preuves dans beaucoup de domaines tels que l'économie et la recherche opérationnelle. Cependant, après un certain temps, les demandes et les prix de livraison changent. Dans ses modèles, Wesolowsky tente de prédire ces changements afin de limiter les coûts liés à la délocalisation. Wesolowsky développe des modèles sans contraintes pour localiser un entrepôt. Ces modèles peuvent être appliqués dans divers cas tels que pour minimiser les dépenses. Ils sont basés sur les distances euclidiennes et rectangulaires.

La problématique de l'article [21] se rapproche du nôtre. En 1997, la localisation dynamique d'entrepôts en présence d'un nombre aléatoire d'entrepôts a été étudiée par Current, Ratick et ReVelle [21]. Les décisions, qui en découlent des modèles de localisation d'entrepôts, s'étalent sur une longue période vu le coût lié à ces investissements. Néanmoins, certains paramètres (prix, demande) changent au cours du temps. En tenant compte de ceci, les auteurs considèrent le cas où le nombre d'entrepôts à localiser est aléatoire. Ils utilisent les deux critères de décisions suivant : la minimisation des pertes due à des prévisions de changement et la minimisation de la perte maximale. Plusieurs modélisations sont proposées pour ces critères, chacune possédant ses avantages et inconvénients.

1.3 La localisation dans un réseau stochastique

Les articles [14], [16], [24] abordent des aspects généraux de la localisation dans un réseau stochastique. En 1979, une extension de la localisation des médianes d'un réseau déterministe à un réseau stochastique est étudiée par Mirchandani et Odoni [14]. Dans le cas déterministe, l'un des résultats les plus importants est celui d'Hakimi [15] qui nous dit qu'on peut réduire le domaine de solution des emplacements des entrepôts à l'ensemble de noeuds du réseau. Mirchandani et Odoni énoncent et démontrent des résultats similaires dans le cas où les distances entre les différents noeuds du réseau sont considérées comme des variables aléatoires qui suivent une distribution connue. Ces problèmes sont formulés à l'aide de programmes linéaires mixtes, mais ils exigent

des efforts numériques considérables.

Les auteurs Weaver et Church [16] ont comblé l'absence de procédure de calcul des solutions et d'applications numériques dans l'article précédent. Ils ont décrit deux procédures de calcul des solutions. La première est une heuristique basée sur une variation de la méthode d'échanges. La seconde est une procédure de relaxation lagrangienne. Après des applications numériques, les auteurs constatent que des problèmes stochastiques de taille moyenne peuvent être résolus en un temps raisonnable.

En 2006, Snyder a décidé de faire un résumé des modèles stochastiques et robustes liés à la localisation d'entrepôts [24]. Dans de nombreux environnements, tels que les centres de distribution, les changements sont très fréquents. Par conséquent, les modèles permettant de localiser des entrepôts en présence d'incertitude sont devenus une priorité pour les chercheurs. Son but est de montrer les différentes approches et applications qui existent pour résoudre ce problème. Parmi le nombre important d'applications, très peu produisent de bons résultats. Une des causes est l'estimation de certains paramètres.

Les articles [17], [26] et [30] traitent de problématiques qui se rapprochent du nôtre. En 1984, la localisation et la délocalisation d'entrepôts mobiles dans un réseau stochastique sont étudiées par Berman et Leblanc [17]. Ces auteurs considèrent des réseaux où le temps de trajet entre les noeuds change aléatoirement. Ces changements produisent un nombre fini d'états du réseau. Ils développent une heuristique qui généralise la localisation d'un entrepôt. Cette dernière produit un ensemble d'emplacements pour des entrepôts qui peuvent être déplacés moyennant un coût. Cette heuristique s'exécute dans un temps polynomial. De plus, comparée, sur un exemple de petite taille, à une approche basée sur un programme linéaire en nombres entiers, elle produit de bons résultats avec un pourcentage d'erreur très faible (entre 2 et 3%).

En 2007, Snyder, Daskin et Teo [26] ont examiné le problème de localisation stochastique avec mise en commun des risques (the stochastic location model with risk pooling). Récemment, un modèle de localisation avec mise en commun des risques (location model with risk pooling - LMRP) a été développé par Daskin et Shen. Ce LMRP considère le coût de l'inventaire lors des prises de décision pour la localisation d'entrepôts. En

d'autres termes, les décisions stratégiques et tactiques sont combinées dans un seul modèle. Dans cet article, les auteurs examinent une version stochastique du LMRP nommé SLMRP afin de prendre en compte l'environnement changeant dans lequel la chaîne d'approvisionnement évolue. L'objectif est de minimiser le prix total qui prend en compte la localisation, le transport et l'inventaire. Leur intention est de montrer qu'une méthodologie d'optimisation standard permet de résoudre efficacement ces problèmes. Le problème a été formulé à l'aide d'un programme non linéaire en nombres entiers et résolu par un algorithme utilisant une relaxation lagrangienne qui s'est montré assez efficace. Un nombre important de problèmes complexes de la chaîne d'approvisionnement peuvent être résolus en utilisant ce modèle à cause de sa grande flexibilité.

En 2010, Campbell et Jones [30] recherchent les emplacements et les quantités de stockage des entrepôts en se basant sur la probabilité de destruction p_i des emplacements potentiels en préparation à une catastrophe naturelle ou de provenance terroriste. Dans cet article, les auteurs font plusieurs approximations de p_i en fonction de la nature du désastre. Ils supposent que les probabilités de destruction sont indépendantes, ce qui est l'approche usuelle dans la littérature. Certains modèles et analyses de sensibilité sont décrits et testés tels que l'impact du nombre d'entrepôts et du nombre de demandes.

1.4 La fiabilité des entrepôts

L'article [23] aborde un aspect d'ordre général de la fiabilité des entrepôts. En 2004, Snyder et Daskin [23] explorent les modèles de fiabilité pour la localisation d'entrepôts basés sur le problème de la p -médiane et le problème de la localisation à quantité fixe sans contrainte de capacité. Ils souhaitent localiser des entrepôts tout en minimisant les coûts de transport et de construction, mais aussi en tenant compte des coûts de transport liés aux livraisons incomplètes. L'objectif est de localiser des entrepôts à des endroits fiables et dont le coût de construction est minimal. Cette approche est nouvelle dans le monde de la logistique. La solution produite restera opérationnelle même si une partie du réseau est détruite. Des applications numériques indiquent que la fiabilité peut être radicalement améliorée sans une trop grande augmentation des coûts liés aux

opérations. Cependant, il existe des limites à leurs modèles telles que la probabilité de survie identique pour tous les entrepôts et la capacité illimitée.

La problématique de l'article [28] se rapproche du nôtre. En 2007, la fiabilité des entrepôts est aussi analysée par Berman, Krass et Menezes [28]. Les auteurs développent un modèle appelé le problème de la médiane avec des entrepôts non fiables (the median problem with unreliable facilities - MPUF). En d'autres termes, ils considèrent le problème de la localisation d'entrepôts avec la possibilité de dysfonctionnement. L'objectif est le même que celui du problème de la p -médiane classique sauf que les sites choisis seront toujours fonctionnels. En pratique, différents types d'événements perturbants peuvent apparaître et rendre un entrepôt non opérationnel. Ils remarquent, après des applications numériques, que les emplacements proposés sont plus centralisés ou colocalisés (très proche les uns des autres ou au le même endroit), lorsque la probabilité de dysfonctionnement est significative.

1.5 La couverture d'un réseau

On parle de couverture d'un réseau lorsqu'après avoir localisé des entrepôts chaque groupe d'utilisateurs peut être atteint une fois en utilisant un chemin.

La problématique de l'article [18] se rapproche du nôtre. En 1986, ce concept a été analysé par Hogan et ReVelle [18]. Lorsqu'on fait face à des demandes aléatoires dans une zone très peuplée, une couverture de secours est nécessaire afin de maintenir un bon niveau de service. Les auteurs ont appliqué cette idée à des problèmes de localisation connus tels que le problème de couverture classique (classic covering problem), le problème de localisation par une couverture maximale (the maximum covering location problem) et le problème de localisation par recouvrement d'ensembles (location set covering). Ils ont aussi montré, à l'aide d'un exemple, qu'on peut augmenter le niveau de couverture sans perdre la première couverture de base. Néanmoins, lorsque c'est l'objectif primordial, la couverture de secours peut aboutir à la localisation d'un entrepôt

dans un emplacement déjà alloué à un entrepôt lors de la couverture de base.

1.6 Exemples de localisation suite à une catastrophe humanitaire

Dans cette étude, nous considérons le cas d'une menace sismique, mais ce n'est pas la seule possible. Dans la littérature, de nombreuses recherches traitent de la localisation de dépôt en réponse à divers types de désastres naturels. Considérons les cas d'un nettoyage de l'océan suite à un déversement de pétrole et celui de la restauration du courant électrique, après une interruption, dans une zone.

En 1996, la recherche de la localisation et la quantité optimales d'équipements de nettoyage d'urgence en réponse à un déversement de pétrole dans l'océan sont traitées par Iakovou, M. Ip, Dougligeris et Korde [31]. Les auteurs présentent un cadre qui aidera les prises de décisions stratégiques. En effet, ils proposent un modèle linéaire en nombre entier qui suggère le nombre optimal de dépôts qui devraient être localisés, les quantités et types d'équipements qui devraient être stockés dans chacun des dépôts et la manière optimale de déployer les équipements une fois le déversement déclaré. Une relaxation de ce précédent modèle est résolue et deux applications réelles sont réalisées sur la côte est de la Floride (États-Unis). Cependant, il apparaît nécessaire de faire des recherches plus approfondies sur la consistance et la standardisation des données fournies.

En 2004, le problème de la localisation de dépôts pour faciliter la restauration de l'électricité dans une zone après une interruption due à une catastrophe humanitaire est analysé par Wang, Sarker, Mann Jr. et Triantaphyllou [32]. Le 26 août 1992, par exemple, le cyclone nommé "Andrew" avait provoqué une coupure du courant électrique au sud de la Louisiane (États-Unis). Les auteurs considèrent deux cas. Le premier, le cas général, consiste à localiser les dépôts et déterminer la quantité de ressource qui doit partir de chaque dépôt ceci dans le but de minimiser le coût total de transport. Le second permet de savoir s'il est nécessaire de rajouter des dépôts dans une zone qui en contient déjà. Après calcul, la solution optimale est réalisable, mais pour des problèmes de grandes tailles, les solutions heuristiques sont proposées.

1.7 Conclusion

La localisation d'entrepôts, sujet au centre de notre étude, suscite beaucoup d'intérêt dans la recherche en logistique. Les articles étudiés nous montrent son évolution passant de la localisation d'un entrepôt à la localisation dynamique ou stochastique. En outre, des concepts tels que la fiabilité des entrepôts et la couverture d'un réseau sont analysés. Les domaines d'application ne font que croître. La littérature n'est pas abondante de problématiques qui se rapprochent du nôtre. Néanmoins, cela nous fait prendre connaissance des modèles utilisés afin de résoudre des problèmes semblables au nôtre.

Plusieurs idées ont inspiré nos modèles, par exemple : les divers types de recouvrements par rapport au nombre d'unités nécessaires pour une demande, la manière de gérer les opérations lorsque les entrepôts localisés sont sujets à des instabilités et les modèles proposés pour localiser des entrepôts de secours avant et après un éventuel séisme.

Parmi les articles traitant de la localisation dynamique, les idées de tentatives de prédiction des changements de certains paramètres afin de limiter les coûts liés à la délocalisation, mais surtout, les démarches cherchant à localiser un nombre aléatoire d'entrepôts nous ont fait prendre conscience de l'importance de certaines données qui seront appliquées à nos modèles (par exemple : la matrice de fiabilité F).

Parmi les articles traitant de la localisation dans un réseau stochastique, l'étude sur les réseaux où le temps de trajet change et la recherche d'emplacements en se basant sur la probabilité de destruction des emplacements potentiels en préparation à une catastrophe naturelle a joué un rôle dans la construction de notre nouvelle matrice des distances d'accès H .

La fiabilité est un concept important pour notre étude, les articles nous ont permis de constater comment il est utilisé dans la pratique.

Le concept de couverture de réseau, surtout de secours, est pris en compte dans une des variantes de notre modèle. Cette approche peut permettre de diminuer les coûts suivant la configuration du réseau, la diversité et la quantité des demandes des groupes

d'utilisateurs.

Le défi dans notre travail est de développer une approche différente de ce qui a déjà été fait dans la littérature. Notre idée principale consiste à modifier la matrice des distances d'accès qui respectera des contraintes de distance d'accès limite et de fiabilité des chemins entre les différents noeuds des réseaux considérés.

CHAPITRE II

MÉTHODOLOGIE

2.1 Présentation du problème

Nous souhaitons identifier, dans un pays, des sites fiables pour localiser des entrepôts qui aideront dans l'élaboration des opérations de secours à la suite d'une catastrophe humanitaire telle qu'un séisme. Les résultats de ce travail seront utilisés en prévision du séisme. Les emplacements choisis auront une forte probabilité de survie face au séisme et permettront de minimiser la distance d'accès totale ce qui assurera aux groupes d'utilisateurs de recevoir les soins et besoins vitaux assez rapidement. De plus, les chemins utilisés auront une probabilité d'au moins 50 pour cent de survie face au séisme.

Nous décidons de représenter le pays concerné par un graphe orienté $G = (V, A)$ où V représente l'ensemble des sommets (ou groupes d'utilisateurs ou noeuds) et A l'ensemble des arcs reliant deux sommets :

$$V = \{i : i = \text{groupe d'utilisateurs}\}$$

$$A = \{(i, j) : (i, j) = \text{arc reliant le groupe d'utilisateurs } i \text{ au groupe d'utilisateurs } j\}$$

Nous supposons que V est de cardinal n (entier strictement positif). Nous définissons un chemin entre deux groupes d'utilisateurs i et j comme une séquence d'arcs reliant i à j ; par exemple $\{(i, k), (k, l), (l, j)\}$. Sur A , on définit la matrice des distances d'accès (en kilomètres) $T = [t_{ij}]_{1 \leq i, j \leq n}$ où t_{ij} (réel strictement positif ou nul) est la distance d'accès entre le groupe d'utilisateurs i et le groupe d'utilisateurs j (les indices i et j représentent respectivement les lignes et les colonnes de la matrice). Cette notation désigne l'ensemble

des éléments de la matrice T puisque i et j varient de 1 à n . Notre problème est supposé symétrique, c'est-à-dire que nous avons toujours $t_{ij} = t_{ji}$. Sur A , on définit aussi la matrice de fiabilité $F = [f_{ij}]_{1 \leq i, j \leq n}$ où $0 \leq f_{ij} \leq 1$ est la fiabilité du chemin entre les groupes d'utilisateurs i et j ou de l'emplacement i (f_{ii}). Pour nous, la fiabilité représente la probabilité de survie d'un chemin ou d'un emplacement par rapport à la catastrophe.

Ainsi, nous disposons des données suivantes :

- le graphe G représentant le pays contenant n sommets (ou groupes d'utilisateurs),
- la matrice de distance T ,
- la matrice de fiabilité F ,
- le nombre d'entrepôts que l'on souhaite localiser : p (entier strictement positif).

L'objectif est de déterminer l'emplacement des p entrepôts tout en minimisant la valeur de la distance d'accès totale. Nous décidons de nommer ce problème : le problème de la p -médiane humanitaire (PPMH). Le modèle (et ses variantes) que nous allons utiliser pour résoudre ce problème sera basé sur le modèle du PPM classique.

2.2 Présentation des modèles

2.2.1 Le problème de la p -médiane (PPM) classique

Le PPM classique est un problème de localisation-partitionnement. Il consiste à localiser p entrepôts parmi n groupes d'utilisateurs ($p \leq n$), de sorte que si l'on rattache chaque groupe d'utilisateurs à son entrepôt le plus proche, la distance d'accès totale soit minimale. Les entrepôts ne peuvent être placés qu'aux emplacements des groupes d'utilisateurs. De plus, pour simplifier le problème, nous supposons que les entrepôts n'ont pas de limite de capacité. Modélisons le problème en considérant les variables suivantes [33] :

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{si le groupe d'utilisateurs } i \text{ est choisi pour localiser un entrepôt} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si le groupe d'utilisateurs } j \text{ est affecté à un entrepôt localisé en } i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Nous voulons

$$\text{minimiser } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} x_{ij} \quad (2.1)$$

sous les contraintes :

$$\sum_{i=1}^n y_i = p \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \text{pour } j \in \{1, \dots, n\} \quad (2.3)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad \text{pour } i, j \in \{1, \dots, n\} \quad (2.4)$$

$$y_i = 0 \text{ or } 1 \quad \text{pour } i \in \{1, \dots, n\} \quad (2.5)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ or } 1 \quad \text{pour } i, j \in \{1, \dots, n\}. \quad (2.6)$$

La contrainte (2.2) nous assure que le nombre total d'emplacements choisis pour les entrepôts sera égal à p . La contrainte (2.3) signifie que chaque groupe d'utilisateurs est associé à un seul entrepôt. La contrainte (2.4) nous assure que si le groupe d'utilisateurs localisés en j est associé à l'entrepôt situé en i , alors celui-ci devra être choisi. L'idée est que nous ne pouvons utiliser un entrepôt qui n'existe pas.

2.2.2 Le problème de la p -médiane humanitaire (PPMH)

Pour adapter le PPM au cas humanitaire, il est nécessaire de prendre en compte les contraintes liées à la préparation à une catastrophe. Dans ce mémoire, nous allons nous concentrer sur deux contraintes : une distance d'accès limite et un certain niveau de fiabilité des chemins. Une distance d'accès limite sera imposée entre un entrepôt et un groupe d'utilisateurs afin de s'assurer qu'il reçoive l'aide à temps. De plus, les chemins devront avoir une fiabilité d'au moins 50 pour cent pour être considérés dans la solution. Pour nous, la fiabilité représente la probabilité de survie du chemin par rapport à la catastrophe. Nous pensons qu'elle devrait être calculée en prenant en compte le type de catastrophe (séisme, cyclone, éruptions volcaniques, etc.) et les caractéristiques du

chemin. Par exemple, si on est en train de se préparer à faire face à un séisme, un chemin constitué d'un pont aura une moins grande fiabilité qu'un chemin qui n'en possède pas. Par conséquent, des mesures sur le terrain sont nécessaires pour calculer la fiabilité des chemins. Ces calculs dépassant le cadre de ce travail, nous utiliserons une matrice F construite aléatoirement.

La matrice des distances d'accès T sera modifiée pour tenir compte des contraintes liées à la préparation à une catastrophe. Cette nouvelle matrice des distances d'accès, définie sur A , sera nommée la matrice de la p -médiane humanitaire et notée $H = [h_{ij}]_{1 \leq i, j \leq n}$ où h_{ij} est la distance entre le groupe d'utilisateurs i et le groupe d'utilisateurs j . La construction de H représente la partie la plus importante de ce mémoire. Le modèle sera le même que précédemment, sauf que dans l'expression de la fonction objectif les données de la matrice T seront remplacées par H (c'est-à-dire que t_{ij} sera remplacé par h_{ij}) :

$$\text{minimiser } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} x_{ij} \quad (2.7)$$

2.2.3 Première variante du PPMH

Dans cette première variation du PPMH, on s'intéresse au cas où chaque groupe d'utilisateurs est associé à au moins un entrepôt. Nous sommes dans le cas où le gestionnaire ferait le choix de stocker un article spécifique dans chaque entrepôt. Ainsi, afin de répondre aux besoins divers des groupes d'utilisateurs, chaque groupe d'utilisateurs devrait être associé à un ou plusieurs entrepôts. Le modèle que nous proposons pour cette situation est le suivant :

Nous voulons

$$\text{minimiser } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} x_{ij}$$

tels que

$$\sum_{i=1}^n y_i = p \quad (2.8)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = c \quad \text{pour } j \in \{1, \dots, n\} \quad (2.9)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad \text{pour } i, j \in \{1, \dots, n\} \quad (2.10)$$

$$y_i = 0 \text{ or } 1 \quad \text{pour } i \in \{1, \dots, n\} \quad (2.11)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ or } 1 \quad \text{pour } i, j \in \{1, \dots, n\}. \quad (2.12)$$

Dans la contrainte (2.9), c est un entier qui représente le nombre d'entrepôts auquel est associé chaque groupe d'utilisateurs. On nommera ce paramètre le degré de couverture.

2.2.4 Deuxième variante du PPMH

Dans cette deuxième variante du PPMH, nous souhaitons limiter la similarité (ou ressemblance) entre les emplacements choisis pour localiser les entrepôts. En diversifiant le type d'emplacement des entrepôts, nous aurons une couverture moins centralisée et donc nous pourrions accéder à davantage de groupes d'utilisateurs. Pour illustrer l'idée, du point de vue topographique, cela peut représenter, par exemple, un certain degré d'altitude séparant deux emplacements. Dans notre cas, nous allons mesurer le niveau de similarité à l'aide de la distance qui sépare deux emplacements puisque c'est le seul type de données dont nous disposons. Plus précisément, nous supposons que plus les emplacements sont proches (en distance) et plus ils sont similaires (ou se ressemblent). Ainsi, nous ajouterons une condition sur la distance séparant deux emplacements ce qui limitera la similarité. Le modèle que nous proposons pour cette situation est le suivant :

Nous voulons

$$\text{minimiser } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n h_{ij} x_{ij}$$

tels que

$$\sum_{i=1}^n y_i = p \quad (2.13)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \text{pour } j \in \{1, \dots, n\} \quad (2.14)$$

$$y_i + y_j \leq 1 \quad \text{pour } i, j \text{ tel que } h_{ij} \leq s \quad (2.15)$$

$$x_{ij} \leq y_i \quad \text{pour } i, j \in \{1, \dots, n\} \quad (2.16)$$

$$y_i = 0 \text{ ou } 1 \quad \text{pour } i \in \{1, \dots, n\} \quad (2.17)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ ou } 1 \quad \text{pour } i, j \in \{1, \dots, n\}. \quad (2.18)$$

Dans la contrainte (2.15), s est un entier qui mesure le degré de similarité entre deux potentiels emplacements pour localiser des entrepôts.

2.3 Présentation des algorithmes (construction de la matrice H)

La matrice H est un élément essentiel de notre travail. En effet, les solutions proviennent en partie de cette matrice. Nous voulons nous assurer que les distances d'accès de cette matrice ne dépassent pas la distance d'accès limite qu'on s'est fixé. De plus, chaque chemin devra avoir une probabilité de survie égale ou supérieure à 50 pour cent. Ainsi, pour construire H , nous utilisons l'algorithme suivant (où t est la distance d'accès limite pour atteindre un groupe d'utilisateurs à partir d'un entrepôt et f la fiabilité minimale exigée du chemin entre deux groupes d'utilisateurs) :

Algorithm 0.1 Construction de H à l'aide de T et F

- 1: si $t_{ij} > t$ alors poser $h_{ij} = \infty$.
 - 2: si $t_{ij} \leq t$ alors
 - 3: si $f_{ij} \geq f$ alors poser $h_{ij} = t_{ij}$
 - 4: si $f_{ij} < f$ alors calculer le prochain plus court chemin et retourner à l'étape 1.
-

La valeur h_{ij} est la longueur du plus court chemin entre les groupes d'usagers i et j qui satisfait les contraintes de la p -médiane humanitaire. En pratique, si $t_{ij} > t$ on donne une valeur considérée comme l'infini à h_{ij} et elle ne sera pas incluse dans la solution, si toutes les contraintes sont satisfaites on pose $h_{ij} = t_{ij}$, sinon $t_{ij} \leq t$ et $f_{ij} < f$ alors on calcule le prochain plus court chemin et on retourne à l'étape 1. Cette stratégie nous assure de trouver les solutions respectant les contraintes que nous imposons.

Dans un premier temps, pour pouvoir construire H , nous aurons besoin de calculer les k plus courts chemins entre tous les groupes d'usagers du réseau qui ne dépasse pas la distance d'accès limite t . A priori, il nous paraît nécessaire de tous les calculer puisqu'on ne peut pas savoir à l'avance lesquels d'entre eux auront une fiabilité d'au moins 50 pour cent. Nous utilisons l'algorithme MPS (Martins, Pascoal et Santos [35]) pour calculer les k plus courts chemins entre tous les groupes d'usagers du réseau.

L'algorithme MPS est basé sur une généralisation de l'algorithme de Yen [36] pour le calcul des k plus courts chemins. L'algorithme de Yen calcule les k plus courts chemins en se basant sur la déviation du chemin calculé par rapport aux chemins déjà calculés [37]. L'algorithme MPS utilise des coûts réduits, une nouvelle structure sur le réseau qui permet de gagner en efficacité (vitesse et robustesse) et est adapté au cas avec contrainte (les sous-tours ne sont pas autorisés). La présentation de cet algorithme nécessite un nombre important de notations et de résultats, n'étant pas un élément essentiel dans notre travail pour plus de détail veuillez consulter [35].

Cependant, l'application de cet algorithme est important pour notre travail. On utilise une implémentation en C de l'algorithme MPS (MPSLP.c) que M. Pascoal nous a fourni et autorisé à utiliser. Ce programme prend en paramètre un réseau (défini à l'aide d'une structure se basant sur les représentations "forward" et "reverse star") et des noeuds de départ s et d'arrivé t . Le fichier décrivant le réseau aura la structure suivante :

n a

point[i] rpoint[i], pour tout noeud i

suc[i] cost[i] ant[i] cor[i], pour tout arc i

s t

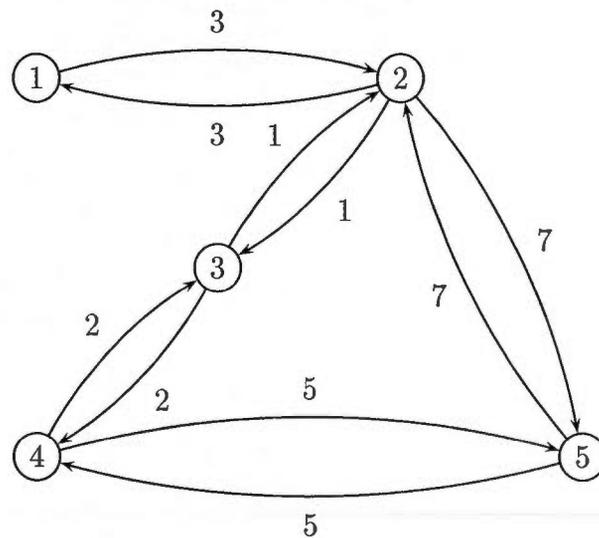
où :

- n = le nombre de noeuds
- a = le nombre d'arcs
- $\text{point}[1] = \text{rpoint}[1] = 1$
 $\text{point}[i+1] = \text{point}[i] + \text{nombre de noeuds sortant du noeud } i$
 $\text{rpoint}[i+1] = \text{rpoint}[i] + \text{nombre de noeuds entrant au noeud } i$
- $\text{suc}[i]$ représente le noeud d'arrivé de l'arc i dans la représentation "forward star"
- $\text{cost}[i]$ représente le coût de l'arc i dans la représentation "forward star" (entier)
- $\text{ant}[i]$ représente le noeud de départ de l'arc i dans la représentation "reverse star"
- $\text{cor}[i] = k$ si et seulement si l'arc i dans la représentation "reverse star" correspond à l'arc k dans la représentation "forward star"
- s (noeud de départ) et t (noeud d'arrivé).

Nous supposons que :

- les coûts des arcs sont des entiers
- tous les trajets ont un coût non négatif

Nous avons créé un programme en C++ qui nous construit, à partir de la matrice des distances d'accès, le fichier précédent qui décrit le réseau. Ensuite, nous executons MPSP.c qui nous renvoie un fichier contenant la liste des k plus courts chemins (et leurs distances d'accès) entre les groupes d'usagers s et t ainsi que l'ensemble des groupes d'usagers qui constituent chaque chemin. Par exemple, pour le réseau suivant :



En prenant $s = 5$ et $t = 4$, MPSLP.c nous renvoie le fichier suivant :

Path 1 5 : 5 4

Path 2 10 : 5 2 3 4

Ce résultat signifie que le premier plus court chemin a une distance d'accès de 5 kilomètres et passe par les noeuds 5 et 4. Le deuxième plus court chemin a une distance d'accès de 10 kilomètres et passe par les noeuds 5, 2, 3 et 4.

Nous créons, ensuite, un programme en C++ (PPMH.cc) qui utilise MPSLP.c et contient une structure d'objet constitué de deux attributs : un entier (désignant la durée du chemin) et un vecteur (contenant les groupes d'utilisateurs utilisés dans le chemin en question). Par exemple, pour le premier plus court chemin ($k = 1$) du réseau précédent, l'entier vaut 5 et le vecteur [5,4]. Cette structure permet un accès facile et rapide aux informations. Puis, nous faisons une boucle sur l'ensemble des groupes d'utilisateurs du réseau (pour $i \neq j$ car pour $i = j$ la valeur des k plus courtes distances est nulle) et nous sauvegardons toutes ces données.

Dans un second temps, pour construire la matrice H , nous aurons besoin de calculer la fiabilité d'un chemin. La matrice de fiabilité F nous donne la fiabilité de chaque arc du graphe. Pour calculer la fiabilité d'un chemin entre deux sommets, dans une première

approche, nous supposons que les fiabilités de chaque arc sont toutes indépendantes. Par exemple, pour le chemin entre les sommets 1 et 5, passant par les sommets 1,2,3 et 5, nous aurons :

$$f_{15} = f_{12} * f_{23} * f_{35}$$

Cette hypothèse ne reflète pas la réalité. En effet, nous savons que les probabilités de survie des arcs sont liées entre elles.

Une autre approche, reflétant davantage la réalité, serait de considérer que $f_{ij} \neq 1$ si $i = j$. Par conséquent, l'exemple précédent deviendrait :

$$f_{15} = f_{11} * f_{12} * f_{22} * f_{23} * f_{33} * f_{35} * f_{55}$$

Lors de nos expériences numériques, nous allons tester et commenter ces deux approches.

Enfin, détenant ces informations, nous appliquons l'algorithme (0.1) pour construire H .

2.4 Les méthodes employées pour résoudre les modèles

Les méthodes de résolutions pour résoudre les modèles correspondent à celles du PPM classique [33]. Le PPM classique est classifié comme étant un problème NP-difficile. Les méthodes pour le résoudre dépendent de la valeur de p [41]. En effet :

- si $p = 1$, nous énumérons toutes les solutions possibles et nous prenons la meilleure.
- si $p > 1$ et que $\binom{n}{p}$ est petit, alors nous énumérons les $\binom{n}{p}$ solutions possibles et nous prenons la meilleure.
- si $p > 1$ et que $\binom{n}{p}$ est trop grand, nous pouvons essayer de le résoudre en utilisant la programmation en nombres entiers. Si le programme en nombres entiers prend trop de temps ou d'espace mémoire, nous pouvons essayer de le résoudre à l'aide de méthodes heuristiques ou métaheuristiques.

Les méthodes heuristiques peuvent être classées suivant trois groupes : constructives (algorithme glouton, etc.), la recherche locale (interchangement (ou méthode de Teitz et Bart - 1968), etc.) et ceux basés sur la programmation mathématique (relaxation

lagrangienne, etc.)[33]. La méthode de Teitz et Bart (1968) est facile à programmer et produit de bonnes solutions. Une solution aléatoire est donnée initialement, puis, des entrepôts sont déplacés itérativement un par un sur des emplacements vacants avec comme objectif de diminuer la distance d'accès totale; cette recherche locale s'arrête lorsque le déplacement de n'importe quel entrepôt ne diminue pas la valeur de la fonction objectif [34].

Les métaheuristiques les plus utilisées pour résoudre le PPM sont : les heuristiques lagrangiennes (Lagrangian heuristics), la recherche Tabou (Tabu search), la recherche à voisinages variables (Variable neighborhood search), la recherche génétique (Genetic search), la recherche dissipée (Scatter search), le recuit simulé (Simulated Annealing), la méthode GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), l'optimisation par colonies de fourmis (Ant colony optimization), etc [33].

Dans notre cas, lorsque nous résolvons les modèles à l'aide de Cplex, par défaut ce sont des relaxations lagrangiennes qui sont utilisées. Nous n'allons pas discuter davantage sur ce point car notre étude n'inclut pas la comparaison des méthodes de résolution.

CHAPITRE III

EXPÉRIENCES NUMÉRIQUES

Pour résoudre notre problème de départ, nous avons proposé des modèles linéaires. À présent, notre objectif est de tester ces modèles sur des exemples et analyser comment les solutions pourraient être utilisées par le gestionnaire. Pour cela, nous allons implémenter ces modèles dans un programme informatique afin de chercher des solutions. Les solutions trouvées seront appliquées et ajustées (si nécessaire) au problème de départ. En effet, de manière générale le modèle ne représente pas parfaitement le problème réel. Ainsi, il est souvent nécessaire de faire des ajustements pour rendre les solutions trouvées réalisables. Dans notre cas, nous avons fait le choix du langage de programmation C++ et du logiciel d'optimisation CPLEX (version 12.2) pour construire nos programmes.

Dans un premier temps, nous créons des exemples de petite taille afin de tester le fonctionnement et la qualité de nos programmes.

Dans un deuxième temps, pour les deux autres variantes du modèle humanitaire, nous utiliserons des exemples de plus grande taille (générés aléatoirement) provenant de la bibliothèque ORLIB [38] pour contrôler la robustesse des programmes avant de passer au réseau réel turc. Les calculs sont réalisés sur un ordinateur tournant sous Mac OSX 10.5.8, avec un processeur de 1.83 GHz et 1 GB de mémoire vive. Les expériences numériques vont nous permettre d'analyser l'influence de certains paramètres sur la solution optimale. Les conclusions de ces analyses aideront le gestionnaire dans ses prises de décision.

3.1 Le cas humanitaire

Nous commençons par construire quatre réseaux et un programme en C++ nommé *PmedH.cc*. Ce programme prend en paramètre les matrices de distance T et de fiabilité F (construite aléatoirement) du réseau, la distance d'accès limite autorisée entre deux groupes d'utilisateurs (t) et la fiabilité minimale autorisée (f). Il nous renvoie :

1. les représentations "forward et reverse star" [39]
2. le fichier de représentation nécessaire pour le calcul des k plus courts chemins à l'aide du programme MPSP.c (voir chapitre précédent)
3. la matrice de la p -médiane humanitaire H (voir chapitre précédent).

Ensuite, si nécessaire, nous allons insérer le modèle de la p -médiane humanitaire et utiliser la matrice H , dans un programme en C++ faisant appel à CPLEX (nommé *SolPmedH.cc*), pour chercher la solution à notre problème, c'est-à-dire les emplacements des entrepôts et la distance d'accès totale. Les résultats seront commentés.

3.1.1 Exemple 1

1. Le réseau

Considérons le réseau suivant :

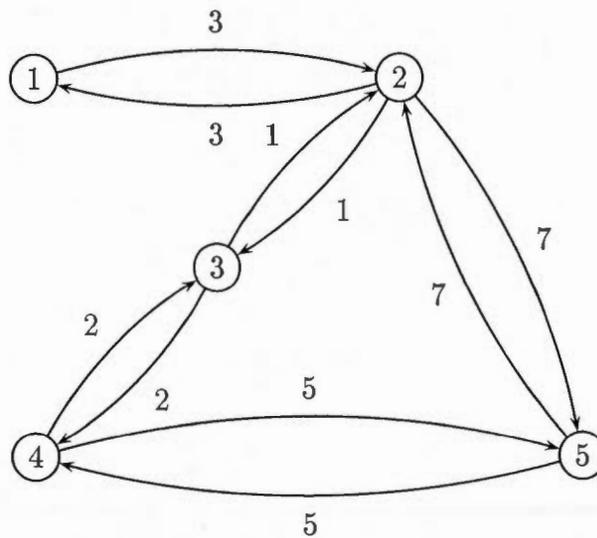


Figure 3.1: Réseau 1 de base

Il contient 5 noeuds ($n = 5$) et 11 arcs ($a = 10$). Nous souhaitons localiser 3 entrepôts ($p = 3$). Pour ce premier exemple, nous allons énoncer tous les résultats de *PmedH.cc* afin de vérifier qu'on obtient des résultats corrects. Par la suite, seulement les matrices T , F , H et les résultats de *SolPmedH.cc* seront explicités.

2. Les paramètres de *PmedH.cc*

Les valeurs de la matrice T se déduisent du réseau où t_{ij} représente la distance entre les noeuds i et j . Étant donné que nous utilisons des petits nombres, la valeur 100 représentera la distance infinie (autrement dit $t_{ij} = 100$ signifie qu'il n'existe pas d'arc qui relie les noeuds i et j).

$$T = \begin{pmatrix} 0 & 3 & 100 & 100 & 100 \\ 3 & 0 & 1 & 100 & 7 \\ 100 & 1 & 0 & 2 & 100 \\ 100 & 100 & 2 & 0 & 5 \\ 100 & 7 & 100 & 5 & 0 \end{pmatrix}$$

La matrice de fiabilité F devrait être calculée en tenant compte de plusieurs paramètres physiques, géologiques et naturels. Cependant, ces calculs dépassent le cadre de ce mémoire. Par conséquent, nous allons la construire aléatoirement. Observons que s'il n'existe pas d'arc reliant les groupes d'utilisateurs i aux groupes d'utilisateurs j alors la fiabilité entre ces deux groupes est nulle (si $t_{ij} = 100$ alors $f_{ij} = 0$). Dans une première approche, supposons que les noeuds soient certains de résister au séisme ($f_{ij} = 1$ si $i = j$) et les fiabilités soient toutes indépendantes (voir chapitre précédent). Supposons que la matrice F soit la suivante :

$$F = \begin{pmatrix} 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 1 & 0.2 & 0 & 0.6 \\ 0 & 0.2 & 1 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 1 & 0.8 \\ 0 & 0.6 & 0 & 0.8 & 1 \end{pmatrix}$$

Dans une deuxième approche, nous supposons que les noeuds ne sont pas certains de résister au séisme ($f_{ij} \neq 1$ si $i = j$) et que les fiabilités sont toutes indépendantes. Nous supposons donnée la matrice F suivante :

$$F = \begin{pmatrix} 0.2 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.6 & 0.2 & 0 & 0.6 \\ 0 & 0.2 & 0.5 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0.3 & 0.8 \\ 0 & 0.6 & 0 & 0.8 & 0.4 \end{pmatrix}$$

Nous fixons $t = 5$ et $f = 0.5$. Nous insérons les données précédentes dans *PmedH.cc*.

3. Les résultats de *PmedH.cc*

Les premiers résultats de notre programme sont les représentations suivantes :

Numéro de l'arc	Noeud de départ	Noeud d'arrivée	Temps de trajet
1	1	2	3
2	2	1	3
3	2	3	1
4	2	5	7
5	3	2	1
6	3	4	2
7	4	3	2
8	4	5	5
9	5	2	7
10	5	4	5

Tableau 3.1: Représentation "forward star" du réseau 1

Numéro de l'arc	Noeud de départ	Noeud d'arrivée	Temps de trajet
1	2	1	3
2	1	2	3
3	3	2	1
4	5	2	7
5	2	3	1
6	4	3	2
7	3	4	2
8	5	4	5
9	2	5	7
10	4	5	5

Tableau 3.2: Représentation "reverse star" du réseau 1

Le deuxième résultat de notre programme est le fichier par lequel nous définissons le réseau (voir chapitre précédent) :

```

5 10
1 1
2 2
5 5
7 7
9 9
11 11
2 3 2 2
1 3 1 1
3 1 3 5
5 7 5 9
2 1 2 3
4 2 4 7
3 2 3 6

```

5 5 5 10

2 7 2 4

4 5 4 8

s t

En considérant la matrice F de la première approche, le dernier résultat de notre programme est la matrice H suivante :

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 3 & 100 & 100 & 100 \\ 3 & 0 & 100 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 0 & 2 & 100 \\ 100 & 100 & 2 & 0 & 100 \\ 100 & 100 & 100 & 100 & 0 \end{pmatrix}$$

En considérant la matrice F de la deuxième approche, le dernier résultat de notre programme est la matrice H suivante :

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 100 & 100 & 100 & 100 \\ 100 & 0 & 100 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 0 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 100 & 0 & 100 \\ 100 & 100 & 100 & 100 & 0 \end{pmatrix}$$

En observant la deuxième matrice H , nous déduisons qu'aucun chemin ne peut être solution du problème de la p -médiane humanitaire. Dans le premier cas, les hypothèses sont moins fortes. Dans la suite, nous allons seulement considérer la première approche.

En se basant sur la matrice H de la première approche, nous obtenons ce nouveau réseau :

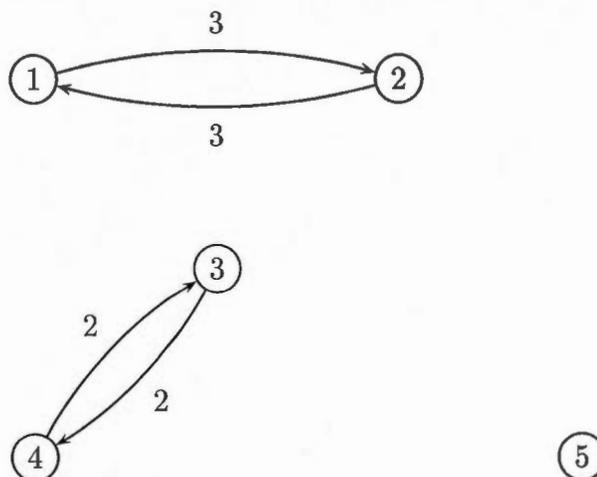


Figure 3.2: Réseau 1 avec H

A partir de cette représentation graphique, décomposons le réseau suivant ces composantes connexes. Rappelons qu'un graphe $G = (V, A)$ est connexe si et seulement s'il existe un chemin entre chaque paire de sommets. Une composante connexe d'un graphe $G = (V, A)$ est un sous-graphe $G' = (V', A')$ connexe maximal (pour l'inclusion) : il n'est pas possible d'ajouter à V' d'autres sommets en conservant la connexité du sous-graphe G' . Dans cet exemple, il y a 3 composantes connexes : 1-2, 3-4 et 5. Par conséquent, le nombre minimum d'entrepôts qu'on peut localiser est 3. De plus, nous pouvons déduire que les solutions optimales s'obtiennent avec les noeuds 1,3 et 5 ou 1,4 et 5 ou 2,3 et 5 ou 2,4 et 5 pour une distance d'accès totale de 5.

3.1.2 Exemple 2

. 1. Le réseau

Considérons le réseau suivant :

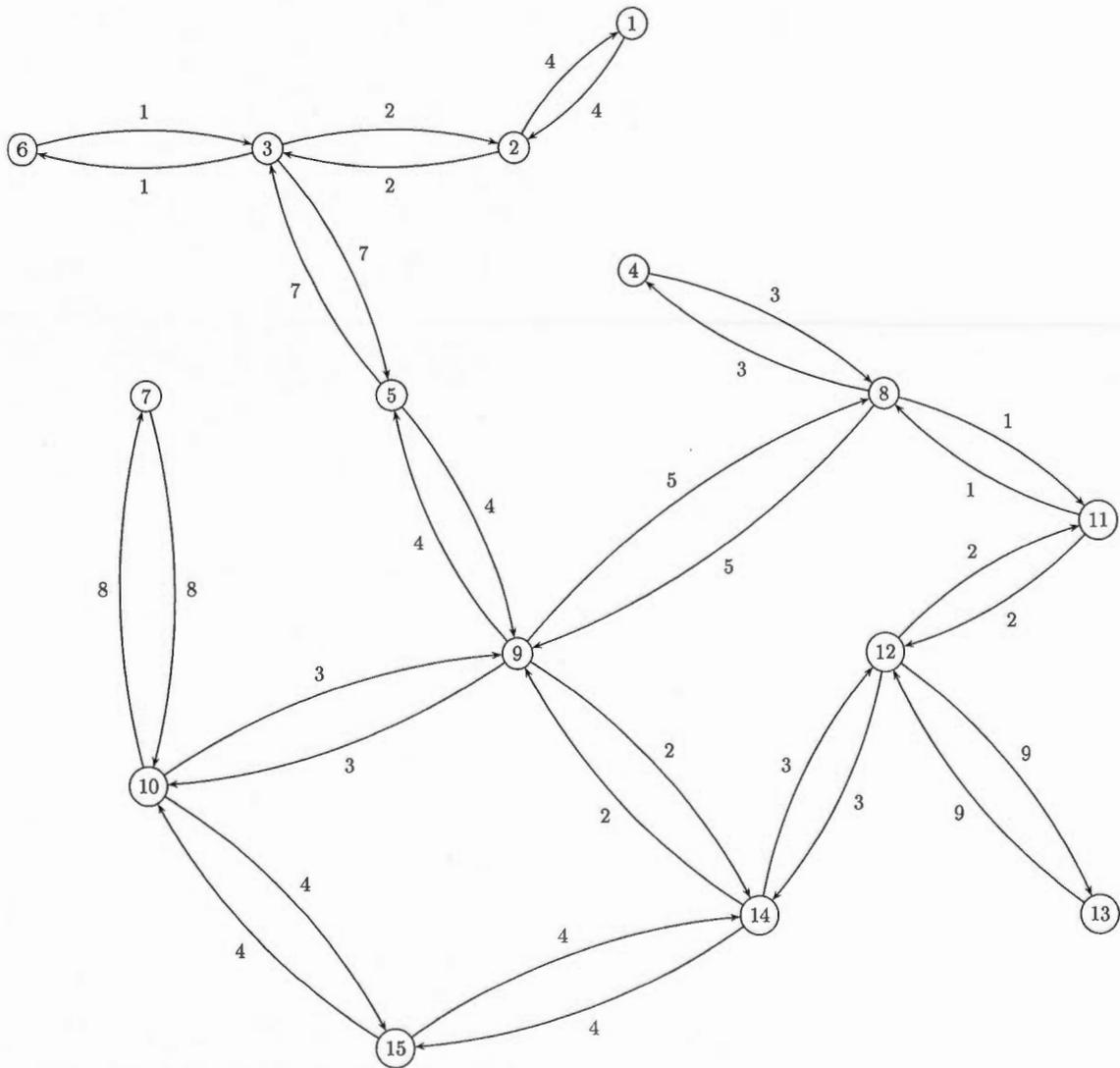


Figure 3.3: Réseau 2 de base

Il contient 15 noeuds ($n = 20$) et 32 arcs ($a = 32$). Nous souhaitons localiser 5 entrepôts ($p = 5$).

2. Les paramètres de *PmedH.cc*

Par les mêmes considérations que précédemment, nous avons la matrice T suivante :

$$\begin{pmatrix} 0 & 4 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 \\ 4 & 0 & 2 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 \\ 100 & 2 & 0 & 100 & 7 & 1 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 100 & 0 & 100 & 100 & 100 & 3 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 7 & 100 & 0 & 100 & 100 & 100 & 4 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 1 & 100 & 100 & 0 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 0 & 100 & 100 & 8 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 100 & 3 & 100 & 100 & 100 & 0 & 5 & 100 & 1 & 100 & 100 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 100 & 100 & 4 & 100 & 100 & 5 & 0 & 3 & 100 & 100 & 100 & 2 & 100 \\ 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 8 & 100 & 3 & 0 & 100 & 100 & 100 & 100 & 4 \\ 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 1 & 100 & 100 & 0 & 2 & 100 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 2 & 0 & 9 & 3 & 100 \\ 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 9 & 0 & 100 & 100 \\ 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 2 & 100 & 100 & 3 & 100 & 0 & 4 \\ 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 100 & 4 & 100 & 100 & 100 & 4 & 0 \end{pmatrix}$$

Supposons donné la matrice de fiabilité F suivante :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 1 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7 & 1 & 0 & 0.5 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.4 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0.2 & 0 & 0.8 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3 & 0 & 0 & 0.2 & 1 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 0.7 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0 & 0 & 1 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 1 & 0.6 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.6 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0 & 0 & 0.5 & 0 & 1 & 0.7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0.7 & 1 \end{pmatrix}$$

Nous fixons $t = 5$ et $f = 0.5$. Nous insérons les données précédentes dans $PmedH.cc$.

En se basant sur la matrice H nous avons le nouveau réseau suivant :

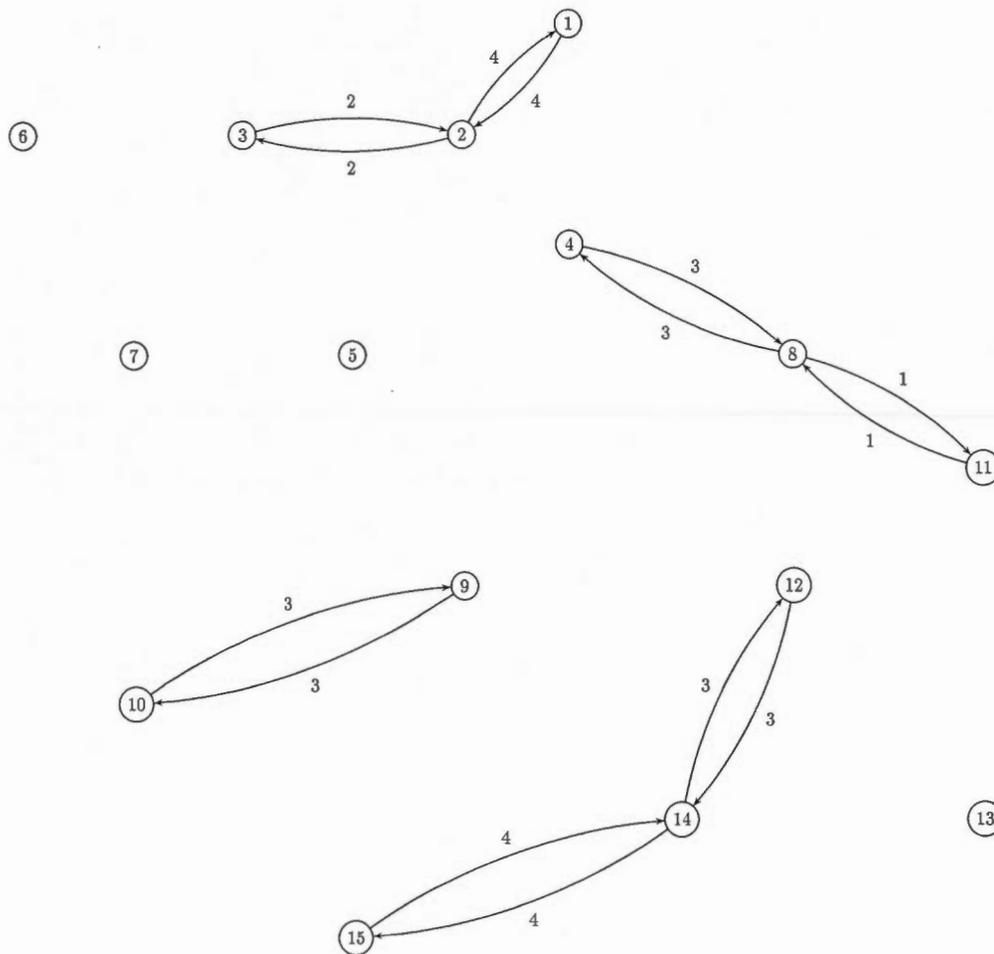


Figure 3.4: Réseau 4 avec H

En observant cette représentation graphique, nous constatons qu'il y a 8 composantes connexes : 1-2-3, 4-8-11, 5, 6, 7, 9-10, 12-14-15 et 13. Par conséquent, le nombre minimal d'entrepôts que l'on peut localiser est 8. Ainsi, notre objectif de localiser 5 entrepôts n'est pas réalisable pour ce réseau. De plus, nous déduisons que la solution optimale (distance d'accès totale) vaut 20 et réalisée en plaçant les entrepôts, par exemple, aux noeuds : 1, 4, 5, 6, 7, 9, 12 et 13. Vérifions, à présent,

que le programme *SolPmedH.cc* utilisant CPLEX fonctionne correctement.

3. Résolution du problème avec CPLEX

Rappelons que nous cherchons à localiser 5 entrepôts. Nous exécutons *SolPmedH.cc* et nous n'obtenons aucune solution. Ainsi, nous ne pouvons pas localiser 5 entrepôts dans des emplacements fiables (avec au moins 50 pour cent de chance de survie face au séisme) et permettant un accès d'une distance de 5 kilomètres ou moins aux groupes d'utilisateurs dans ce réseau. Par conséquent, il nous faut augmenter la valeur de p pour obtenir des solutions. Après calcul, nous obtenons des solutions optimales présentées dans le tableau suivant (où *d.a.t.* = distance d'accès totale et *N.S* = pas de solution) :

p	<i>d.a.t.</i>	Noeuds	Arcs
15	0	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15	aucun
14	1	1,2,3,4,5,6,7,9,10,11,12,13,14,15	11 → 8
13	3	1,3,4,5,6,7,9,10,11,12,13,14,15	3 → 2, 11 → 8
12	6	1,3,4,5,6,7,9,11,12,13,14,15	3 → 2, 9 → 10, 11 → 8
11	9	1,3,4,5,6,7,9,11,12,13,15	3 → 2, 9 → 10, 11 → 8, 12 → 14
10	12	1,3,5,6,7,8,9,12,13,15	3 → 2, 8 → 4, 8 → 11, 9 → 10, 12 → 14
9	16	1,3,5,6,7,8,9,13,14	3 → 2, 8 → 4, 8 → 11, 9 → 10, 14 → 12, 14 → 15
8	20	2,5,6,7,8,9,13,14	2 → 1, 2 → 3, 8 → 4, 8 → 11, 9 → 10, 14 → 12, 14 → 15
7	<i>N.S</i>	<i>N.S</i>	<i>N.S</i>

Tableau 3.3: Solution pour le réseau 2

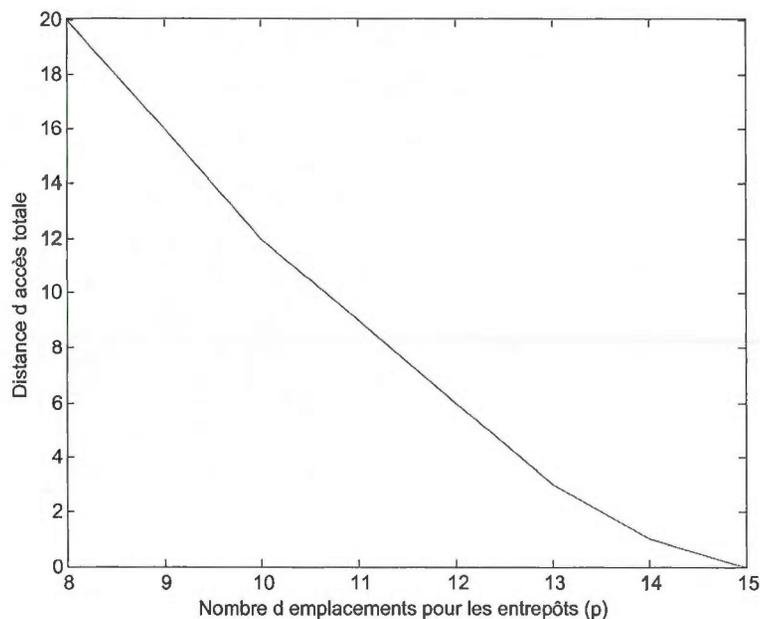


Figure 3.5: Réseau 2 : solution

La représentation graphique nous permet d'observer que la solution optimale diminue de manière quasi constante en fonction de l'augmentation du nombre d'emplacements pour localiser les entrepôts ($8 \leq p \leq 13$). Remarquons que cela ne garantit pas que les coûts des opérations soient moins élevés. En effet, si le prix d'ouverture d'un entrepôt est très élevé, cela peut être moins coûteux d'en ouvrir un petit nombre quitte à ce que la distance d'accès totale soit plus élevée. Le gestionnaire ayant les coûts de chaque opération pourra prendre la décision pour laquelle le prix des opérations sera le moins élevé. Les résultats précédents lui permettront de gagner du temps dans ces calculs. N'oublions pas que le temps est un facteur important dans les opérations de secours, plus on agit vite et plus le nombre de groupe d'utilisateurs qu'on pourra aider sera élevé.

Au regard des résultats obtenus pour ces deux exemples, nous constatons que

nos programmes fonctionnent correctement et produisent des résultats réalisables. Pour vérifier plus en profondeur la robustesse et l'efficacité, nous allons appliquer des variantes de ces programmes à des réseaux de plus grande taille.

3.2 La première variante du modèle humanitaire

Nous allons appliquer la première variante du modèle humanitaire aux données provenant de la bibliothèque ORLIB et le réseau turc. Les données du réseau turc nous sont fournies par M. Pacoal. Le réseau turc est constitué de 81 villes (noeuds) et 2064 arcs ($n = 81$ et $a = 2064$), nous disposons de la matrice des distances d'accès en kilomètres entre chaque ville. Nous suivons la procédure vue précédemment pour construire la matrice H à partir de la matrice des distances d'accès T (donnée) et de fiabilité F (créée aléatoirement). Lors de cette construction, la valeur de t est défini en prenant en compte la distance moyenne du réseau tandis que f est toujours fixé à 0.5. Par exemple, la distance moyenne du réseau turc est de 728,4 kilomètres, nous avons fixé $t = 500$. Nous utiliserons un programme en C++ (nommé PMHVar1.cc) qui fait appel à CPLEX. Il prend en paramètre le modèle de la première variante, la matrice H , le nombre d'entrepôts que l'on souhaite localiser (p), le degré de couverture (c). Il nous renvoie les emplacements des entrepôts et la distance d'accès totale entre ces derniers et les groupes d'utilisateurs.

3.2.1 Données d'ORLIB

Les données d'ORLIB sont disponibles sur Internet et servent à faire des tests sur des modèles de type p -médiane. Elles sont générées aléatoirement et nommées pmed1, pmed2, etc. Les distances varient entre 1 et 100. Nous utiliserons les notations suivantes :

n = nombre de noeuds

a = nombre d'arcs

so = valeur de la solution optimale

tps = temps de calcul nécessaire à notre programme (en secondes)

c = le degré de couverture

t = la distance d'accès limite nécessaire à la construction de H

moy = la moyenne des distance du réseau.

L'objectif est de tester la robustesse du programme face à des réseaux de plus grande taille (comparés à la taille des précédents réseaux). Pour ce faire nous nous posons la question suivante :

Question : *Comment réagit le programme sur des exemples d'ORLIB lorsqu'on fait varier c ?*

Pour répondre à cette question, nous résolvons le problème en faisant varier le niveau de couverture c pour quatre exemples de la bibliothèque ORLIB. Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Réseau c	pmed1	pmed2	pmed6	pmed10
		$n = 100$ $a = 200$ $p = 64$ $moy = 27.26$ $t = 30$	$n = 100$ $a = 200$ $p = 64$ $moy = 25.59$ $t = 30$	$n = 200$ $a = 800$ $p = 90$ $moy = 24.52$ $t = 80$
1	$so = 502$ $tps = 0.352$	$so = 379$ $tps = 0.359$	$so = 1069$ $tps = 1.445$	$so = 910$ $tps = 1.498$
2	NS	NS	$so = 6853$ $tps = 5.059$	$so = 6125$ $tps = 2.198$
3	NS	NS	NS	NS

Tableau 3.4: Variation de la solution optimale par rapport à c

Les valeurs de p et t ne sont pas choisies au hasard. En effet, pour des valeurs inférieures il n'existe pas de solution. Dans ces résultats, le plus important pour nous c'est le temps d'exécution car nous voulons être conscients du temps de calcul avant de passer au réseau turc qui est de plus grande taille. Pour une couverture de niveau 1, le temps de calcul pour des réseaux de 100 noeuds et 200 arcs est d'environ 0.35 seconde, tandis que, pour des réseaux de 200 noeuds et de 800 arcs c'est d'environ 1.5 seconde. Pour une

couverture de niveau 2, le temps de calcul pour des réseaux de 200 noeuds et de 800 arcs varie entre 2.19 et 5.05 secondes. Les temps de calcul nous paraissent raisonnables. Par conséquent, nous pouvons exécuter le programme sur le réseau turc qui contient 81 noeuds et 2064 arcs.

3.2.2 Le réseau turc

La matrice H que nous avons construite (avec $t = 500$ et $f = 0.5$) contient les distances en kilomètres entre chaque paire de villes. Elle respecte les contraintes de la p -médiane humanitaire. Nous allons guider nos analyses par des questions que pourraient se poser le gestionnaire.

Question : *Quel est le nombre minimal d'entrepôts nécessaires (et la distance d'accès totale associée) pour pouvoir atteindre un pourcentage de groupe d'utilisateurs (PGU) donné lorsque la couverture est de niveau 1 ou 2 ?*

Pour répondre à cette question, à partir d'un PGU fixé, nous avons déterminé le nombre minimum d'entrepôts nécessaires en faisant une boucle sur le nombre d'entrepôts et en nous arrêtant lorsqu'on trouve une solution. Le pourcentage d'utilisateurs représente un ensemble de groupe d'utilisateurs proche entre eux. Le temps de calcul est de l'ordre de la (fraction de) seconde dans tous les cas. Après calcul, nous obtenons les résultats suivants :

<i>pgu</i>	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
<i>p</i>	4	5	6	7	7	7	7	7	7	7
<i>so</i>	1199	2925	4298	6804	7689	9445	11812	14012	16043	19025

Tableau 3.5: Turquie : variation de p et so lorsque $c = 1$ par rapport au PGU

<i>pgu</i>	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
<i>p</i>	NS	10	12	14	13	12	12	12	13	13
<i>so</i>	NS	7329	9676	12732	18697	23376	29391	34962	33827	39895

Tableau 3.6: Turquie : variation de p et so lorsque $c = 2$ par rapport au PGU

Le premier constat est que la distance d'accès totale, pour répondre aux besoins de l'ensemble des groupes d'utilisateurs, pour une couverture de niveau 2 est légèrement plus que le double de celle de niveau 1 (2.09 fois plus). Pour un PGU fixé, le rapport de proportionnalité entre les distances totales pour $c = 1$ et $c = 2$ varie entre 2 et 2.5. En ce qui concerne le nombre d'entrepôts, c'est à peu près le même constat. Il semble donc se dégager un rapport de proportionnalité d'une valeur proche de 2 entre les niveaux de couverture 1 et 2 du point de vue de la distance d'accès totale et du nombre d'entrepôts. Examinons à présent l'influence du nombre d'entrepôts sur la distance d'accès totale.

Question : *Comment varie la distance d'accès totale en fonction du nombre d'entrepôts lorsque la couverture est de niveau 1 ou 2 ?*

Pour répondre à cette question, pour $c = 1$ ou $c = 2$ et un p fixé, on calcule la distance d'accès totale associée. Le temps de calcul est de l'ordre de la (fraction de) seconde dans tous les cas. Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants :

<i>p</i>	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
<i>so</i>	NS	13994	10319	8279	6753	5519	4572	3735	3005	2414

p	55	60	65	70	75	80	81
so	1865	1389	973	587	270	29	0

Tableau 3.7: Turquie : variation de so pour un p fixé lorsque $c = 1$

p	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
so	NS	NS	33576	27827	24086	21211	18944	17085	15481	14177

p	55	60	65	70	75	80	81
so	13044	12052	11161	10372	9723	9201	9122

Tableau 3.8: Turquie : variation de so pour un p fixé lorsque $c = 2$

Au regard de ces résultats, il faut au moins 10 entrepôts pour réaliser une couverture de niveau 1 et 15 pour le niveau 2. On observe que plus le nombre d'entrepôts augmente plus l'écart entre les distances totales des deux niveaux diminue passant de 23 257 km (pour 15 entrepôts) à 9172 km (pour 80 entrepôts). Pour un nombre d'entrepôts fixé, la différence entre les distances totales est très élevée entre les deux niveaux de couverture.

Représentons graphiquement la solution pour $c = 1$ et $p = 50$:

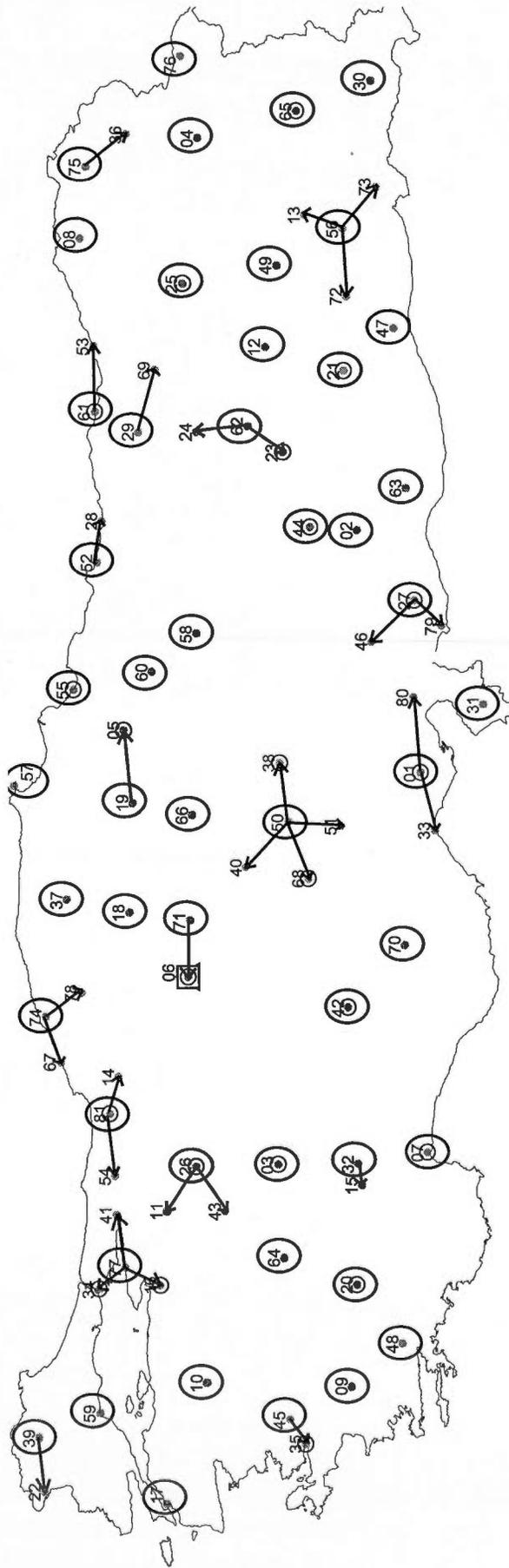


Figure 3.6: Solution du réseau turc pour $c = 1$ et $p = 50$

Une autre information qui nous paraît utile est de connaître l'impact du nombre d'entrepôts et du niveau de couverture sur la distance d'accès totale.

Question : *Comment varie la distance d'accès totale en fonction du nombre d'entrepôts (p) et du niveau de couverture (c) ?*

Pour répondre à cette question, nous faisons varier p et c tout en calculant la distance d'accès totale associée. Le temps de calcul est de l'ordre de la (fraction de) seconde dans tous les cas. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

$c \backslash p$	10	15	20	25	30
1	$so = 13994$	$so = 10319$	$so = 8279$	$so = 6753$	$so = 5519$
2	NS	$so = 33576$	$so = 27827$	$so = 24086$	$so = 21211$
3	NS	NS	$so = 55809$	$so = 47359$	$so = 42118$
4	NS	NS	NS	$so = 80119$	$so = 68429$
5	NS	NS	NS	NS	NS

Tableau 3.9: Turquie : variation de la solution optimale par rapport à p et c

Il ressort des résultats qu'il faut environ 25 entrepôts pour réaliser une couverture de niveau 4 pour une distance d'accès totale de 80 119 kilomètres. Lorsque le niveau de couverture augmente d'un niveau, pour un nombre d'entrepôts fixé, la distance d'accès totale double ou triple. La diminution de la distance d'accès totale est lente lorsqu'on augmente de 5 le nombre d'entrepôts pour un niveau de couverture fixé. La plus forte diminution est d'environ 12 000 kilomètres entre 25 et 30 entrepôts pour une couverture de niveau 4.

3.3 La deuxième variante du modèle humanitaire

Dans cette deuxième variante du modèle humanitaire, nous allons tester l'influence de la similarité entre les entrepôts et la distance d'accès totale. Nous utiliserons un programme en C++ (nommé `PMHVar2.cc`) qui fait appel à `CPLEX`. Il prend en paramètre le modèle de la deuxième variante, la matrice H , le nombre d'entrepôts que l'on souhaite localiser (p), le degré de similarité (s). Il nous renvoie les emplacements des entrepôts et la distance d'accès totale de ces derniers avec les groupes d'utilisateurs. Nous allons commencer par des exemples de bibliothèque ORLIB et ensuite nous passerons au réseau turc.

3.3.1 Données du problème de la p -médiane provenant d'ORLIB

Afin de tester la robustesse de `PNHVar2.cc`, nous effectuons des expériences numériques sur deux réseaux d'ORLIB. Le temps de calcul est de l'ordre de la (fraction de) seconde pour `pmed1`. En faisant varier s et p , nous obtenons les résultats suivants :

$s \backslash p$	64	65	66	67	68	69
25	$so = 502$	$so = 473$	$so = 430$	$so = 401$	$so = 373$	$so = 348$
30	$so = 502$	$so = 473$	$so = 430$	$so = 408$	$so = 389$	$so = 372$
35	$so = 513$	$so = 489$	$so = 467$	$so = 451$	$so = 443$	NS
40	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Tableau 3.10: `pmed1` : variation de la solution optimale par rapport à p et s

$s \backslash p$	40	45	50	55	60
20	$so = 3658$ $tps = 12.660$	$so = 3064$ $tps = 5.577$	$so = 2643$ $tps = 5.508$	$so = 2313$ $tps = 5.390$	$so = 2022$ $tps = 2.877$
40	$so = 3699$ $tps = 15.646$	$so = 3123$ $tps = 7.278$	$so = 2667$ $tps = 6.431$	$so = 2338$ $tps = 5.591$	$so = 2055$ $tps = 4.225$
60	NS	$so = 3184$ $tps = 11.481$	$so = 2737$ $tps = 6.850$	$so = 2395$ $tps = 9.840$	$so = 2123$ $tps = 5.587$
80	NS	$so = 3279$ $tps = 15.934$	$so = 2791$ $tps = 9.714$	$so = 2432$ $tps = 9.044$	$so = 2263$ $tps = 15.289$

Tableau 3.11: pmed10 : variation de la solution optimale par rapport à p et s

Pour des réseaux de 100 et 200 noeuds contenant respectivement 200 et 800 arcs, le temps de calcul ne dépasse pas 16 secondes. Le temps de calcul nous paraît raisonnable, nous pouvons l'appliquer au réseau turc sans nous soucier du temps de calcul.

3.3.2 Le réseau turc

Pour cette variante, la notion de degré de similarité maximale nous paraît un élément important.

Question : *Quel est le degré similarité maximal (et sa distance d'accès totale associée) si l'on souhaite localiser 20 entrepôts ?*

Puisque la plus petite distance est de 29 kilomètres, nous avons décidé de partir d'une valeur de s supérieure, par exemple 50 kilomètres. Dans le cas contraire, cela n'aurait aucun effet sur la solution. Le pas considéré entre chaque valeur de s est de 50 kilomètres. Le temps de calcul est de l'ordre de la (fraction de) seconde dans tous les cas. Nous obtenons les résultats suivants :

s	so
50	8279
100	8279
150	8312
200	8399
250	8832
300	10279
350	NS

Tableau 3.12: Turquie : variation de s pour $p = 20$

Nous savons que la distance moyenne est de 315 kilomètres, ce qui permet de comprendre un peu pourquoi on ne trouve pas de solution pour $s = 350$ kilomètres. En effet, plus l'on s'éloigne de la distance moyenne plus le nombre de sites potentiels pour localiser les entrepôts diminue sous cette contrainte de similarité. Nous notons de très faibles variations de la distance d'accès totale entre les valeurs de s comprises entre 50 et 250 kilomètres. Cependant, une relativement grande augmentation de la distance d'accès totale est observée pour des valeurs de s compris entre 250 et 300. Après calcul, nous constatons que la limite est atteinte à 331 kilomètres. Autrement dit, le degré de similarité maximal pour localiser 20 entrepôts est de 331 kilomètres pour une distance d'accès totale de 11427 kilomètres. Mais que se passe-t-il si l'on fait varier aussi le nombre d'entrepôts que l'on souhaite localiser ? Cette interrogation nous pousse à vouloir chercher des résultats plus complets.

Question : *Comment varie la distance d'accès totale en fonction du nombre d'entrepôts (p) et du degré de similarité ?*

Après de nombreux calculs (en faisant varier le nombre d'entrepôts p), nous observons que la tendance observée dans le tableau précédent semble se généraliser. En faisant varier le nombre d'entrepôts, nous observons que la distance d'accès totale ne varie pas

beaucoup pour des valeurs de s comprises entre 50 et 250 kilomètres. Ainsi, pour tenter de répondre à la question, seulement des valeurs de s égale à 50 et compris entre 250 et 400 kilomètres seront considérés avec un pas de 30 kilomètres. En ce qui concerne le nombre d'entrepôts, nous débuterons avec 7 car c'est la plus petite valeur pour laquelle nous obtenons des solutions, avec un pas de 1. Les résultats sont :

$s \backslash p$	7	8	9	10	11
50	$so = 19025$ $tps = 8.465$	$so = 16489$ $tps = 3.628$	$so = 15091$ $tps = 2.312$	$so = 13994$ $tps = 1.949$	$so = 13027$ $tps = 0.876$
250	$so = 19025$ $tps = 8.708$	$so = 16844$ $tps = 6.405$	$so = 15219$ $tps = 2.837$	$so = 14063$ $tps = 3.014$	$so = 13096$ $tps = 0.728$
280	$so = 19025$ $tps = 7.410$	$so = 16844$ $tps = 7.070$	$so = 15219$ $tps = 3.012$	$so = 14063$ $tps = 1.992$	$so = 13096$ $tps = 0.821$
310	$so = 19025$ $tps = 9.583$	$so = 16844$ $tps = 4.335$	$so = 15219$ $tps = 4.108$	$so = 14063$ $tps = 1.639$	$so = 13221$ $tps = 0.940$
340	$so = 19924$ $tps = 7.714$	$so = 16844$ $tps = 7.309$	$so = 15292$ $tps = 4.043$	$so = 14136$ $tps = 1.461$	$so = 13392$ $tps = 2.164$
370	<i>NS</i>	$so = 17316$ $tps = 9.390$	$so = 15423$ $tps = 4.206$	$so = 14250$ $tps = 1.755$	$so = 13506$ $tps = 2.452$
400	<i>NS</i>	$so = 17614$ $tps = 9.847$	$so = 15743$ $tps = 5.770$	$so = 14600$ $tps = 4.043$	$so = 13937$ $tps = 5.774$

$s \backslash p$	12	13	14	15	16	17
50	$so = 12269$ $tps = 1.000$	$so = 11514$ $tps = 0.532$	$so = 10871$ $tps = 0.595$	$so = 10319$ $tps = 0.366$	$so = 9862$ $tps = 0.364$	$so = 9428$ $tps = 0.600$
250	$so = 12393$ $tps = 0.838$	$so = 11695$ $tps = 0.704$	$so = 11102$ $tps = 0.653$	$so = 10681$ $tps = 0.624$	$so = 10267$ $tps = 0.694$	$so = 9878$ $tps = 0.631$
280	$so = 12393$ $tps = 1.054$	$so = 11695$ $tps = 0.674$	$so = 11102$ $tps = 0.446$	$so = 10713$ $tps = 0.668$	$so = 10382$ $tps = 1.036$	$so = 10034$ $tps = 0.554$
310	$so = 12523$ $tps = 1.232$	$so = 11945$ $tps = 1.530$	$so = 11486$ $tps = 1.635$	$so = 11013$ $tps = 1.535$	$so = 10568$ $tps = 1.292$	$so = 10128$ $tps = 0.573$
340	$so = 12805$ $tps = 2.031$	$so = 12435$ $tps = 5.010$	$so = 11927$ $tps = 6.044$	$so = 11557$ $tps = 3.878$	$so = 11311$ $tps = 4.082$	$so = 10997$ $tps = 3.219$
370	$so = 12919$ $tps = 2.812$	$so = 12634$ $tps = 5.339$	$so = 12136$ $tps = 4.049$	$so = 11840$ $tps = 5.247$	$so = 11477$ $tps = 2.823$	$so = 11427$ $tps = 2.010$
400	$so = 13243$ $tps = 5.075$	$so = 12723$ $tps = 4.177$	$so = 12222$ $tps = 2.634$	$so = 12294$ $tps = 3.630$	$so = 12511$ $tps = 5.661$	$so = 12819$ $tps = 1.009$

Tableau 3.13: Turquie : variation de la solution optimale par rapport à p et s

La distance d'accès totale subit une forte augmentation d'environ 10 000 kilomètres entre 7 et 17 entrepôts pour un degré de similarité fixé. Nous notons une faible augmentation de la distance d'accès totale lorsque le degré de similarité varie de 50 à 400 kilomètres pour un nombre d'entrepôts fixé. La plus élevée est de 3391 kilomètres pour 17 entrepôts.

CONCLUSION

Dans ce mémoire, nous avons essayé de mettre en application de nouvelles idées en logistique humanitaire. Souhaitant localiser des entrepôts en prévention à des catastrophes naturelles, nous avons construit une nouvelle matrice des "distances" H et appliqué le modèle de la p -médiane. La matrice H garantit que les entrepôts localisés seront assez proches des groupes d'usagers qui auront besoin d'aide. De plus, les arcs reliant les entrepôts et les groupes d'usagers seront fiables à au moins 50%. Deux variantes du modèle de la p -médiane sont présentés. La première prend en compte le niveau de couverture des groupes d'usagers, et la seconde, le degré de similarité entre les entrepôts. Des expériences numériques, en particulier celles du réseau turc, aideront le gestionnaire dans ces prises de décisions logistiques dont dépendent des vies humaines.

Parmi les limites de ce mémoire, nous pouvons citer la construction de la matrice de fiabilité F . En effet, elle est construite aléatoirement alors qu'elle devrait être le résultat de nombreux calculs qui prendraient en compte des aspects physiques, géologiques et naturels des arcs du réseau. En outre, nous avons supposé que les fiabilités étaient indépendantes alors que nous savons qu'en réalité elles ne le sont pas. Enfin, il nous manque des données topographiques afin de mieux définir la similarité entre deux entrepôts et la contrainte associée. On se limite à la mesure de la distance, ce qui ne paraît pas suffisant. Nous savons par exemple, du point de vue topographique, deux sites peuvent être à distance proche et avoir une très faible similarité.

Par la suite, plusieurs pistes pourraient faire évoluer ce travail qui ne fait qu'amorcer de nouvelles idées. Elles devraient se concentrer sur l'amélioration de la construction de la matrice H . Plus précisément, la construction de la matrice de fiabilité F qui nécessiterait l'utilisation d'outils probabilistes. De manière plus générale, les résultats pourront se

perfectionner si les données de départ sont meilleures. Autrement dit, si certaines mesures de prévention sont prises, par les responsables, la matrice F contiendra des valeurs plus élevées. Par conséquent, la distance d'accès totale entre les entrepôts et les usagers diminuerait ainsi que les temps de calcul. Parmi ces mesures de prévention, citons par exemple, la construction de routes et de bâtiments capables de résister à divers types de catastrophes naturelles.

RÉFÉRENCES

- [1] INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS (IPGP) :
<http://www.ipgp.fr/pages/04010401.php>
- [2] UNIVERS SCIENCE :
<http://www.universcience.fr/fr/science-actualites/actualite-as/wl/1248100228420/tsunami-retour-sur-le-raz-de-maree-du-26-decembre/>
- [3] INSU/CNRS :
<http://www.insu.cnrs.fr/terre-solide/catastrophes-et-risques/seismes/le-seisme-du-pakistan-du-8-octobre-2005-un-seisme-himal>
- [4] PERSPECTIVE MONDE - UNIVERSITE DE SHERBROOKE :
<http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMEve?codeEve=1108>
- [5] CHINE - INFORMATIONS :
http://www.chine-informations.com/guide/tremblement-de-terre-au-sichuan-du-mai_2221.html
- [6] INSU/CNRS :
<http://www.insu.cnrs.fr/terre-solide/catastrophes-et-risques/seismes/seisme-de-haiti-du-12-janvier-2010>
- [7] L'EXPRESS :
http://www.lexpress.fr/actualite/monde/ce-qui-distingue-le-seisme-du-japon-de-celui-d-haiti_971223.html
- [8] LE MONDE :
http://www.lemonde.fr/ameriques/article/2010/01/12/haiti-frappe-par-un-puissant-seisme_1290922_3222.html
- [9] EDUSCOL - ENS DE LYON :
<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-seisme-Sendai-Japon-2011.xml>
- [10] LIBERATION :
<http://www.liberation.fr/monde/01012325005-alerte-au-tsunami-au-japon-et-en-russie>
- [11] LE MONDE :
http://www.lemonde.fr/japon/article/2011/03/29/japon-le-bilan-humain-et-materiel-de-la-catastrophe_1500344_

1492975.html

- [12] V. BELANGER, A. RUIZ et P. SORIANO, "Déploiement et redéploiement de véhicules ambulanciers dans la gestion d'un service préhospitalier d'urgence", *INFOR*, à paraître.
- [13] G. O. WESOLOWSKY, "Dynamic Facility Location", *Management Science*, vol. 19, No. 11, 1973, pp. 1241-1248.
- [14] P. B. MIRCHANDANI et A. R. ODONI, "Locations of Medians on Stochastic Networks", *Transportation Science*, vol. 13, No. 2, 1979, pp. 85-97.
- [15] S. L. HAKIMI, "Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph", *Opns. Res.*, vol. 12, 1964, pp. 450-459.
- [16] J. R. WEAVER et R. L. CHURCH, "Computational Procedures for Location Problems on Stochastic Networks", *Transportation Science*, vol. 17, No. 2, 1983, pp. 168-180.
- [17] O. BERMAN et B. LEBLANC, "Location-Relocation of Mobile Facilities on a Stochastic Network", *Transportation Science*, vol. 18, No. 4, 1984, pp. 315-330.
- [18] K. HOGAN et C. S. REVELLE, "Concept and Applications of Backup Coverage", *Management Science*, vol. 32, No. 11, 1986, pp. 1434-1444.
- [19] M. L. BRANDEAU et S. S. CHIU, "An Overview of Representative Problems in Location Research", *Management Science*, vol. 35, No. 6, 1989, pp. 645-674.
- [20] R. BATTÀ. et N. R. MANNUR, "Covering-Location Models for Emergency Situations That Require Multiple Response Units", *Management Science*, Vol. 36, No. 1, 1990, pp. 16-23.
- [21] J. CURRENT, S. RATICK. et C. S. REVELLE, "Dynamic Facility Location When The Total Number of Facilities is Uncertain : A Decision Analysis Approach", *European Journal of Operational Research*, Vol. 110, 1997, pp. 597-609.
- [22] S. H. OWEN. et M. S. DASKIN, "Strategic Facility Location : A Review", *European Journal of Operational Research*, Vol. 111, 1998, pp. 423-447.
- [23] L. V. SNYDER. et M. S. DASKIN, "Reliability Models for Facility Location : The Expected Failure Cost Case", *Transportation Science*, Vol. 39, No. 3, 2005, pp. 400-416.
- [24] L. V. SNYDER, "Facility Location Under Uncertainty : A Review", *IIE Transaction*, Vol. 38, 2006, pp. 537-554.
- [25] O. BERMAN, D. KRASS et M. B. C. MENEZES, "Facility Reliability Issues in Network p -Median Problems : Strategic Centralization and Co-Location Effects", *Operations Research*, Vol. 55, No. 2, 2007, pp. 332-350.

- [26] L. V. SNYDER, M. S. DASKIN et C. TEO, "The Stochastic Model With Risk Pooling", *European Journal of Operational Research*, Vol. 179, 2007, pp. 1221-1238.
- [27] B. BALCIK. et B. M. BEAMON, "Facility Location in Humanitarian Relief", *International Journal of Logistics : Research and Applications*, Vol. 11, No. 2, 2008, pp. 101-121
- [28] O. BERMAN, D. KRASS et M. B. C. MENEZES, "Locating Facilities in the Presence of Disruptions and Incomplete Information", *Decision Sciences*, Vol. 40, No. 4, 2009, pp. 845-868.
- [29] N. GÖMEZ, M. KÖKSALAN et FS. SALMAN, "Locating Disaster Response Facilities in Istanbul", *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 62, 2011, pp. 1239-1252.
- [30] A. M. CAMPBELL et P. C. JONES, "Prepositioning Supplies in Preparation for Disasters", *European Journal of Operational Research*, Vol. 209, 2011, pp. 156-165.
- [31] E. IAKOVOU, C. M. IP, C. DOULIGERIS et A. KORDE, "Optimal Location and Capacity of Emergency Cleanup Equipment for Oil Spill Response", *European Journal of Operational Research*, Vol. 96, 1996, pp. 72-80.
- [32] S. WANG, B. R. SARKER, L. MANN. JR. et E. TRIANTAPHYLLOU, "Resource Planning and a Depot Location Model for Electric Power Restoration", *European Journal of Operational Research*, Vol. 155, 2004, pp. 22-43.
- [33] N. MLADENović, J. BRIMBERG, P. HANSEN et J.A. MORENO-PEREZ, "The p -median problem : A Survey of Metaheuristic Approaches", *European Journal of Operational Research*, Vol. 179, No. 3, 2007, pp. 927-939.
- [34] M. B. TEITZ et P. BART, "Heuristic Methods for Estimating The Generalized Vertex Median of a Weighted Graph", *Operations Research*, Vol. 16, 1968, pp. 955-961.
- [35] E. Q. V. MARTINS, M. M. B. PASCOAL et J. L. E. DOS SANTOS, "Deviation Algorithms for Ranking Shortest Paths", *International Journal of Foundations of Computer Science*, vol. 10, No. 3, 1999, pp. 247-261.
- [36] J. Y. YEN, "Finding The K Shortest Paths in a Network", *Management Science*, Vol. 17, 1971, pp. 712-716.
- [37] A. BELLABAS, M. MOLNAR, S. LAHOUD, "Heuristiques Pour Le Routage Multicritère", *MajecSTIC 2009*, Avignon-France, 2009.
- [38] ORLIB (OR Library) de John E. Beasley : <http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/orlib/files/>

- [39] R. K. AHUJA, T. L. MAGNANTI et J. B. ORLIN, "Network Flows : Theory, Algorithms, and Applications", *Prentice Hall*, 1993, pp 35-37.
- [40] S. DURAN, M. A. GUTIERREZ et P. KESKINOC AK, "Pre-Positioning of Emergency Items for CARE International", *Interfaces*, vol. 41, No. 3, 2011, pp. 223-237.
- [41] G. LAPORTE, "Cours de Distributique", *HEC Montréal*, 2010.