

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

OPTIMISATION D'UNE PARTIE DE LA CHAÎNE
D'APPROVISIONNEMENT DE DENRÉES ALIMENTAIRES AU NIGER : LE
CAS DU PROGRAMME ALIMENTAIRE MONDIAL

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE ÈS SCIENCES (TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION)

PAR

ELIZABETH GAUTHIER

JANVIER 2020

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.07-2011). 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

Dans un premier temps, je tiens à remercier mes directeurs de maîtrise, Claudio Contardo, Walter Rei et Marie-Ève Rancourt. Tous les trois vous avez cru en moi dès le début, en mes capacités à faire une différence et en mes compétences. Votre encadrement, vos conseils et votre confiance m'ont permis de continuer d'avancer dans mon projet. Je tiens aussi à remercier tous les professeurs durant mon parcours qui d'une façon ou d'une autre m'ont permis d'acquérir des nouvelles connaissances et compétences, en plus de toujours m'encourager.

Merci au CRSNG (Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada) pour la bourse qui m'a donné la possibilité de faire un stage de recherche suite à mon baccalauréat, ce qui m'a convaincu de continuer à la maîtrise et de poursuivre la recherche entamée durant ce stage. Merci au FRQNT (Fonds de recherche du Québec – Nature et technologies), qui m'ont remis une bourse qui m'a permis d'avoir un soutien financier stable durant ma deuxième année.

Je tiens à remercier infiniment la personne-responsable au PAM et toute son équipe, qui ont toujours été disponible pour répondre à nos questions et qui ont collaborés tout au long du projet. Ce projet est pour vous et j'espère qu'il vous aidera dans vos opérations futures.

Merci à ma famille et mes amis pour votre soutien et vos encouragements constants. Un merci particulier à Simon, merci de m'avoir soutenu pendant ces 3 années complètes, d'avoir écouté mes craintes, mes peurs et d'avoir toujours su continuer à m'encourager à persévérer dans ce grand projet; merci pour tout.



TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	v
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES ABRÉVIATIONS (ANGLAIS // FRANÇAIS)	x
RÉSUMÉ	xiii
ABSTRACT	xv
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I PROBLÉMATIQUE, QUESTION ET OBJECTIFS DE RE- CHERCHE	3
1.1 La problématique	5
1.1.1 Le processus complet d'acheminement de denrées alimentaires actuel	6
1.1.2 Les opérations de la chaîne d'approvisionnement à l'étude	11
1.2 La question de recherche	12
1.3 Les objectifs de recherche	12
1.3.1 Notre contribution	14
CHAPITRE II REVUE DE LITTÉRATURE	15
2.1 Logistique humanitaire	15
2.2 Particularités au niveau du transport en territoire africain	18
2.3 Outils d'aide à la décision	21
2.3.1 Modèles prescriptifs	22
2.3.2 Technologies facilitantes	28
CHAPITRE III APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	31

3.1	Collecte et analyse de données	32
3.2	Formulation, modélisation et résolution du problème	34
3.3	Test, analyse et validation des résultats avec des experts	43
3.4	Analyse multicritère	44
3.5	Fonctionnement de l'outil d'aide à la décision	46
	CHAPITRE IV RÉSULTATS DE L'ANALYSE MULTICRITÈRE	57
4.1	Explication des cas et instances analysés	57
4.2	Analyse des résultats	61
	4.2.1 Premier cas du PAM	63
	4.2.2 Deuxième cas du PAM	64
	4.2.3 Instances artificielles	67
4.3	Discussion et recommandations	71
	CHAPITRE V CONCLUSION	75
	ANNEXE A PROCESSUS COMPLET D'ACHEMINEMENT DE DEN- RÉES ALIMENTAIRES AU NIGER	79
	BIBLIOGRAPHIE	81

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Carte de l’Afrique de l’Ouest comprenant le pays à l’étude, le Niger, les corridors de transport et les EDP du Niger (LCA, 2014) . . .	7
1.2 Processus complet d’acheminement de denrées alimentaires au Niger	8
3.1 Graphe complet du réseau, avec contraintes de capacités, temps et coûts de transport et manutention	36
3.2 Installation UFFLP	47
3.3 Séparateur de décimal	48
3.4 Fenêtre principale	50
3.5 Validations	51
3.6 Fenêtre de données pour un contrat à long terme	52
3.7 Fenêtre de données pour un contrat à court terme	52
3.8 Options de soumission	54
3.9 Solution	54
3.10 Feuille Excel	55
4.1 Premier cas du PAM avec option de séparer le don	65
4.2 Deuxième cas du PAM avec option de séparer le don	67
4.3 Frontière de Pareto des 10 instances artificielles pour le temps maximal en fonction des coûts	70
4.4 Frontière de Pareto des 10 instances artificielles pour la somme des temps en fonction des coûts	70

LISTE DES TABLEAUX

Tableau		Page
3.1	Ensembles, paramètres et variables de décisions du modèle	38
4.1	Caractéristiques des transitaires des instances artificielles	60
4.2	Caractéristiques des cas analysés	60
4.3	Temps de résolution de l'outil pour l'analyse multicritère (1 331 solutions) de chaque instance (en secondes)	62

LISTE DES ABRÉVIATIONS (ANGLAIS // FRANÇAIS)

DEV Development operations

EDP Extended Delivery Points

EMOP Emergency operations

FDP Final Delivery Points

GCMF Global Commodity Management Facility

HCR Haut Commissariat des Nations Unies pour les réfugiés

IFRC International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies

OADMC Outil d'aide à la décision multicritère

ONU Organisation des Nations unies

PAM Programme alimentaire mondial

PRRO Protracted relief and recovery operations

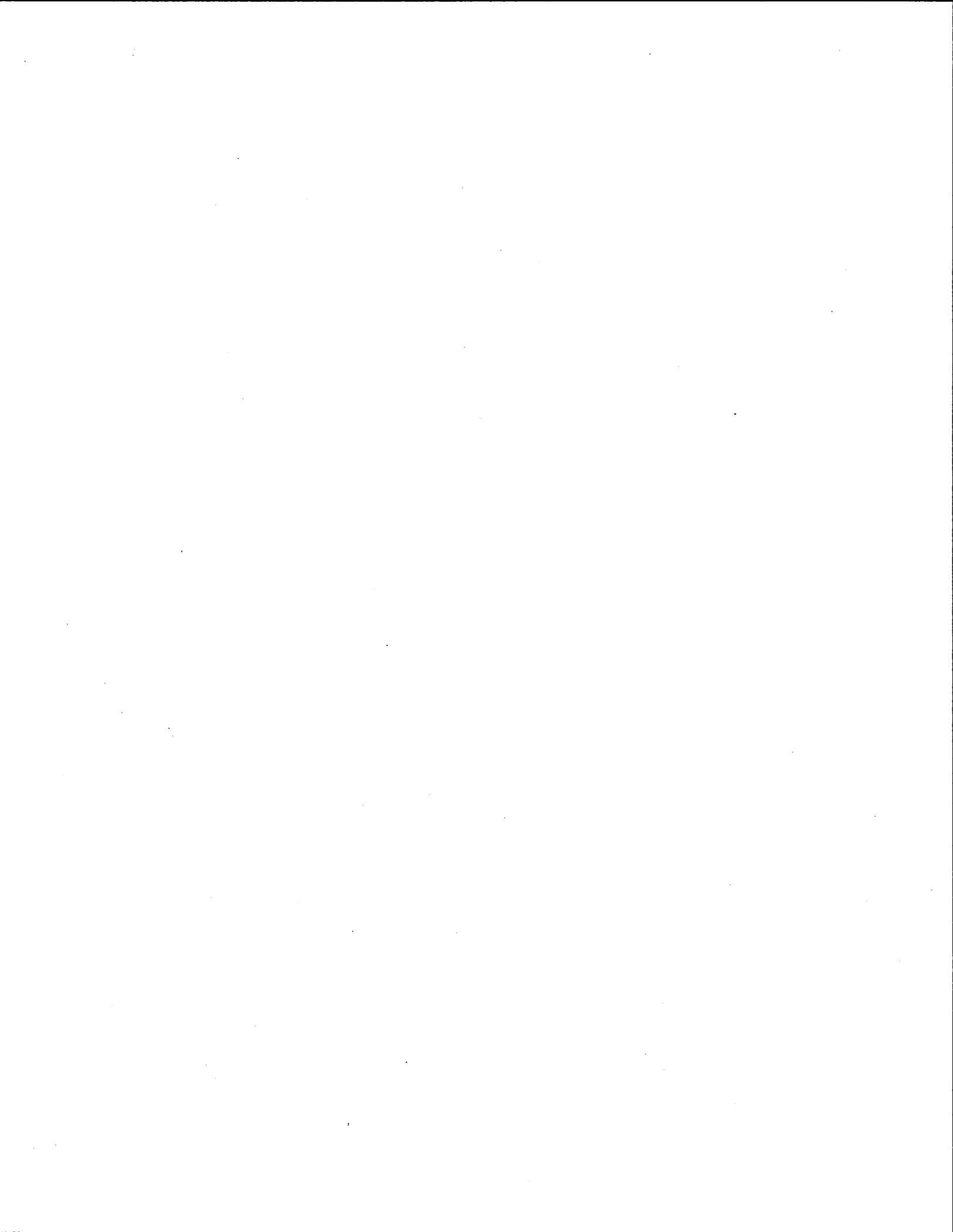
SO Special operations

WFP World Food Programme

RÉSUMÉ

Le Niger est un pays de l'Afrique de l'Ouest où plusieurs populations souffrent d'insécurité alimentaire et de malnutrition, notamment à cause de sécheresses récurrentes, de terres peu fertiles et de méthodes d'agriculture rudimentaires. De plus, plusieurs conflits persistent dans les pays voisins. Le Programme alimentaire mondial (PAM), l'organisme des Nations unies qui travaille à travers le monde pour contrer l'insécurité alimentaire chez les populations vulnérables, est présent dans ce pays depuis 1968. De l'assistance continue doit être effectuée auprès de certaines populations pour les aider à développer des mécanismes de survie et pour pouvoir nourrir les gens dans le besoin. Puisque le Niger est un pays enclavé, lorsque des denrées alimentaires viennent de l'international par bateau, le PAM doit faire transiger les denrées par un des ports des pays voisins et collaborer avec un transitaire régional. Ce projet, basé sur un cas réel, a permis de concevoir un outil permettant au PAM de prendre de meilleures décisions, concernant le choix du port et le choix du transitaire, pour acheminer leurs denrées alimentaires aux entrepôts des différentes régions du Niger en provenance des ports des pays limitrophes. Pour ce faire, un outil d'aide à la décision de type prescriptif comprenant un modèle d'optimisation multicritère a été développé pour soutenir les logisticiens. Le modèle a été analysé et validé avec des experts du domaine. De plus, une analyse multicritère a été effectuée. L'outil permettra d'appuyer les décisions des logisticiens au PAM et ainsi améliorer l'allocation de leurs ressources en terme de temps et d'argent.

Mots-clés : Logistique humanitaire, recherche opérationnelle, outil d'aide à la décision, chaîne d'approvisionnement, optimisation multicritère, PAM.



ABSTRACT

Niger is a country in West Africa where several populations suffer from food insecurity and malnutrition, mainly because of recurring droughts, low fertility land and rudimentary farming methods. In addition, several conflicts persist in neighboring countries. The World Food Programme (WFP), the UN Agency that works worldwide to address food insecurity among vulnerable populations, has been present in the country since 1968. Continued assistance is needed in certain populations to help them develop survival mechanisms and to feed people in need. Since Niger is a landlocked country, when food comes from abroad by boat, the WFP has to deliver food through one of the ports of the neighboring countries and collaborate with a regional forwarder. In this project, based on a real case, it was possible to develop a tool to help the WFP make better decisions, concerning the choice of the port and the choice of the forwarder, to transport their foodstuffs to the warehouses of the different regions in Niger, coming from ports in neighboring countries. To do so, a prescriptive decision support tool including a multicriteria optimization model was developed to support logisticians. The model has been analyzed and validated with domain experts. In addition, a multicriteria analysis has been carried out. The tool will support logisticians' decisions at WFP and thus improve the allocation of their resources in terms of time and money.

Keywords : Humanitarian logistics, operational research, decision support tool, supply chain, multicriteria optimization, WFP.

INTRODUCTION

Le Niger est un pays de l'Afrique de l'Ouest qui nécessite de l'assistance continue compte tenu de l'insécurité alimentaire et de la malnutrition. Depuis 1968, le Programme alimentaire mondial (PAM) travaille avec les populations nigériennes à cet effet. Puisque le Niger est un pays enclavé, lorsque des achats provenant de l'international et arrivant par bateau sont faits pour le Niger, les logisticiens du PAM doivent déterminer par quel port d'un des pays voisins les denrées devront transiter, en plus de déterminer un transitaire qui effectuera la manutention au port et le transport des denrées jusqu'aux entrepôts du Niger. Ces décisions sont cruciales pour le PAM, puisque les fonds sont restreints et que le temps de réception des denrées est un élément crucial pour la survie des populations. Il est donc important de se pencher sur ce problème et de proposer un outil d'aide à la décision pour le PAM, conçu spécifiquement pour le cas du Niger. Le présent projet vise à optimiser les opérations d'une partie de la chaîne d'approvisionnement (choix du port et choix du transitaire) de cet organisme pour permettre de nourrir plus de bénéficiaires au Niger ; améliorer les temps de réception des denrées alimentaires en tenant compte des coûts. Pour ce faire, un outil d'aide à la décision de type prescriptif comprenant un modèle d'optimisation multicritère a été développé : Outil d'aide à la décision multicritère (OADMC). Le mémoire est organisé comme suit : Le chapitre 1 fait place à la mise en contexte de la problématique, qui détaille le processus actuel d'acheminement de denrées alimentaire au Niger. Ensuite, la question et les objectifs de cette recherche sont présentés, ainsi que les contributions de ce mémoire qui seront autant au niveau scientifique, avec le modèle développé, que pratique, avec l'outil d'aide à la décision pour le

PAM, et social, grâce à l'optimisation des processus qui permettront d'acheminer plus efficacement les denrées aux gens dans le besoin au Niger. Le chapitre 2 dresse une revue de la littérature en lien avec le projet. Ce qui permet de positionner notre recherche et combler une lacune au niveau de la littérature, en éclaircissant ce qui a déjà été fait. Les thèmes abordés seront la logistique en aide humanitaire, le transport en Afrique et les outils d'aide à la décision. Pour les outils d'aide à la décision il y a d'un côté les modèles de type prescriptifs, plus précisément des modèles d'optimisation déterministes et multicritère, et de l'autre les technologies facilitantes, telle que les systèmes d'information. Le chapitre 3 détaille la méthodologie utilisée pour cette recherche, qui est séparée en cinq sections : la collecte et l'analyse de données ; la formulation, la modélisation et la résolution du problème ; les tests, l'analyse et la validation des résultats ; l'analyse multicritère ; l'explication du fonctionnement de l'outil d'aide à la décision. Le chapitre 4 détaille les deux cas envoyés par le PAM et la génération de données artificielles, ainsi que l'ensemble des résultats obtenus suite aux analyses multicritères et se termine avec une discussion et des recommandations sur l'utilisation de l'outil. Enfin, le chapitre 5 est la conclusion où l'on résume l'ensemble du projet, dont l'outil développé et les résultats obtenus grâce à celui-ci.

CHAPITRE I

PROBLÉMATIQUE, QUESTION ET OBJECTIFS DE RECHERCHE

L'aide humanitaire s'effectue pour « toute situation dans laquelle la survie, le bien-être, la santé ou les droits fondamentaux et la liberté de personnes, qu'il s'agisse de populations entières ou d'un groupe social en particulier, sont menacés » (traduction libre; Altay et Green, 2006). Différents types de catastrophes peuvent survenir pour que l'aide humanitaire soit nécessaire. Les catastrophes, qui peuvent être d'origines humaines ou naturelles, peuvent être classées en deux grandes catégories, soit les catastrophes soudaines et les catastrophes à évolution lente (Çelik *et al.*, 2012; Leiras *et al.*, 2014). Dans les catastrophes soudaines on retrouve, par exemple, les ouragans, les tremblements de terre, les tsunamis et les attaques terroristes. Pour ce qui est des catastrophes à évolution lente, on parle entre autres de sécheresses, de famines et de crises de réfugiés suite à des conflits ou des guerres. Ces dernières nécessitent souvent des projets à plus long terme auprès des populations touchées, comme de l'assistance continue pour distribuer des denrées alimentaires (Holguín-Veras *et al.*, 2012; Rancourt *et al.*, 2015).

La gestion des catastrophes se divise en quatre étapes : mitigation, préparation, réponse et récupération (Altay et Green, 2006; Coppola, 2015). Les deux premières phases sont effectuées préalablement au désastre tandis que les deux dernières sont considérées comme post-désastre. La phase de mitigation est l'étape où l'on tente

de réduire le risque d'occurrence et d'impact d'une catastrophe. La phase suivante sert à se préparer aux catastrophes éventuelles, entre autres en préparant et en formant les populations, mais aussi en faisant du pré-positionnement de fournitures de secours (nourriture, abris, produits sanitaires, etc.). Lorsque la catastrophe survient, c'est la phase de réponse qui est enclenchée. Des actions sont alors mises en place pour alléger l'impact de la catastrophe et les souffrances des victimes. La phase de récupération commence après la réponse immédiate à la catastrophe et elle continue jusqu'à ce que les victimes retrouvent un état de vie dit normal. Elle peut durer quelques mois, comme des années; après certaines catastrophes, des projets à long terme sont nécessaires pour soutenir les populations (opérations d'assistance continue). Selon Coppola (2015), c'est à cette phase qu'est attribué le plus de financement et que le plus d'acteurs différents sont impliqués. Par contre, c'est dans cette phase qu'il semble y avoir le moins de recherche (Altay et Green, 2006; Çelik *et al.*, 2012; Galindo et Batta, 2013).

Il est à noter que Çelik *et al.* (2012) mentionnent que les actions dans les différentes phases peuvent varier selon le type de catastrophe et Rancourt *et al.* (2015) précisent que pour un contexte de sécurité alimentaire, ces phases peuvent se chevaucher dans le temps.

Plusieurs acteurs contribuent à l'aide humanitaire en cas de catastrophe, entre autres, des organisations gouvernementales, non gouvernementales, privées, les militaires et des institutions financières (Balcik *et al.*, 2010; Leiras *et al.*, 2014; Coppola, 2015). Les catastrophes naturelles et de natures humaines sont autant couvertes par les organismes humanitaires que les catastrophes soudaines et à évolution lente; le spectre d'activités des organismes humanitaires est très large. L'Organisation des Nations unies (ONU) est celle qui est la plus impliquée dans toutes les phases d'une catastrophe, qui agit le plus rapidement et longtemps lors

d'une catastrophe, et ce, partout à travers le monde (Coppola, 2015). L'ONU est une grande famille qui comprend plusieurs agences, dont le Programme alimentaire mondial (PAM), qui a comme mandat de soulager la faim dans le monde en répondant aux besoins alimentaires des bénéficiaires. Le PAM effectue plusieurs types d'opérations : opérations d'urgence (EMOP ; pour des catastrophes soudaines, à évolution lente ou pour des situations complexes) ; opérations de secours et de récupération prolongées (PRRO ; pour permettre aux populations de se relever après une catastrophe) ; opérations de développement (DEV ; pour améliorer la sécurité alimentaire) et opérations spéciales (SO ; pour soutenir les opérations d'urgences en matière d'infrastructures) (Aviles *et al.*, 2008; WFP, 2018a). Cette organisation fonctionne exclusivement à l'aide de dons pour financer ses activités. Les dons peuvent être sous forme d'argent ou de biens (denrées alimentaires) et ils sont majoritairement effectués par des gouvernements, des états ou de grandes entreprises. Le PAM doit donc faire de la sollicitation pour avoir des dons, séparer les ressources pour des catastrophes dans différents pays, en plus de coordonner l'achat, l'entreposage, le transport et la livraison des denrées alimentaires. Il est donc très important que leurs opérations soient le plus optimal possible, pour leur permettre de bien répondre à leur mission, malgré des ressources restreintes.

1.1 La problématique

Le PAM, la division de l'ONU qui lutte contre l'insécurité alimentaire à travers le monde, travaille depuis 1968 au Niger pour soulager la faim et la malnutrition des populations en situation critique (WFP, 2018b). Le Niger est un pays enclavé de l'Afrique de l'Ouest qui nécessite de l'assistance continue dû à l'insécurité alimentaire et à la malnutrition ; pratiquement tous les types d'opérations (EMOP, PRRO et SO) sont présentement effectués au Niger (WFP, 2018a). En effet, le Niger est l'un des pays avec l'indice de développement le plus faible au monde. La

malnutrition chronique affecte 46% des enfants et plus de 10% des enfants en bas de cinq ans souffrent de malnutrition aiguë (WFP, 2016). Il y a près de 80% des ménages qui travaillent dans le secteur agricole et le climat est variable en raison de la saison des pluies et des sécheresses, ce qui rend l'agriculture difficile (WFP, 2016). Selon le Bureau de la coordination des affaires humanitaires (UNOCHA, 2010), c'est au moins une année sur trois que le Niger fait face à une crise alimentaire. De plus, plusieurs des pays voisins au Niger sont présentement en crise. Plusieurs réfugiés fuient leur pays en traversant au Niger et ils souffrent souvent de malnutrition (WFP, 2016).

Le PAM distribue des denrées alimentaires aux populations les plus vulnérables et tente d'instaurer des programmes afin d'améliorer les mécanismes de survie des populations nigériennes pour, entre autres, les aider à répondre elles-mêmes à leurs besoins et inciter les familles à envoyer leurs enfants à l'école (WFP, 2016).

1.1.1 Le processus complet d'acheminement de denrées alimentaires actuel

L'acheminement de denrées alimentaires doit se faire de manière efficace pour que les bénéficiaires puissent avoir la nourriture lorsque nécessaire. Le Niger étant un pays sans littoral, il faut passer par les ports des pays voisins pour acheminer la marchandise provenant de l'international vers le pays. Cette particularité constitue un défi pour le PAM qui doit déterminer dès la confirmation d'un don à quel port envoyer la marchandise, avec quel transitaire collaborer pour le transport, en plus de connaître les flux de marchandises jusqu'aux entrepôts au Niger. La figure 1.1 dresse un portrait de l'Afrique de l'Ouest et du Niger. Les trois ports d'entrés possibles sont identifiés, soit le port de Tema au Ghana, celui de Lomé au Togo et celui de Cotonou au Bénin, ainsi que les trois corridors de transport et les entrepôts régionaux (« Extended Delivery Points », EDP) au Niger.

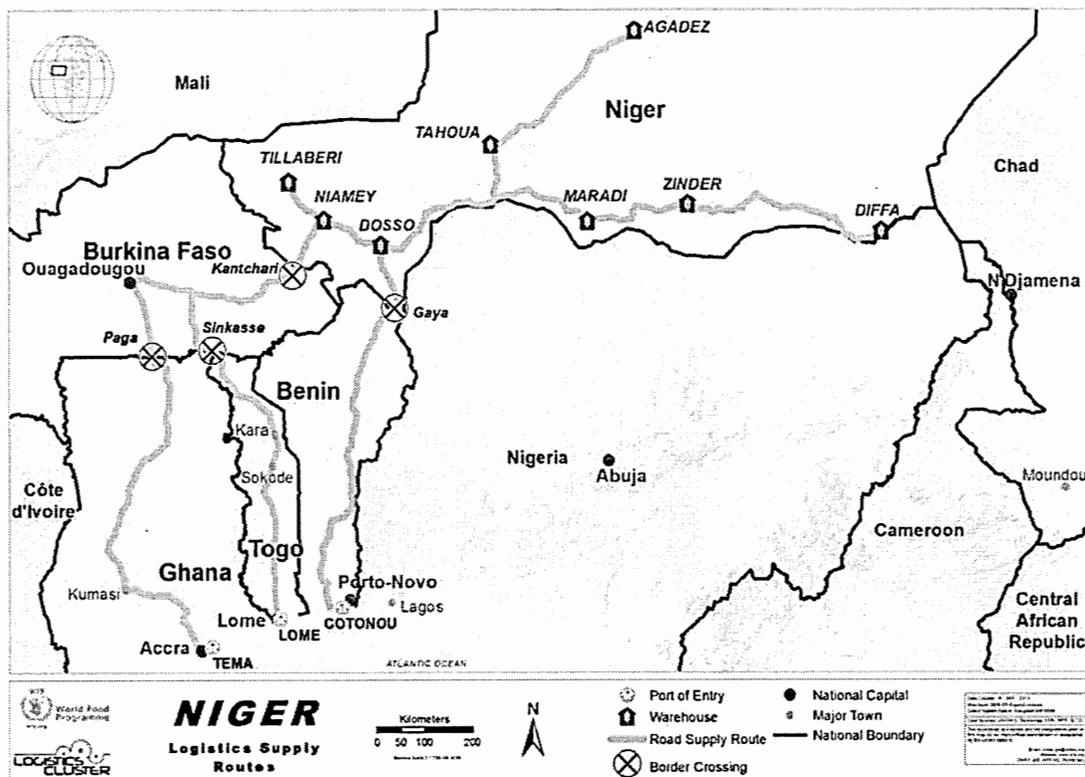


FIGURE 1.1 Carte de l'Afrique de l'Ouest comprenant le pays à l'étude, le Niger, les corridors de transport et les EDP du Niger (LCA, 2014)

Les informations quant au processus actuel d'acheminement de denrées alimentaires au Niger nous ont été fournies par notre personne ressource lors de différentes rencontres Skype. La figure 1.2 dresse la chronologie des étapes importantes dans le processus d'acheminement de denrées alimentaires au Niger, lorsque l'achat est fait à l'international. En Annexe A, le processus de la figure 1.2 est présenté sur une seule ligne, en format paysage.

Dans un premier temps, avec l'aide de partenaires au sein du pays, le PAM dresse une évaluation des besoins une fois par année, pour être en mesure de cibler les populations sensibles au Niger et identifier plus précisément lesquelles vont rece-

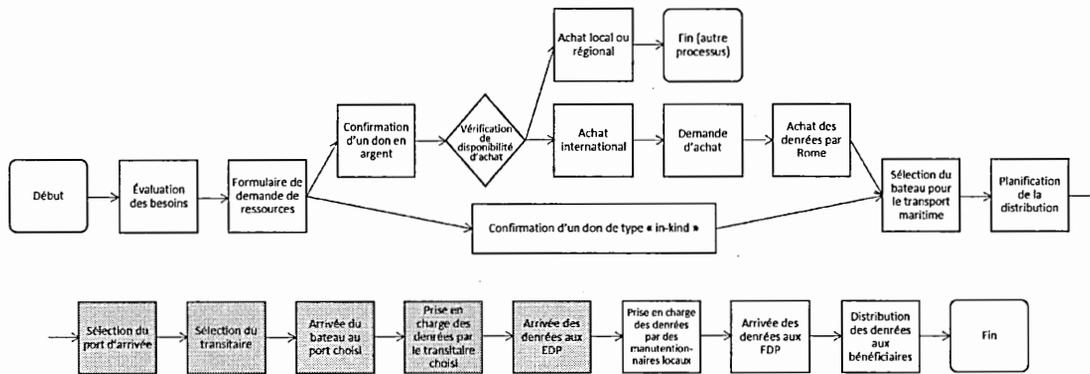


FIGURE 1.2 Processus complet d'acheminement de denrées alimentaires au Niger

voir de l'aide. Ce rapport est variable au courant de l'année, puisque la situation des populations peut changer. Avec cette analyse, il est possible pour les logisticiens d'établir une demande mensuelle par population. Par contre, un arbitrage doit être fait, entre envoyer trop de denrées ou pas assez ; dans les deux cas, cela peut être néfaste pour les populations. En effet, il faut être vigilant avec l'aide alimentaire, afin de ne pas ébranler les mécanismes de survie qui sont déjà en place dans les populations. Donner trop de denrées à une population pourrait rendre ses habitants dépendant à l'aide alimentaire. Par contre, s'ils ne reçoivent pas assez de denrées, il se pourrait que ce soit fatal.

Lorsque les logisticiens du PAM au Niger veulent faire des demandes de ressources en termes d'argent, ils doivent remplir un formulaire de demande de ressources. Il faut savoir que le financement au PAM se fait exclusivement sous forme de donations. Il peut y avoir des dons de biens (denrées alimentaires) ce qui vient majoritairement des États-Unis, ou des dons en argent. Ces dons en argent peuvent être de type direct, lorsque le donateur précise pour quel pays, projet ou activité son argent doit être utilisé, ou multilatéral, dans ce cas c'est le siège social du PAM à Rome qui détermine comment répartir l'argent. Le volume de donations

est constant année après année, puisque de la sollicitation est fait en permanence pour répondre à la demande, mais les périodes de réception de dons peuvent être très aléatoires.

Lorsqu'il y a une confirmation de don en argent pour le Niger, les logisticiens vérifient la possibilité d'acheter localement, régionalement ou internationalement. Le fait d'acheter localement ou régionalement, notamment en passant par le Global Commodity Management Facility (GCMF), permet de réduire les délais de livraison. Le GCMF est un entrepôt situé à Lomé qui entrepose certains types de denrées et où tous les pays de la région peuvent s'approvisionner. Si les denrées souhaitées ne sont pas disponibles au Niger ou dans la région, les logisticiens se tournent vers l'achat international. Pour ce faire, les logisticiens au Niger indiquent aux acheteurs à Rome quelle(s) commodité(s) ils ont besoin et en quelle quantité, grâce à une demande d'achat. Après avoir conclu l'achat des denrées, Rome détermine le bateau qui les transportera du pays d'achat vers l'Afrique de l'Ouest. Lorsqu'il y a une confirmation de don de denrées pour le Niger, puisqu'il n'y a pas d'étape d'achat, Rome détermine seulement sur quel bateau va aller la marchandise, puisque les dons de denrées viennent de l'international. Dans ce mémoire, nous nous concentrerons sur le cas des marchandises provenant de l'international, par don en argent ou en denrées.

Au moment où l'on confirme qu'une certaine quantité de denrées (un don) est en route pour le Niger, les logisticiens au Niger déterminent la quantité à envoyer à chaque entrepôts régionaux grâce à une planification de la distribution. Cette répartition est effectué en tenant compte de la quantité en route de chaque commodité, du pourcentage de bénéficiaires à nourrir et des rations journalières. Les logisticiens doivent déterminer le port d'arrivée, soit Cotonou, Lomé ou Tema, ainsi que la date d'arrivée du bateau au port choisi, de manière à acheminer les

denrées à temps pour faire la distribution aux bénéficiaires. Présentement, le choix du port est fait selon le niveau de congestion prévu aux ports lors de l'arrivée des denrées. Le port naturel du Niger, celui qui est le plus près, est Cotonou. Selon Nathan Associates Inc. (2013), les imports-exports du Niger passe principalement par le corridor de Cotonou. Pour ce qui est de la décision quant à la date d'arrivée au port choisi, les logisticiens du PAM au Niger prennent en compte le temps de déchargement du bateau, le temps de transport entre le port et les EDP, le temps de transport entre les EDP et les centres de distributions (« Final Delivery Points », FDP), ainsi que la date à laquelle les denrées doivent être distribuées aux bénéficiaires.

Après avoir choisi le port d'arrivée, les logisticiens doivent déterminer un transitaire qui s'occupera du transport, de la manutention et du dédouanement des denrées. Précédemment, il était possible d'avoir des transitaires différents pour effectuer le dédouanement et le transport routier. Par contre, le PAM a eu des problèmes et souhaite donc maintenant ne collaborer qu'avec un transitaire sur les deux niveaux. Le PAM a des contrats à long terme prédéterminés avec un transitaire à chacun des ports pour toutes cargaisons d'une certaine quantité en tonnes (λ) ou moins. Les contrats des transitaires stipulent leur capacité, les temps et les coûts de transport routier et de manutention, qui sont préétablis pour chaque EDP. Le transitaire est donc choisi automatiquement lorsque le choix du port est fait et que la quantité de denrées est de λ tonnes ou moins. Lorsque la quantité de denrées est supérieure à λ , Rome demande de faire des demandes de soumissions aux transitaires disponibles du port choisi afin de profiter de rabais sur quantité pour le grand volume à transporter. Dans ce cas, les transitaires indiquent les temps et les coûts de transport et de manutention pour les quantités exactes précisées pour chaque EDP dans leur soumission; ce sont donc des contrats à court terme. Dans les deux cas, le prix est le principal critère de sélection d'un

transitaire. De plus, la limite λ est actuellement fixée à 2 500 tonnes.

Les transitaires s'occupent donc de faire la manutention des denrées au port, entre le bateau et leurs camions, de transporter les denrées du port jusqu'à chacun des EDP au Niger selon ce qui a été préétabli dans la planification de la distribution, et du dédouanement pour le passage aux frontières. Pour pouvoir travailler avec le PAM, les transitaires doivent remplir un questionnaire, indiquer des clients en référence, démontrer leur capacité avec leur nombre de camions et d'employés, fournir des preuves qu'ils payent leurs impôts, fournir des informations sur comment ont été leurs derniers contrats et ils doivent prouver qu'ils sont enregistrés au port du pays où ils travaillent. Lorsque les denrées arrivent aux EDP, ce sont des manutentionnaires locaux qui les prennent en charge, pour ensuite les transporter jusqu'aux FDP. C'est donc au FDP que la distribution des denrées est faite aux bénéficiaires selon ce qui avait été prédéterminé dans l'évaluation des besoins et la planification de la distribution. La distribution aux FDP peut être faite plusieurs fois par mois, selon les besoins des bénéficiaires.

1.1.2 Les opérations de la chaîne d'approvisionnement à l'étude

Ce projet consiste à soutenir les logisticiens du PAM dans leur prise de décision en ce qui a trait au choix du port d'arrivée et au choix des transitaires, lorsque les denrées viennent de l'international. C'est donc sur la portion en gris de la figure 1.2 que notre analyse se concentrera : du moment qu'il y a confirmation qu'une certaine quantité de denrées (un don) est en direction du Niger jusqu'à ce que les denrées arrivent aux EDP indiquées dans la planification de la distribution de ce don. La prise de décision actuelle est séquentielle, en commençant par le choix du port pour ensuite faire le choix du transitaire. Pour pouvoir soutenir les logisticiens dans leur prise de décision, nous intégrerons les deux niveaux déci-

sionnels pour en avoir qu'un seul qui unifiera toutes les informations disponibles, ce qui permettra de générer une meilleure solution. En effet, le fait d'intégrer les deux niveaux décisionnels, permettra au PAM de connaître les prix proposés par tous les transitaires de la région, et non seulement ceux des transitaires d'un port préalablement choisi. Il sera donc possible de faire un arbitrage plus juste quant aux coûts et temps proposés par les transitaires pour faire le transport et la manutention des denrées jusqu'aux EDP.

1.2 La question de recherche

La question de recherche à laquelle nous souhaitons répondre est la suivante :
À l'aide de méthodologies de modélisation et d'optimisation, comment peut-on supporter la prise de décision grâce aux technologies de l'information pour une partie du processus d'acheminement de denrées alimentaire au Niger afin d'améliorer les temps de transport et de manutention tout en tenant compte des coûts ?

1.3 Les objectifs de recherche

L'objectif de cette recherche est de développer un outil d'aide à la décision prescriptif comprenant un modèle d'optimisation mathématique multicritère, afin de soutenir la prise de décision sur une partie de la chaîne d'approvisionnement du PAM pour le transport de denrées alimentaires de l'international vers le Niger. Les solutions obtenues permettront au PAM de prendre de meilleures décisions en termes de temps et/ou de coûts d'opérations pour permettre de nourrir le plus de bénéficiaires possible, le plus rapidement possible. Cet objectif peut se séparer en cinq objectifs sous-jacents, suivant les différentes étapes du projet :

- 1) Faire une collecte et une analyse des données pour comprendre l'étendue de la problématique ;

- 2) Formuler et modéliser le problème de façon réaliste en utilisant les principes de la recherche opérationnelle, c'est-à-dire à l'aide d'un modèle de programmation mathématique et multicritère ;
- 3) Résoudre le problème, analyser et valider les résultats obtenus pour s'assurer qu'ils soient admissibles pour le PAM ;
- 4) Faire une analyse multicritère pour évaluer certains arbitrages ;
- 5) Permettre la transférabilité de l'outil au PAM.

Le processus logistique étudié consiste à déterminer, dès la confirmation qu'une quantité de denrées est en direction du Niger, le port d'entrée des denrées (Ghana, Togo ou Bénin), le transitaire et les flux de marchandises jusqu'aux entrepôts (EDP) dans les différentes régions du Niger. Pour permettre de déterminer le meilleur chemin à prendre pour acheminer les denrées alimentaires des ports d'entrée vers le Niger, nous avons développé un outil d'aide à la décision comportant un modèle d'optimisation mathématique multicritère, selon les principes de la recherche opérationnelle. Pour pouvoir comprendre comment le modèle se comporte selon différentes situations, nous avons effectué une analyse multicritère (réduire le temps maximal de transport et manutention pour se rendre aux EDP, réduire la somme des temps de transport et manutention pour se rendre à tous les EDP et réduire les coûts). De plus, les résultats proposés par l'outil d'aide à la décision sont affichés dans une fenêtre dans le but d'être bien compris et utiles aux utilisateurs, présentant la solution proposée, la valeur des critères et le chemin des denrées. L'outil développé pour permettre d'appuyer les décisions du PAM à l'aide d'un modèle d'optimisation multicritère permet de répondre à une lacune dans la littérature (voir section 1.3.1) en plus d'avoir un impact social important pour les communautés nigériennes.

1.3.1 Notre contribution

À notre connaissance, aucune étude de cas se penche sur la conception d'un outil d'aide à la décision permettant l'optimisation multicritère d'acheminement de denrées alimentaires sur des corridors de transports vers un pays enclavé. Ce projet permettra donc de combler cette lacune. Notre contribution comporte trois volets : 1) le PAM au Niger bénéficiera d'un outil d'aide à la décision comportant un modèle d'optimisation multicritère, ce qui permettra une meilleure allocation des ressources provenant d'une réduction des coûts opérationnels ; 2) les populations nigériennes bénéficieront de cette efficacité, puisque cette meilleure allocation des ressources permettra de nourrir plus de gens avec des ressources restreintes et possiblement de sauver des vies ; 3) la communauté scientifique bénéficiera de la méthodologie pour la conception d'un outil d'aide à la décision et d'optimisation multicritère, qui pourrait être utilisée dans d'autres contextes similaires.

CHAPITRE II

REVUE DE LITTÉRATURE

Notre projet vise à développer un outil d'aide à la décision pour les logisticiens du PAM au Niger. Le développement de l'outil comporte plusieurs défis, puisqu'il doit tenir compte du contexte de la logistique humanitaire, pour un processus d'acheminement de denrées alimentaires en Afrique et intégrer un modèle d'optimisation multicritère. Dans la section 2.1 nous abordons les travaux touchant à l'aide humanitaire pour mettre de l'avant les ressemblances et les différences entre la logistique humanitaire et la logistique traditionnelle. La section 2.2 détaille les spécificités du transport en Afrique et pour terminer, les caractéristiques et les composantes des outils d'aide à la décision existants sont expliquées dans la section 2.3.

2.1 Logistique humanitaire

La logistique humanitaire est effectuée par des organismes pour venir en aide aux gens dans le besoin suite à des catastrophes (Altay et Green, 2006). Ces organismes gèrent notamment l'argent des donateurs, l'achat, l'entreposage, le transport et la distribution des denrées. Pour ces raisons, ils doivent faire face à plusieurs problèmes tel que des objectifs contradictoires, plusieurs parties prenantes et la rareté des ressources (Çelik *et al.*, 2012). La logistique humanitaire est un domaine de

plus en plus à l'étude, notamment, depuis des catastrophes naturelles comme l'ouragan Katrina (Anaya-Arenas *et al.*, 2014; Galindo et Batta, 2013; Campbell et Jones, 2011). Par contre, le manque de documentation est une des lacunes des organisations humanitaires, ce qui peut rendre difficile la compréhension et l'amélioration de leurs processus (Blecken, 2010). C'est aussi un de nos constats. Il y a très peu de documentation au sein du PAM par rapport à leurs processus. Pour en connaître plus sur leur processus, nous avons dû faire des entrevues. Olorun-toba et Gray (2006) proposent aux organisations humanitaires de s'inspirer des similitudes avec le secteur commercial en utilisant une approche « lean », qui vise la réduction du gaspillage et l'élimination des activités sans valeur ajoutée pour gérer les donations. Ils recommandent aussi une gestion agile pour la distribution des denrées aux bénéficiaires. Kovács et Spens (2007) se sont penchées sur la création d'un cadre qui permet de comprendre que la collaboration et la coordination sont primordiales entre les acteurs dans chacune des phases d'une catastrophe. Bien que la coordination des secours lors d'une catastrophe comporte son lot de défis, Balcik *et al.* (2010) notent que les pratiques actuellement utilisées, telles que l'achat collaboratif et l'entreposage avec des tiers, sont celles qui ont le plus de potentiel de réussite dans un contexte d'aide humanitaire. À cause d'un manque d'études de cas dans la littérature, plusieurs chercheurs tendent maintenant de s'associer à des organismes humanitaires afin de pouvoir développer des concepts et solutions concrets (p.ex. Aviles *et al.*, 2008; Alvarenga *et al.*, 2010; Jahre *et al.*, 2016; Dufour *et al.*, 2017). Dans ce projet, en proposant un outil d'aide à la décision, nous appuyons les gestionnaires dans leur processus actuel, mais nous leur proposons aussi de nouvelles façons de faire qui pourraient leur permettre de générer des économies. Notamment le fait que l'outil permette de faire un choix simultané (et non séquentiel) de port et de transitaire, mais aussi en laissant la possibilité de séparer le transport du don à plus d'un transitaire.

La logistique humanitaire comprend un très large spectre d'activités. Suite à une catastrophe soudaine, les activités logistiques de l'aide humanitaire sont très différentes de celles effectuées à des fins lucratives, puisque la demande n'est souvent pas bien connue et l'emphase est axée sur la bonne utilisation des ressources et la réduction des souffrances des bénéficiaires (Holguín-Veras *et al.*, 2012). Par contre, il y a certaines similitudes pour ce qui est de l'assistance continue, puisque tout comme dans le secteur commercial, la demande est généralement assez bien connue d'avance (Holguín-Veras *et al.*, 2012). Les opérations effectuées au Niger par le PAM sont de l'assistance continue, c'est pourquoi il est intéressant de comprendre quel genre de recherches ont déjà été effectuées sur ce type d'opérations. Une grande majorité des recherches se concentrent sur les catastrophes soudaines puisque ce sont des événements ponctuels plus facilement observables. Par exemple, plusieurs articles portent sur le prépositionnement de marchandises (Campbell et Jones, 2011; Dufour *et al.*, 2017), l'allocation de ressources suite à une catastrophe et sur la restauration d'un réseau endommagé par une catastrophe pour permettre la distribution de marchandise (Ransikarbum et Mason, 2016; Das et Hanaoka, 2014). Peu de recherches se sont intéressées au développement en continu auprès des populations touchées pour les aider à se rebâtir. C'est le cas de Jahre *et al.* (2016) qui ont évalué s'il est possible de combiner les activités de secours immédiats à ceux d'assistance continue pour améliorer les coûts et les temps de réponse des organisations. Étant donné les prévisions plus stables de l'assistance continue, ils ont été en mesure de proposer un modèle de programmation mathématique stochastique. À l'aide de scénarios, les auteurs ont déterminé les meilleures localisations d'entrepôts selon différents objectifs, en ce basant sur une étude de cas avec des données provenant du Haut Commissariat des Nations Unies pour les réfugiés (HCR). Ils ne prenaient toutefois pas en compte les contraintes de capacités dans leur modèle. C'est aussi le cas de Ran-

court *et al.* (2015), qui ont étudié la distribution de denrées alimentaires au Kenya pour le dernier mile (la portion des FDP jusqu'aux bénéficiaires) dans le cadre d'opérations d'assistance continue. Notre recherche tente donc de répondre à une lacune dans la littérature, en ajoutant un cas où les centres de recherche et les organismes humanitaires travaillent de pairs pour trouver des solutions concrètes pour améliorer leurs opérations et ainsi bonifier leurs méthodes de travail, notamment au niveau de l'assistance continue pour une certaine portion de la chaîne de transport, qui est somme toute peu étudiée.

2.2 Particularités au niveau du transport en territoire africain

Le processus complet à l'étude comprend du transport multimodal puisqu'il faut utiliser le transport par bateau vers l'Afrique et ensuite par camion une fois sur le continent. Le transport multimodal est de plus en plus commun grâce à la mondialisation. Il est défini par Crainic et Kim (2007) comme étant le transport d'une charge ou d'une personne à partir d'une origine jusqu'à une destination par une séquence d'au moins deux modes de transports différents et où le transfert se fait à un terminal. Les modes de transports peuvent être, entre autres, les bateaux, les trains, les camions et les barges. Un fait intéressant est qu'ils mentionnent que les temps de transports maritimes ont plus de variations que ceux des trajets routiers. Notre outil laisse la possibilité aux utilisateurs d'indiquer des temps et des coûts de transport maritime et terrestre, cependant nous ne faisons pas de distinction dans le modèle à savoir quel est le mode de transport. De plus, SteadieSeifi *et al.* (2014) ont présenté une revue de la littérature d'articles publiés entre 2005 et 2014, sur le transport multimodal. Ils ont classé les recherches selon leurs niveaux (stratégique, tactique ou opérationnel) pour en venir à la conclusion que se sont les décisions tactiques qui ont été le plus étudiées et celles opérationnelles le moins. Notre outil tente de répondre à cette lacune aussi, puisqu'il pourra

être utilisé au niveau opérationnel, mais aussi au niveau tactique, lors d'analyses par exemple. Aussi, une analyse sur l'utilisation des modèles de transport en logistique humanitaire dans les phases post-désastres a été faite par De La Torre *et al.* (2012). Ils mentionnent que toutes les catastrophes sont différentes et que les façons de faire des organisations peuvent différer au niveau du transport.

Selon Rancourt *et al.* (2014), les marchés de transport de marchandises en Afrique ne sont pas bien compris à cause d'un manque de données. Généralement, les organisations humanitaires n'ont pas de flotte de camions. Elles doivent donc faire affaires avec des compagnies locales pour le transport des marchandises (Balcik *et al.*, 2010; Sahinyazan *et al.*, 2017). Sahinyazan *et al.* (2017) ont développé un cadre pour permettre l'élaboration de contrats de transport plus flexibles entre les transitaires en Afrique de l'Est et les organisations humanitaires comme le PAM. Pour ce faire, ils ont pris le point de vue des transitaires. Les contrats entre les transitaires et le PAM en Afrique de l'Est sont généralement de six mois à un an, c'est pourquoi les transitaires augmentent souvent leur prix lors de soumissions pour compenser les fluctuations de prix sur le marché, principalement en raison du prix de l'essence. De plus, lorsque le marché est avantageux pour les transitaires, il est possible que ces derniers prennent d'autres contrats au lieu de remplir en priorité celui du PAM. En gardant ceci en tête il est facile de comprendre que les coûts mentionnés dans les offres de transport des transitaires peuvent être en réalité assez variables. Les structures de coûts sont différentes entre les pays en voie de développement et les pays développés. L'Afrique de l'Ouest et l'Afrique Centrale semblent être des cas extrêmes où 70% des coûts de transport sont variables, contrairement à l'Afrique de l'Est et à la France qui ont respectivement des coûts de transport variables à 60% et à 45% selon Teravaninthorn et Rabal-land (2009). La relation entre les prix de transport et les coûts logistiques serait influencée par plusieurs facteurs, comme les contrats verbaux et les demandes sai-

sonnières (Nathan Associates Inc., 2013). Aussi, les prix de services de transport peuvent varier d'un corridor de transport à l'autre et d'une destination à l'autre, notamment à cause des différents niveaux d'infrastructures routières, de sécurité et selon les saisons (Sahinyazan *et al.*, 2017). De plus, il semblerait que pour les pays enclavés les flottes de camions seraient trois fois plus grosses que nécessaire (Teravaninthorn et Raballand, 2009), le commerce serait en moyenne 30% plus faible (Arvis *et al.*, 2010) et les coûts de transport 50% plus élevés que pour les pays ayant accès à la mer (Nathan Associates Inc., 2013). De pauvres infrastructures routières, l'utilisation de vieux camions avec de grands coûts d'opération et un manque de professionnalisme de la part des transitaires, font partie des inefficacités notées par Nathan Associates Inc. (2013) sur le corridor de transport passant par Cotonou. Avec leurs modèles, Rancourt *et al.* (2014) ont étudié comment fonctionnent les tarifs de transport en Éthiopie en analysant les contrats de transport entre le PAM et les transitaires et d'après Rancourt *et al.* (2014), il n'y a pas de preuve claire qu'il est possible d'avoir des économies d'échelle lors du transport de grandes quantités de marchandises en Éthiopie. C'est aussi la conclusion de Sahinyazan *et al.* (2017) suite aux entrevues effectuées dans l'industrie du transport en Afrique de l'Est. Ceci nous permet de croire que pour une grande quantité de denrées, le PAM pourrait laisser plusieurs transitaires effectuer le transport d'un ton et, dans ce cas, il serait peut-être aussi possible de faire des économies.

Toutes ces études nous démontrent qu'il y a une multitude de facteurs qui peuvent influencer les variations de temps et de coûts pour les opérations du PAM en Afrique de l'Ouest. Bien que nous nous concentrons sur un modèle déterministe, il est important de connaître ces facteurs et de savoir qu'ils existent.

2.3 Outils d'aide à la décision

Avec les nombreuses données disponibles dans certains contextes et la capacité computationnelle grandissante des ordinateurs, il est aujourd'hui possible de développer des outils d'aide à la décision rapides et efficaces. Ces outils sont conçus pour soutenir les prises de décisions des gestionnaires et ils sont habituellement développés selon les besoins spécifiques des départements (Koutsoukis et Mitra, 2003; Shan et Yan, 2017). Ils sont développés autant pour des niveaux stratégiques, tactiques qu'opérationnels, mais ils se concentrent majoritairement sur les activités de gestion au niveau tactique (Koutsoukis et Mitra, 2003). Selon Blanning (1979) un outil d'aide à la décision sert à supporter une ou plusieurs des fonctions suivantes : La sélection de données, l'agrégation de données, l'estimation de paramètres dans une probabilité de distribution, la simulation de décisions, l'égalisation de décisions ou encore l'optimisation de décisions. Dans notre cas, l'outil permettra d'optimiser des décisions et il pourrait aussi être utilisé pour faire des simulations. En effet, il serait possible pour le PAM d'effectuer plusieurs tests avec les données reçues par les transitoires en mettant des poids différents sur les objectifs pour faire des simulations et voir les différentes options proposées par l'outil. D'après Koutsoukis et Mitra (2003), les actions prises par un preneur de décision sont influencées par des facteurs externes et les outils d'aide à la décision permettent d'évaluer les conséquences de ces actions. Ils comportent, entre autres, des modèles de prises de décision et des technologies facilitantes (Koutsoukis et Mitra, 2003). Les modèles de prises de décisions peuvent être séparés en trois catégories, soit les modèles descriptifs, normatifs et prescriptifs. Dans les modèles descriptifs, on décrit comment sont les choses; dans les modèles normatifs, on décrit la solution idéale; et dans les modèles prescriptifs, on assiste le preneur de décision pour améliorer ses habiletés et converger le plus possible vers

le modèle normatif. En général, les modèles d'optimisation et de recherche opérationnelle sont considérés comme des modèles prescriptifs (Koutsoukis et Mitra, 2003). Puisque notre outil veut proposer des solutions grâce à un modèle d'optimisation et appuyer les prises de décision, la section 2.3.1 se concentre sur les modèles prescriptifs proposés dans la littérature et qui sont en lien avec notre problématique, soit les modèles prescriptifs déterministes et multicritères. Pour qu'un outil d'aide à la décision soit complet, il doit aussi comprendre une interface permettant une interaction pratique avec l'utilisateur (Koutsoukis et Mitra, 2003; Shim *et al.*, 2002; Shan et Yan, 2017). La section 2.3.2 détaillera les technologies qui peuvent être utilisées à cette fin.

2.3.1 Modèles prescriptifs

Les modèles d'optimisation prescriptifs servent à améliorer les habiletés de prise de décision d'un utilisateur en recommandant une solution le plus près possible de la solution idéale (Koutsoukis et Mitra, 2003). Il y a différentes catégories de modèles d'optimisation, entre autres, les modèles déterministes et stochastiques. Les modèles déterministes utilisent l'hypothèse que l'information nécessaire à l'instanciation des paramètres est juste, disponible et accessible (Leiras *et al.*, 2014). Les modèles stochastiques supposent que l'information est disponible et accessible, mais qu'elle peut varier selon des phénomènes aléatoires en suivant une certaine distribution (Leiras *et al.*, 2014). Dans le cas présent, nous abordons notre problème de façon déterministe, il est donc important de se référer à ce qui a déjà été fait dans la littérature à ce niveau. Avec les deux types de modèles, il est possible d'avoir plusieurs objectifs et que ces derniers soient contradictoires (Ehrgott, 2005), c'est pourquoi nous détaillerons ce qui a été fait à ce sujet, plus précisément dans un contexte de logistique humanitaire. Les modèles mathématiques permettent de résoudre différents types de problèmes. Pour ce qui est des pro-

blèmes de logistique en recherche opérationnelle, il est possible de les séparer en trois catégories, soit la localisation d'entrepôts, la gestion d'inventaire et le flux dans un réseau (Leiras *et al.*, 2014). Nous nous concentrerons sur les problèmes de flux dans le réseau, puisque notre modèle se situe dans cette catégorie et plus précisément sur les modèles de distribution de denrées ou de fournitures de secours dans le contexte humanitaire.

Modèles déterministes de distribution de denrées alimentaires

Les modèles déterministes, bien qu'ils ne représentent pas toutes les variations possibles de la réalité, permettent de résoudre des problèmes complexes et de proposer des solutions réalisables aux organisations humanitaires. En logistique humanitaire, une distinction est souvent faite pour les modèles de flux concernant le dernier mile et les autres modèles de transport. Le dernier mile est la portion du réseau de transport où la distribution des fournitures de secours ou des denrées est faite aux bénéficiaires. Dans le cas à l'étude, c'est la portion avant le dernier mile qui est étudié, soit le transport des denrées du point d'achat jusqu'aux EDP. La distribution des denrées alimentaires sur le dernier mile (des FDP aux bénéficiaires) a été étudiée de manière déterministe par Balcik *et al.* (2008) et Rancourt *et al.* (2015). Avec leur modèle de programmation mathématique à deux phases qui détermine les calendriers de livraison par camions aux bénéficiaires, Balcik *et al.* (2008) ont résolu un petit réseau comprenant quatre noeuds de demande et deux véhicules, optimalement. Dans la première phase, les routes candidates entre les FDP et les bénéficiaires (aussi appelé points de demande) sont déterminées. Ensuite, ces informations sont utilisées dans la deuxième phase pour déterminer le volume de marchandise qui transige vers les destinations, et ce pour chaque véhicule. Pour le PAM au Niger, l'organisme n'a pas à déterminer les routes des transitaires. Par contre, les bénéficiaires doivent souvent marcher jusqu'aux FDP

pour avoir accès à l'aide alimentaire, c'est pourquoi Rancourt *et al.* (2015) se sont penchés sur la localisation des FDP, la détermination de la quantité à envoyer dans chaque FDP, ainsi que l'affectation des populations aux FDP. Ils ont résolu leur modèle en prenant en compte du bien-être de toutes les parties prenantes impliquées dans la distribution. Pour avoir une unité de mesure équivalente, les différentes fonctions d'utilité ont été calculées en monnaie locale (coûts d'opérations, coûts de transport et coûts d'opportunité des bénéficiaires). Malgré le fait que ce soit pour une portion différente du réseau, ces modèles mettent en lumière les possibilités d'optimisation des routes et des entrepôts pour la distribution de denrées. Pour ce qui est du transport des ports aux entrepôts, Alvarenga *et al.* (2010) ont étudié des routes de camions de façon déterministe. Ils ont développé un outil pour le PAM afin d'optimiser l'itinéraire des routes de camions sur certains corridors pour acheminer de l'aide alimentaire en Afrique de l'Est. Leur outil comprenait deux modèles. Le premier était un modèle de simulation, fait à l'aide de scénarios pour les mouvements du port. Le second permet d'optimiser les routes des camions en se basant sur les résultats des scénarios aux ports, considérés dans ce modèle comme des données déterministes. Ce travail de recherche est celui se rapprochant le plus du nôtre, puisqu'il tente d'optimiser des routes pour le transport de denrées alimentaire en Afrique, en collaboration avec le PAM. Ce qui différencie notre projet de celui d'Alvarenga *et al.* (2010) est que nous souhaitons optimiser l'acheminement d'un don précis. En effet, nous ne voulons pas optimiser les routes, mais bien optimiser le choix du meilleur transitaire pour le transport d'un don. Nous n'avons pas les informations quant aux opérations aux ports, ni les capacités des transitaires lors de la réalisation du contrat, et donc nous n'avons pas de composante de simulation. Aussi, dans notre cas, la quantité du don en chemin détermine si le transitaire est connu (don de λ tonnes ou moins) ou si des transitaires vont faire des offres de transport pour une quantité de don

en particulier (don de plus de λ tonnes). Donc les transitaires ne sont pas nécessairement connus d'avance, ni les temps et coûts de transport et manutention prévus pour la quantité totale du don, d'un port en particulier jusqu'aux EDP. De plus, nous considérons que les denrées ne peuvent pas être entreposées au cours du transport terrestre. Un modèle mathématique a aussi été fait pour l'ensemble de toutes les opérations du PAM par Aviles *et al.* (2008). Ils ont étudié les procédures du PAM, notamment au niveau financier (types de dons, temps de réception de dons, sources financières, etc.) pour comprendre l'ensemble du réseau d'approvisionnement de leurs projets de développement et d'urgence. Ils ont pu comparer des décisions antérieures du PAM avec leur modèle et ils ont, entre autres, évalué qu'avec des coûts additionnels de 3,32%, il serait possible de déplacer 36,8% de commodités additionnelles.

Modèles multicritères en logistique humanitaire

L'optimisation multicritère doit être utilisée lorsque, pour un même problème, il y a plusieurs objectifs et qu'ils sont contradictoires (Ehrgott, 2005). Dans notre modèle, les objectifs sont en terme de coûts et de temps et ces deux éléments entrent en conflit lorsqu'on tente de les optimiser. En effet, si on veut minimiser les coûts de transport et manutention, les temps associés vont nécessairement être plus élevés et si on souhaite minimiser les temps de transport et manutention, ce sera plus cher. Puisque notre modèle doit optimiser les coûts et les temps de transport et manutention simultanément, il est nécessaire de développer un modèle multicritère et faire une analyse sur ces critères. Plusieurs auteurs se sont penchés sur l'analyse de préférences d'objectifs selon des experts, c'est le cas de Gralla *et al.* (2014) et de Haavisto et Goentzel (2015). Gralla *et al.* (2014) ont évalué les préférences d'experts sur les objectifs contradictoires en distribution d'aide humanitaire. Pour ce faire, ils se sont basés sur une enquête faite auprès de

18 logisticiens travaillant au sein du *Logistics Cluster*, en étudiant un scénario de tremblement de terre. Cinq attributs-clés ont été pris en compte, soit la quantité de marchandise livrée, la priorisation par type de produits, la priorisation des emplacements, la rapidité de livraison et les coûts opérationnels. Chaque attribut-clé a été divisé en trois facteurs. Les logisticiens devaient répondre à trois types de questions : 1) indiquer leur préférence dans les attributs 2) évaluer des profils individuels et 3) faire un choix de profil selon une série de tâches. Gralla *et al.* (2014) ont montré que l'attribut le plus valorisé était la quantité de marchandise livrée et celui le moins valorisé était les coûts. De leur côté, Haavisto et Goentzel (2015) ont trouvé, grâce à une étude longitudinale de deux ans, qu'il peut être difficile de mesurer la performance dans un contexte humanitaire multicritère, notamment parce que les indicateurs de performance ne sont pas définis de la même façon par tous les employés. Pour le personnel qui travaille dans le domaine de la chaîne d'approvisionnement, c'est la qualité des livraisons qui est priorisée et l'efficacité au niveau du temps est au dernier rang. À l'opposé, le personnel des autres domaines (p.ex. personnel en charge des programmes d'évaluation des besoins, de planification et de coordination avec les parties prenantes) met l'efficacité au niveau du temps au premier rang. Les études semblent toutes aller dans le même sens en indiquant que la valorisation des critères dépend du rôle du preneur de décision. Ceci nous pousse à croire qu'il est important de laisser le preneur de décision indiquer lui-même l'importance d'un critère par rapport à un autre lorsqu'il souhaite optimiser des critères qui sont opposés.

Il existe aussi des modèles pour résoudre les problèmes comprenant plusieurs objectifs. Il est possible de normaliser la fonction objectif pour trouver des solutions non-dominées ou encore de mettre des poids sur chaque objectifs pour noter leur importance dans une fonction, en utilisant l'approche par somme pondérée d'objectifs. Dans le cas de catastrophes soudaines, des routes ou des infrastructures

peuvent être touchées. En se basant sur un scénario de tremblement de terre, Ransikarbum et Mason (2016) se sont penchés sur la compréhension de l'arbitrage dans les objectifs lorsqu'on doit tenir compte des routes ou des entrepôts à restaurer en plus du budget, pour pouvoir rejoindre des populations. Leurs résultats démontrent qu'il y a plus de flexibilité dans le modèle lorsqu'il y a un budget commun pour la restauration et la distribution. Leur modèle permet à l'utilisateur d'accorder plus ou moins d'importance aux différents objectifs avec des poids. Il faut tout de même noter que, dépendamment des préférences déclarées par l'utilisateur, des solutions différentes peuvent permettre d'atteindre de bons objectifs pour certains au détriment des autres. Par contre, Tofghi *et al.* (2016) notent que si l'objectif multicritère est normalisé, le changement d'importance sur un objectif ne changera pas nécessairement le résultat.

Une autre façon de traiter les problèmes multicritère est de résoudre chaque objectif séparément pour ensuite reformuler un seul objectif, qui minimise la somme de la différence normalisée entre chaque objectif et leur valeur optimale correspondante. Cette méthode s'appelle le « Compromise Programming » (Bozorgi-Amiri *et al.*, 2013). Bozorgi-Amiri *et al.* (2013) l'ont utilisé dans leur modèle à deux phases de planification de distribution après une catastrophe, avec les objectifs de minimiser la somme des coûts des deux phases (inventaire, transport, entreposage, pénuries, pénalités d'infaisabilité et variabilité des coûts) et de maximiser la satisfaction des personnes aux zones affectées (minimiser les pénuries). Il est aussi possible de déterminer l'arbitrage entre des objectifs en utilisant leur frontière de Pareto. Jahre *et al.* (2016) ont utilisé la frontière de Pareto avec leurs objectifs de minimiser les coûts et de minimiser les temps. Ceci leur a permis d'avoir des solutions efficaces et non-dominées pour leur modèle, qui incorpore les activités de développement continu et d'urgence. Pour considérer les temps, les coûts et ces deux éléments à la fois dans leur outil, Alvarenga *et al.* (2010) ont

utilisé l'optimisation multicritère. Les utilisateurs (gestionnaires) peuvent ajuster la fonction objectif selon leurs besoins en faisant un choix parmi les trois possibilités. La frontière de Pareto permet de cerner les solutions non-dominées et de comprendre comment réagissent les objectifs contradictoires entre eux et selon quelle tendance.

Des différentes techniques pour analyser les problèmes multicritères, l'approche par somme pondérée est celle que nous avons utilisé dans le cadre de notre modèle. En utilisant cette technique, il est possible pour l'utilisateur d'ajuster facilement le poids sur les critères et d'avoir une certaine flexibilité sur le type de solution qu'il souhaite obtenir.

2.3.2 Technologies facilitantes

Les technologies facilitantes sont utilisées dans les outils d'aide à la décision pour arriver à un but précis. Elles permettent aussi de faciliter la transmission d'informations (Koutsoukis et Mitra, 2003). Dans notre cas, la technologie facilitante qui devra être utilisée est le système d'information, ce qui permettra de résoudre une problématique, ainsi que de présenter l'ensemble des résultats dans un outil.

Les systèmes d'information

L'intelligence d'affaires est un domaine qui est assez large et dans leur papier de 2010, Foley et Guillemette (2010) ont voulu comprendre les disparités existantes entre la définition et la compréhension de ce concept dans le but d'avoir une vue globale de son étendue. Ils mentionnent que l'objectif principal de l'intelligence d'affaires est de supporter les gestionnaires dans leurs prises de décision. Ils la définissent comme étant une combinaison de processus, de culture et de technologies

permettant de recueillir des informations, les manipuler, les entreposer, les analyser pour des données provenant de sources externes ou internes. Tout cela pour communiquer de l'information et créer de la connaissance en renseignant les prises de décision (Foley et Guillemette, 2010). En effet, Koutsoukis et Mitra (2003) le mentionnent aussi, lorsque des données sont transformées, on crée de l'information et ultimement de la connaissance. Comme dans notre cas, les données constituent l'intrant de notre modèle, elles sont transformées dans un modèle mathématique pour générer de l'information et ensuite l'extrant présenté à l'utilisateur constitue de la connaissance. Comme plusieurs auteurs le mentionnent (Koutsoukis et Mitra, 2003; Shim *et al.*, 2002; Shan et Yan, 2017), pour qu'un modèle soit complet il est nécessaire que l'extrant soit communiqué aux utilisateurs qu'ils puissent en bénéficier dans la prise de décision. De façon plus spécifique, les outils d'aide à la décision sont conçus pour supporter des décisions précises, contrairement à l'intelligence d'affaire qui permet de supporter des décisions au niveau de l'organisation au complet (Foley et Guillemette, 2010). Selon Foley et Guillemette (2010), tout le monde s'entend pour dire que l'intelligence d'affaires génère des bénéfices intangibles, par contre dans la littérature on retrouve quatre bénéfices mesurables souvent mentionnés, soit la réduction des coûts, de meilleures solutions qui vont engendrer de meilleurs revenus, un gain de temps et éviter certains coûts. Les outils développés servent à faciliter l'analyse de certaines données et aider les gestionnaires dans leurs prises de décision, et non à les remplacer (Park *et al.*, 2010). À la fin de cette recherche, nous livrerons un outil au PAM qui permettra de les appuyer dans leurs décisions pour les choix du port et des transitaires lors d'acheminement de denrées provenant de l'international. Pour faire un tableau de bord dans notre outil, il est possible de travailler avec différents logiciels, comme Excel ou Tableau (Schulz et Heigh, 2009; Kokina *et al.*, 2017). Les indicateurs de performance utilisés dans un outil sont aussi très importants. C'est pourquoi

Schulz et Heigh (2009) ont partagé leur méthode de conception pour leur outil de développement d'indicateurs. Cet outil a été conçu pour la Fédération internationale des Sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge (IFRC). Selon eux, l'implication des utilisateurs dans les premières phases de développement de l'outil est nécessaire pour aider à ce que l'outil soit accepté. Dans notre cas, l'interface pour l'entrée de données et pour la présentation des résultats a été conçu à l'aide de fenêtres dans Excel. La facilité d'utilisation des fenêtres permettra à un plus grand nombre d'utilisateurs de pouvoir utiliser facilement l'outil. Puisque notre modèle propose à l'utilisateur d'employer un certain transitaire pour une certaine quantité de denrées, seule cette information est nécessaire, il n'est pas essentiel d'ajouter des graphiques directement dans l'interface. Par contre, pour faire un suivi des différents résultats, il sera facile pour l'utilisateur de créer les tableaux ou les graphiques qu'il souhaite dans Excel pour voir l'évolution de ses décisions passées.

CHAPITRE III

APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Le PAM nous a approché avec une problématique reliée à l'acheminement de denrées alimentaires vers le Niger. L'objectif de ce mémoire est de développer un outil (OADMC) permettant de supporter les preneurs de décision dans l'optimisation de leurs opérations en considérant jusqu'à trois critères, soit le temps maximal pour se rendre aux EDP, la somme des temps pour arriver aux EDP et la somme des coûts.

Une méthodologie éprouvée pour concevoir des outils d'aide à la décision de type prescriptif est la science du design (Gregor et Hevner, 2013). Cette méthodologie permet de suivre des étapes concrètes pour résoudre des problèmes en lien avec les systèmes d'information en plus de s'assurer de l'applicabilité des solutions générées (Von Alan *et al.*, 2004). Comme le mentionne Peffers *et al.* (2007), dans cette méthodologie il est important de concevoir un artefact (soit un système d'information) qui adresse un problème concret, qui sera utile et de qualité. Les systèmes d'information permettent d'améliorer l'efficacité des organisations et c'est pourquoi elles sont si importantes (Von Alan *et al.*, 2004). La méthodologie se divise en six étapes, soit l'identification du problème et les motivations pour le résoudre, la définition d'objectifs pour la solution, le développement, la démonstration, l'évaluation et la communication (Peffers *et al.*, 2007). Nous avons adapté

cette méthodologie à notre cas qui est étroitement lié à la recherche opérationnelle. Premièrement, nous avons fait une collecte et une analyse de données, qui correspondent aux deux premières étapes de Peffers *et al.* (2007). C'est lors de cette étape que nous avons rassemblé les informations pour entre autres comprendre l'étendue du problème et le type de solution requis. Deuxièmement, l'étape de développement comprend un sous-ensemble d'étapes au niveau de la recherche opérationnelle, nous avons donc nommé la deuxième étape la formulation, la modélisation et la résolution du problème. Troisièmement, la démonstration s'est faite grâce aux tests effectués dans l'OADMC avec des données réelles provenant de cas du PAM et des données artificielles générées à partir des données du PAM. Quatrièmement, l'évaluation a pu se confirmer avec les analyses multicritères. Dernièrement, la communication se fait grâce à l'explication quant au fonctionnement de l'OADMC, ce qui permettra de le communiquer et le transférer plus facilement au PAM suite au dépôt de ce mémoire. Les étapes sont détaillées ci-après :

1) La collecte et l'analyse des données; 2) la formulation, la modélisation et la résolution du problème; 3) les tests, l'analyse et la validation des résultats avec des experts; 4) l'analyse multicritère; 5) l'explication du fonctionnement de l'outil d'aide à la décision.

3.1 Collecte et analyse de données

La première phase de l'approche méthodologique comprend la collecte ainsi que l'analyse des données. Cette étape est cruciale puisqu'elle permet de bien cerner le problème et ses subtilités.

L'ensemble des données collectées proviennent de plusieurs sources, comme des entrevues, des rapports et des documents du PAM, des sites Internet, etc. Puisqu'il

y a très peu de documentation sur le fonctionnement des processus d'acheminement de denrées, il a été nécessaire de faire des entrevues avec des responsables au PAM (Blecken, 2010; Dufour *et al.*, 2017). Ces entrevues étaient non-structurées, puisque c'était des conversations informelles en lien avec le fonctionnement du processus d'acheminement de denrées alimentaires. Les personnes avec qui nous avons discutées sont des gens, au sein du PAM, qui sont impliquées directement dans le processus d'acheminement de denrées alimentaires pour le Niger. La sélection de ces personnes s'est fait de « bouche à oreille », en commençant par la personne ressource pour ce projet. Ces données primaires proviennent donc de membres du PAM, ce qui nous a permis de saisir l'ensemble du problème. Aussi, des données secondaires comprenant des fichiers Excel, qui proviennent de rapports générés par leurs systèmes de suivi, et des exemples de contrats ont aussi été nécessaires pour comprendre l'étendue du contexte informationnel lié à l'acheminement de denrées. Ces documents ont permis de recueillir certaines données historiques sur les deux paramètres étudiés (temps et coûts) qui forment le contexte informationnel et qui ont permis d'instancier le modèle prescriptif. C'est pourquoi des demandes de partage de documents ont été adressées à notre personne ressource. À ce jour, le PAM utilise majoritairement le port de Cotonou pour les lots non-GCMF et le port de Lomé pour les lots GCMF. Par contre, le port de Tema n'est pas utilisé, nous n'avons donc pas été en mesure de récolter des données historiques en lien avec ce port. En effet, selon Govindan *et al.* (2017), les environnements incertains de prise de décision peuvent être séparés en trois groupes, dont deux sont pertinents à notre étude. Cotonou et Lomé font partis du premier groupe pour lequel les paramètres sont aléatoires, mais de l'information est disponible pour pouvoir dégager des probabilités de distribution. Tema se trouve dans le deuxième groupe, puisque les preneurs de décisions n'ont aucune information sur les paramètres aléatoires et ne peuvent donc pas dégager des probabilités de

distribution. Tofighi *et al.* (2016) mentionnent que pour obtenir des estimations sur des paramètres imprécis, il faut souvent faire appel au jugement des experts.

Il y a aussi des données qui sont disponibles via des sites Internet. Ces données tertiaires peuvent être internes à l'organisme (comme le site Internet du PAM) ou externes. Le site Internet du PAM permet de connaître les activités que l'organisme effectue au Niger (proportion des programmes, populations visées, etc.). D'autres sites Internet sont accessibles, comme www.marinetraffic.com qui permet d'avoir des informations sur le volume de bateaux à un port à un moment précis, ou encore, les sites des ports ont de l'information quant à leurs espaces portuaires.

Toutes les données récoltées provenant de différentes sources ont permis de mieux cerner les besoins entourant la problématique, ce qui a permis de formuler un modèle mathématique représentatif pour que l'OADMC soit adéquat pour le PAM.

3.2 Formulation, modélisation et résolution du problème

La première étape avant la formulation du problème est sa compréhension. Pour ce faire, il est important de considérer tous les facteurs reliés au problème. En effet, il est important de bien comprendre le problème de prise de décision avant d'être en mesure de le formuler verbalement et visuellement. Il faut aussi connaître le type et la portée des décisions admissibles pour le PAM, et ce en plus de caractériser les différentes contraintes encadrant la prise de décision. L'étape de la collecte et de l'analyse des données permet de comprendre le problème et son étendue. En effet, il est possible avec les données primaires, secondaires et tertiaires récoltées et analysées de trouver quels sont les temps et les coûts actuellement admissibles pour le PAM. Lors de la modélisation et de la formulation du problème, il a été nécessaire de poser certaines hypothèses de travail. Au niveau des unités de

mesure, nous considérons que tous les coûts sont en devises USD, les temps en jour et les quantités en tonnes, puisque le PAM fonctionne présentement avec ces unités de mesure. De plus, le modèle ne considère pas les facteurs externes tel que les conditions météorologiques, la saisonnalité, l'état des routes, la stabilité d'un pays, le passage d'un transitaire par plusieurs pays, ni les facteurs incertains comme la possibilité d'avoir une perte ou un vol de denrées, les actes terroristes, la possibilité qu'un transitaire ne termine pas le travail commencé, ni les différents risques possibles sur les corridors de transport. Il considère seulement les données connues, soit les coûts et temps prévus pour le transport et la manutention d'une certaine quantité de denrées vers des EDP prédéterminés.

La modélisation du problème à l'aide d'un graphe permet de valider les différentes composantes du modèle de l'OADMC (paramètres, variables de décision et contraintes) de façon claire et précise avec la personne ressource au PAM. Le graphe de la figure 3.1 représente les mouvements possibles des denrées alimentaires entre le bateau et les EDP. Cet exemple comprend les contraintes de capacités, les temps et les coûts pour la manutention et le transport ainsi que les flots de marchandises possibles. Les nœuds comprennent le don (lorsqu'il y a confirmation qu'un don provenant de l'international est en direction du Niger), les ports (des trois pays voisins), les transitaires disponibles ainsi que les EDP du Niger. Les arcs représentent le flot de marchandise qui peut passer à travers le réseau et il y a quatre catégories de flot, soit le transport maritime, le choix du port et le transbordement, le choix du transitaire et la manutention au port et le transport routier entre le port et les EDP. Un coût et un temps de transport et de manutention par tonnes de denrées est associé à chaque arc. De plus, les capacités des arcs sont indiquées. Les décisions de choix de port et de transitaire par la sélection d'arcs est donc possible. Le graphe est une illustration simplifiée de la réalité, on ne fait donc pas de distinction pour la commodité sur ce graphe. Néan-

moins la distinction par commodité est faite dans l'OADMC et dans le modèle mathématique.

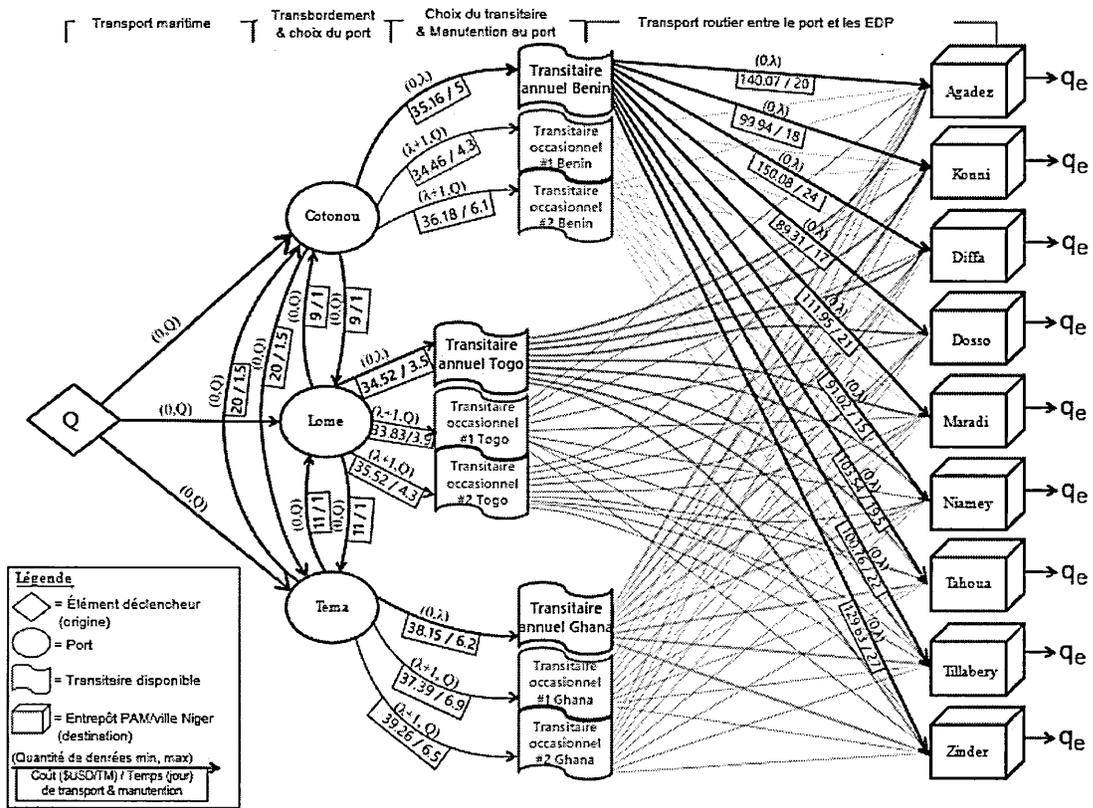


FIGURE 3.1 Graphe complet du réseau, avec contraintes de capacités, temps et coûts de transport et manutention

Suite au développement du graphe et de la confirmation de sa validité avec notre personne responsable au PAM, nous avons été en mesure de faire la formulation mathématique du problème. Cette formulation a été faite selon les principes de la recherche opérationnelle et de façon déterministe. Le modèle est défini sur un graphe $G(N, A)$ où N comprend l'ensemble des nœuds et A l'ensemble des arcs. Le problème comporte des variables de flots (X_{ij}^k) par commodité pour permettre de suivre le trajet des denrées, des variables de temps (Z_i^k) pour pouvoir suivre les temps de transport et de manutention jusqu'aux EDP et des variables binaires (Y_{ij}) pour savoir quels arcs sont empruntés. Les variables de flots et les variables binaires peuvent être séparées en quatre catégories, selon les différentes parties du réseau en figure 3.1, soit le transport maritime, le transbordement, la manutention au port et le transport routier. Les variables de temps sont sur les nœuds des ports, des transitaires et des EDP. La variable de temps sur un nœud représente le temps maximal, de transport ou de manutention que peuvent prendre les denrées avant d'arriver au nœud. Le tableau 3.1 résume les ensembles, les paramètres et les variables de décision du modèle.

TABLE 3.1 Ensembles, paramètres et variables de décisions du modèle

Ensembles	Définition
K	Ensemble des commodités k
O	Ensemble représentant le don d'origine o
P	Ensemble des ports p
F_p	Ensemble des transitaires disponibles f au port p , tel que $F_p^A \cup F_p^O$
F_p^A	Ensemble des transitaires disponibles f' au port p pour un contrat à long terme
F_p^O	Ensemble des transitaires disponibles f'' au port p pour un contrat à court terme
E	Ensemble des entrepôts e au Niger (EDP)
A	Ensemble des arcs (i, j) , où $(i, j) = (o \in O, p \in P),$ $(p \in P, p' \in P),$ $(p \in P, f \in F_p),$ $(f \in F_p, e \in E).$
N	Ensemble des nœuds i , où $i = p \in P, f \in F_p, e \in E$
Paramètres	Définition
Q	Quantité totale de don confirmé
Q^k	Quantité de commodité k de don confirmé
q_e	Quantité à livrer au EDP e
q_e^k	Quantité de commodité k à livrer au EDP e
T_{ij}^k	Temps de transport ou de manutention de la commodité k sur l'arc (i, j)
C_{ij}^k	Coût de transport ou de manutention de la commodité k sur l'arc (i, j)
M	Valeur suffisamment grande
λ	Quantité maximale comprise dans les contrats à long terme
δ	Quantité minimale à transporter par les transitaire si le don est séparé
ω_z	Poids sur le critère z
Variables de décision	Définition
X_{ij}^k	Quantité de denrées alimentaires de commodité k voyageant sur l'arc (i, j)
Y_{ij}	Variable binaire si l'arc (i, j) est utilisé $\in \{0, 1\}$
Z_i^k	Variable représentant le temps pour arriver au nœud i pour la commodité k

$$\text{Min } f_1(x) = Z_{fin} \quad (1)$$

$$\text{Min } f_2(x) = \sum_{k \in K} \sum_{e \in E} Z_e^k \quad (2)$$

$$\text{Min } f_3(x) = \sum_{k \in K} \left(\sum_{p \in P} C_{op}^k X_{op}^k + \sum_{\substack{p' \in P \\ p' \neq p}} \sum_{p \in P} C_{pp'}^k X_{pp'}^k + \sum_{p \in P} \sum_{f \in F_p} C_{pf}^k X_{pf}^k + \sum_{p \in P} \sum_{f \in F_p} \sum_{e \in E} C_{fe}^k X_{fe}^k \right) \quad (3)$$

$$\text{Min } z = \omega_1 f_1(x) + \omega_2 f_2(x) + \omega_3 f_3(x) \quad (4)$$

$$Q^k = \sum_{p \in P} X_{op}^k \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$X_{op}^k + \sum_{\substack{p' \in P \\ p' \neq p}} X_{p'p}^k = \sum_{\substack{p' \in P \\ p' \neq p}} X_{pp'}^k + \sum_{f \in F_p} X_{pf}^k \quad \forall p \in P, k \in K \quad (6)$$

$$X_{pf}^k = \sum_{e \in E} X_{fe}^k \quad \forall p \in P, f \in F_p, k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{f \in F_p} X_{fe}^k = q_e^k \quad \forall e \in E, k \in K \quad (8)$$

$$X_{op}^k \leq Q^k \cdot Y_{op} \quad \forall p \in P, k \in K \quad (9)$$

$$X_{pp'}^k \leq Q^k \cdot Y_{pp'} \quad \forall p \in P, p' \in P, p \neq p', k \in K \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} X_{pf'}^k \leq \lambda \cdot Y_{pf'} \quad \forall p \in P, f' \in F_p^A \quad (11)$$

$$(\lambda + 1) \cdot Y_{pf''} \leq \sum_{k \in K} X_{pf''}^k \leq Q \cdot Y_{pf''} \quad \forall p \in P, f'' \in F_p^O \quad (12)$$

$$X_{fe}^k \leq q_e^k \cdot Y_{fe} \quad \forall p \in P, f \in F_p, e \in E, k \in K \quad (13)$$

$$Z_p^k \geq T_{op}^k + M \cdot (Y_{op} - 1) \quad \forall p \in P, k \in K \quad (14)$$

$$Z_p^k \geq Z_{p'}^k + T_{p'p}^k + M \cdot (Y_{p'p} - 1) \quad \forall p \in P, p' \in P, p \neq p', k \in K \quad (15)$$

$$Z_f^k \geq Z_p^k + T_{pf}^k + M \cdot (Y_{pf} - 1) \quad \forall p \in P, f \in F_p, k \in K \quad (16)$$

$$Z_e^k \geq Z_f^k + T_{fe}^k + M \cdot (Y_{fe} - 1) \quad \forall p \in P, f \in F_p, e \in E, k \in K \quad (17)$$

$$Z_{fin} \geq Z_e^k \quad \forall e \in E, k \in K \quad (18)$$

$$\sum_{p \in P} Y_{op} = 1 \quad (19)$$

$$\sum_{f' \in F_p^A} Y_{pf'} + \sum_{f'' \in F_p^O} Y_{pf''} \leq 1 \quad \forall p \in P \quad (20)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{f \in F_p} Y_{pf} = 1 \quad (21)$$

$$X_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (22)$$

$$Z_i^k \geq 0 \quad \forall i \in N, k \in K \quad (23)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (24)$$

Il y a trois fonctions objectifs possible dans ce problème, soit de minimiser le temps maximal pour se rendre aux EDP (1), minimiser la somme des temps pour arriver aux EDP (2), et de minimiser la somme des coûts (3). Les coûts et temps compris dans ce système sont liés au transport et à la manutention des denrées sur chaque tronçon d'arc, à savoir les coûts et temps de transport maritime (du pays de provenance vers un des ports de l'Afrique de l'Ouest), les coûts et temps de transbordement (du transport maritime entre les ports de l'Afrique de

l'Ouest), les coûts et temps de manutention aux ports et les coûts et temps de transport et manutention terrestre (des ports jusqu'aux EDP). De plus, il est possible de résoudre le modèle en mettant différents poids sur les critères (4). Étant un problème de flot dans le réseau, des contraintes de conservations de flot aux différents nœuds sont nécessaires (contraintes 5 à 8), ainsi que les contraintes de capacités pour les arcs (contraintes 9 à 13). Puisque nous avons une composante de temps, des contraintes pour calculer le temps maximal à un nœud doivent être utilisées (contraintes 14 à 18). De plus, certaines caractéristiques sont propres au problème et doivent être prises en considération dans les contraintes. Il ne peut y avoir qu'un seul bateau qui fait le transport maritime (contrainte 19), pas plus d'un transitaire par port (contrainte 20) et un seul transitaire choisi (contrainte 21). Il y a les contraintes habituelles de non-négativité pour les variables de flots et de temps ainsi que la contrainte binaire pour les variables binaires (contraintes 22 à 24). Le paramètre λ , compte tenu de la quantité à transporter dans le problème, permet de définir le type de problème. Cela permet de déterminer si le problème concerne un seul transitaire par port (qui est prédéterminé) lorsque la quantité de don à transporter est inférieure ou égale à la valeur de λ ou encore si plusieurs transitaires peuvent faire des offres de services pour une plus grande quantité, supérieure à λ , à transporter.

Dans le cadre de l'OADMC, nous avons ajouté deux options qui permettent de séparer le don pour que le transport soit fait par plusieurs transitaires, lorsque le don est plus de λ tonnes (quantité maximale des contrats à long terme). Si la première option (le don peut être séparé entre les ports) est cochée, la contrainte 21 est retiré. Si les deux options (le don peut être séparé entre les ports et entre les transitaires d'un même port) sont cochées, les contraintes 20 et 21 sont retirées. Si une ou les deux options sont cochées, l'utilisateur doit indiquer la quantité minimale que chaque transitaire doit transporter δ (en tonnes), donc la contrainte

12 change pour ceci :

$$\delta \cdot Y_{pf''} \leq \sum_{k \in K} X_{pf''}^k \leq Q \cdot Y_{pf''} \quad \forall p \in P, f'' \in F_p^O$$

La formulation mathématique comprend trois (3) critères, prenant en compte les temps et les coûts de transport. L'ordre de grandeur de ces deux paramètres est très différent : les temps sont en jours et les coûts en milliers de dollars USD. C'est pourquoi il est essentiel de faire une analyse approfondie pour exploiter adéquatement les critères dans le modèle (Jahre *et al.*, 2016; Tofighi *et al.*, 2016) (voir section 3.4).

Une fois la formulation mathématique complétée, il faut résoudre ledit problème à l'aide d'un solveur. L'utilisation d'un solveur commercial est à privilégier puisque cela permet de faciliter la transférabilité de l'OADMC au PAM (Alvarenga *et al.*, 2010). Un solveur commercial facilement accessible est le solveur compris dans Excel. Par contre ce dernier n'a pas une capacité computationnelle suffisante pour résoudre notre modèle mathématique. Nous nous sommes donc tourné vers un solveur disponible en ligne gratuitement <http://www.gapso.com.br/en/ufflp-en/> (Gapso analytics, 2019). UFFLP est une librairie de fonctions qui permet d'intégrer les solveurs externes tel que CPLEX et Coin-or CBC et qui peut être utilisé avec différents langages, soit C/C+ ou VBA (Visual Basics for Applications). UFFLP a été développé par des professeurs brésiliens pour rendre plus accessible la résolution de problèmes de programmation linéaire aux académiciens et praticiens. Cette option répond à tous nos critères, puisqu'UFFLP est gratuit et qu'il sera facile pour le PAM de l'installer. De plus, il peut être utilisé avec VBA (et donc avec un tableur Excel), avec le solveur CBC, qui ne nécessite aucune license et qui a une capacité computationnelle suffisante.

Puisque nous connaissons l'ordre de grandeur des paramètres grâce aux données

récoltées et analysées, il fut possible de mettre des données fictives dans le modèle et de le résoudre avec le solveur. Cette résolution nous a dans un premier temps permis de valider que le solveur était capable de soutenir le problème déterministe multicritère. Ensuite, les solutions obtenues ont été comparées avec les données historiques pour vérifier qu'elles étaient plausibles. Nous nous sommes donc assurés que le modèle donne des résultats raisonnables, à priori.

3.3 Test, analyse et validation des résultats avec des experts

Après avoir validé que le modèle mathématique et le solveur donnaient des résultats cohérents, nous avons pu faire des tests avec des données réelles. Le but est de comparer leur méthode (humaine et manuelle) avec notre modèle d'optimisation. Nous avons demandé au PAM de nous transmettre des données réelles quant aux coûts et temps mentionnés par les transitaires lors d'une prise de décision passée. La personne responsable nous a transmis deux exemples avec des dons de plus de λ tonnes (contrats à court terme). Comme mentionné plus tôt, présentement le PAM procède de façon séquentielle, il sélectionne en premier le port et par la suite fait des demandes de prix aux transitaires œuvrant dans ce port. C'est pourquoi dans les deux exemples, il n'y a qu'un port et ses quatre transitaires qui sont considérés. Nous avons entré tous les paramètres dans le modèle et l'avons résolu à l'aide du solveur. À cette étape, nous avons résolu les deux cas du PAM en regardant chaque critère séparément. Dans le premier exemple, si le seul critère choisi est les coûts z_3 , nous obtenons un résultat différent du PAM. Par contre, si le critère évalué est sur les temps nous arrivons au même résultat que le PAM, avec notre modèle. Cela peut s'expliquer par le fait que le transitaire choisi par le PAM a les temps de transport les plus bas, mais il n'a pas les coûts les plus bas. Par contre ses coûts de transport sont seulement 2.7% plus cher que le transitaire ayant les coûts les plus bas. Dans le deuxième exemple, nous avons obtenu le même

résultat que le PAM peu importe le critère choisi. Ceci s'explique simplement, le transitaire choisi a les coûts et les temps les plus bas, et ce dans la majorité des cas. Suite à ces tests, nous avons validé avec des experts du domaine que les solutions obtenues avec le solveur à partir de données réelles étaient plausibles, crédibles et réalistes. Ceci nous a donc permis de comparer le modèle avec la réalité, comme proposé par Jahre *et al.* (2016).

3.4 Analyse multicritère

Après avoir validé que le modèle fonctionnait et donnait des résultats acceptables pour le PAM, nous avons fait une analyse multicritère sur deux cas fournis par le PAM. Pour faire cette analyse, nous avons utilisé la méthode de la somme pondérée et nous avons normalisé la fonction objectif (Rancourt et Paquette, 2014; Ehrgott, 2005; Clímaco *et al.*, 2006; Grodzevich et Romanko, 2006). Dans notre cas, il est nécessaire de faire une normalisation, puisque les deux paramètres compris dans les trois critères sont de grandeurs différentes (les temps sont en jours et les coûts en dollars USD). Nous nous sommes inspirés des travaux de Rancourt et Paquette (2014); Clímaco *et al.* (2006) et Grodzevich et Romanko (2006) pour faire notre analyse multicritère.

Dans la normalisation des fonctions objectifs, il est nécessaire de considérer la meilleure et la pire solution de chaque critère, soit le point utopique et le point nadir comme désigné par Grodzevich et Romanko (2006). Ces derniers forment respectivement les limites inférieures et supérieures de la courbe de Pareto. Pour trouver la solution optimale d'un critère (point utopique x_z^*), nous les avons résolus chacun séparément. Pour trouver la pire solution d'un critère (point nadir \bar{x}_z) nous avons regardé la valeur maximale que peut avoir ce critère f_{x_z} , lorsque l'on résout

les 2 autres critères $f_{x_{z+1}}$ et $f_{x_{z+2}}$ séparément, soit :

$$\bar{x}_z = \max_{1 \leq z \leq 3} f_z(x_z^*)$$

Avec ces deux points (utopique et nadir) il est possible de formuler une fonction objectif normalisée pour chaque critère en utilisant la valeur de la solution courante moins son point utopique, divisé par la différence entre son point nadir et utopique :

$$\left(\frac{f_z(x) - x_z^*}{\bar{x}_z - x_z^*} \right)$$

Nous avons utilisé la méthode de la somme pondérée pour faire notre analyse multicritère. Les poids des différentes critères ont été générés de façon à s'assurer de couvrir l'ensemble des solutions possibles. Nous avons prédéterminé les valeurs des μ_z , de 0 à 1 avec des incréments de 0.1. Les poids σ_z sont donc calculés à partir de la proportion des μ_z , comme suit :

$$\sigma_z = \frac{\mu_z}{\sum_{z=1}^3 \mu_z} \text{ où } \mu_z \cup [0, 1]$$

$$\sum_{z=1}^3 \sigma_z = 1$$

Ce qui nous donne une fonction objectif normalisée comprenant la somme pondérée :

$$\text{Min } z = \sum_{z=1}^3 \left(\frac{f_z(x) - x_z^*}{\bar{x}_z - x_z^*} \right) \sigma_z$$

Nous avons fixé tous les paramètres des deux cas fournis par le PAM et avons obtenus 1 331 solutions pour chacun des cas. Ce qui différencie une solution d'une

autre est la valeur que l'on accorde à chaque objectif. En effet, les poids des objectifs ont été générés à l'aide des μ_z , de 0 à 1 avec des incréments de 0.1, ce qui donne 11 valeurs pour chaque objectif. Lorsque l'on combine toutes les possibilités de poids sur les objectifs, ceci donne 1 331 solutions. Sur ce lot, il y a 297 solutions que l'on peut qualifier d'équivalentes, par exemple une solution qui comprend $\mu_1 = 4, \mu_2 = 2, \mu_3 = 0$ et une autre solution qui comprend $\mu_1 = 8, \mu_2 = 4, \mu_3 = 0$ sont équivalentes, puisque leur poids relatif est identique. Le nombre de solutions uniques pour chaque cas est donc de 1 034. Nous avons aussi fait une analyse multicritère avec des données artificielles, pour valider notre modèle avec un plus grand échantillon de données. Le détail des résultats des analyses est disponible au chapitre 4.

3.5 Fonctionnement de l'outil d'aide à la décision

L'Outil d'aide à la décision multicritère (OADMC) a été conçu dans Excel. La décision de passer par Excel pour créer l'OADMC vient du fait que c'est une plateforme facilement accessible et déjà utilisée par le PAM. De plus, UFFLP peut être utilisé dans Excel à l'aide du langage VBA. Ces deux éléments combinés nous assurent d'avoir un outil qui sera facilement utilisable et transférable. De plus, l'OADMC a une interface en anglais, pour s'assurer que tous les possibles utilisateurs de l'outil puissent travailler facilement avec ce dernier. Il faut aussi savoir que l'utilisation des formulaires utilisateurs dans l'outil nécessite un environnement Windows.

Les entrevues effectuées avec le PAM pour connaître leur processus nous ont aussi permis de comprendre quel genre d'information leur serait utile dans l'outil d'aide à la décision. C'est donc avec ces informations en tête que nous avons conçu l'OADMC.

Dans notre cas, c'est le solveur CBC qui est utilisé avec UFFLP. Il est donc important que le PAM ajoute le complément "Solver Add-In" dans Excel et il devra installer UFFLP avec l'option suivante :

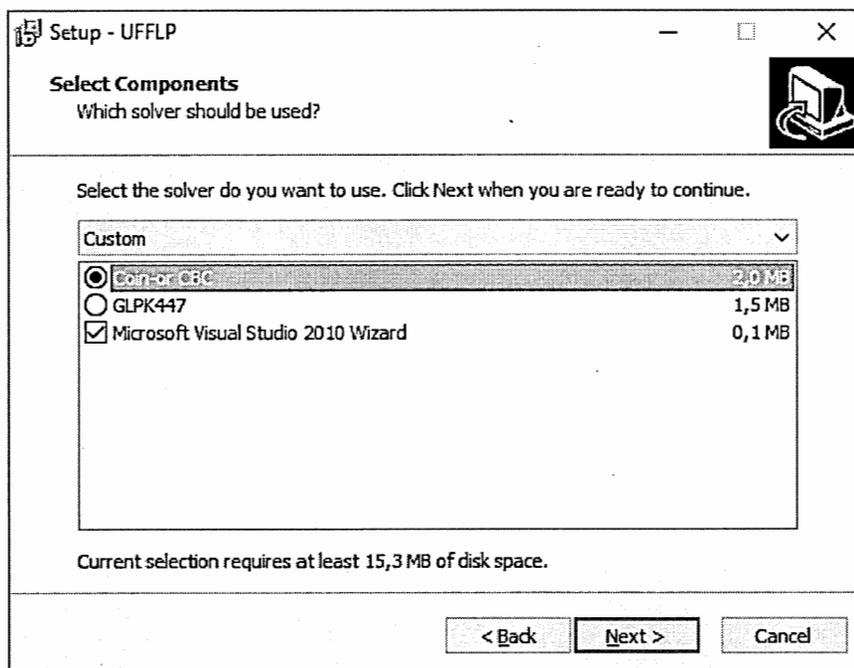


FIGURE 3.2 Installation UFFLP

L'OADMC comporte quatre types de fenêtre, soit les informations de base du don, les temps et coûts demandés par les transitaires, les options de soumission et la solution proposée. À l'ouverture de chaque fenêtre, les valeurs précédemment enregistrées sont affichées par défaut. Ceci est notamment utile pour les contrats à long terme, l'utilisateur pourra donc entrer les informations de ces contrats une seule fois. Si l'information contenu dans une fenêtre n'est plus juste, il est possible d'utiliser le bouton « Clear » et ensuite « Save » pour tout effacer et enregistrer. Le bouton « Save » permet d'enregistrer les informations contenues dans la fenêtre. À noter qu'il est très important de toujours enregistrer les informations d'une fenêtre avant de passer à une autre fenêtre, sinon les informations précédentes

seront perdues. Si l'utilisateur utilise « Clear » et n'enregistre pas par la suite, après avoir fermé la fenêtre, les informations précédemment sauvegardées seront gardées en mémoire (et non le « Clear »). L'OADMIC prend en compte les valeurs décimales, seulement si elles sont séparées par un point. Il faut donc s'assurer que le séparateur décimal d'Excel utilise le point « . », comme le présente la figure 3.3 :

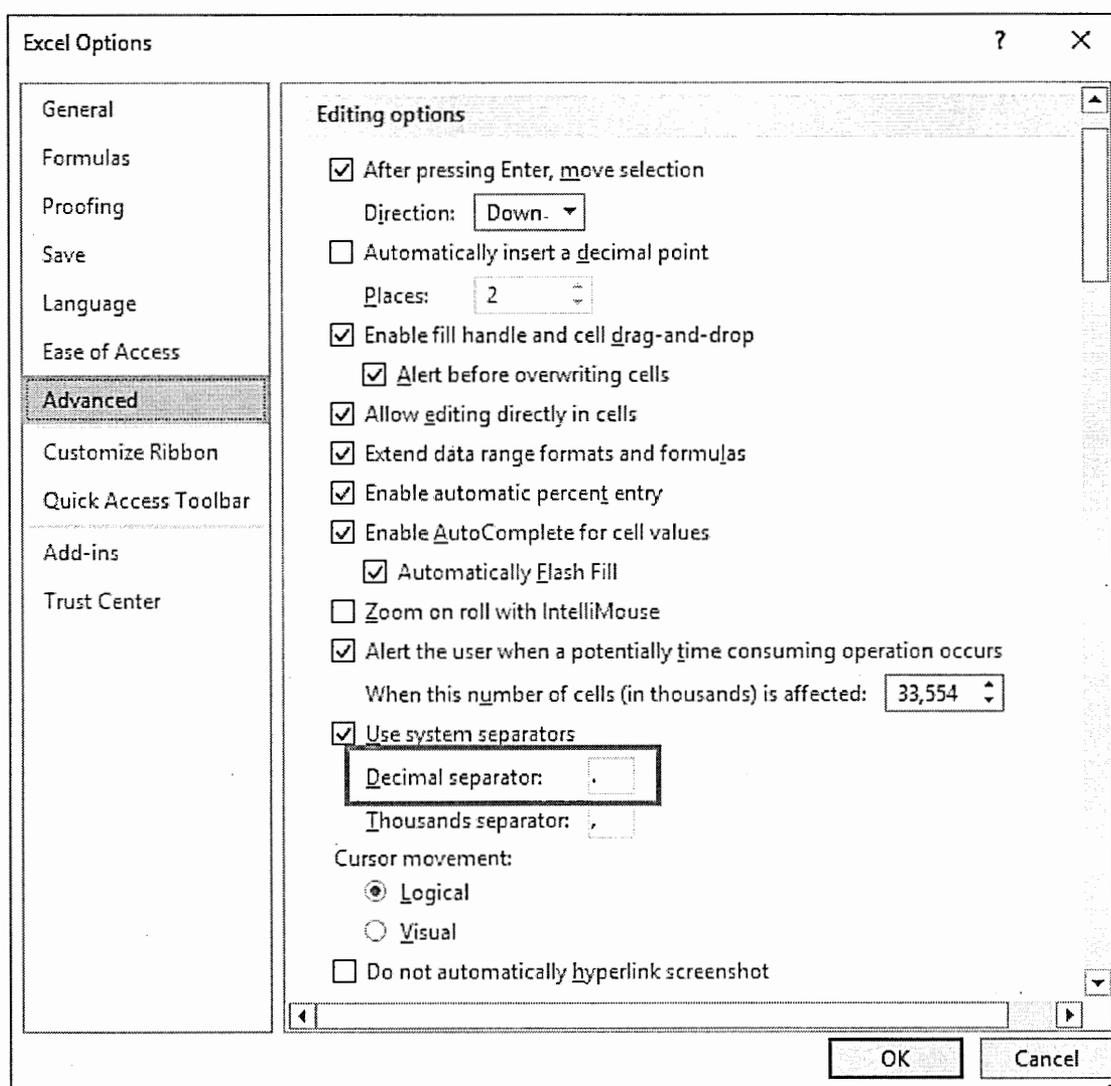


FIGURE 3.3 Séparateur de décimal

Le premier volet est la fenêtre « Main » où l'utilisateur peut entrer les informations de base du don (voir figure 3.4). Cette fenêtre s'ouvre automatiquement à l'ouverture de l'OADMC. Le nombre de commodités à transporter, le nombre de ports à considérer et pour chaque port le nombre de transitaires pouvant faire le transport terrestre jusqu'aux EDP doit être spécifié. Dans ce cas, lorsqu'on parle de « commodité », on parle de biens qui ont des caractéristiques différentes, ce qui fait en sorte que les prix demandés ou les temps proposés pour le transport diffèrent entre ces biens. Ces caractéristiques peuvent être le type de bien (huile, riz) ou encore le type d'emballage (sacs, cartons, barils), par exemple. Il faut aussi entrer le détail concernant le don, la quantité de denrées totale et par commodité, ainsi que les quantités à distribuer aux EDP. Ces informations sont nécessaires pour déterminer la taille du problème à résoudre par l'outil et aussi pour instancier les fenêtres suivantes pour l'entrée de données. Une case permet aussi d'indiquer la quantité spécifiée dans les contrats à long terme. Par exemple, présentement cette limite est de 2 500 tonnes. Cette fenêtre permet donc d'avoir une vue d'ensemble sur le don.

Main X

Number of commodities Long term contract maximum quantity (in MT)

Number of ports

Number of Fwv port 1

Number of Fwv port 2

Number of Fwv port 3

Number of EDP 9

Total quantity of goods

Total quantity per commodity	Commodity 1	Commodity 2	Commodity 3	Commodity 4
Agadez	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Konni	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Diffa	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Dosso	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Maradi	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Namey	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Tahoua	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Tillabery	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Zinder	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

FIGURE 3.4 Fenêtre principale

Dans la fenêtre « Main » lorsqu'on clique sur « Clear » toutes les informations sur les quantités de denrées sont effacées. Par contre, les informations sur le contrat à long terme et sur le nombre de commodités, ports et transitaires ne sont pas effacées. Il faut les effacer manuellement. Le bouton « Save » permet d'enregistrer les informations de la fenêtre. Lors du « Save » plusieurs validations peuvent survenir, notamment si aucune valeur n'est entrée pour la quantité de commodités ou pour un EDP, si le nombre de commodité excède quatre (4), si le nombre de port excède trois (3), si le nombre de transitaire par port excède sept (7) ou encore si la quantité totale indiquée n'est pas égale à la somme des quantités totales par commodité. Les limites sur le nombre de ports, de transitaire par port et de commodités ont été établies selon les limites computationnelles lors de

la résolution du problème par le solveur. Les différentes validations possibles sont détaillées à la figure 3.5.

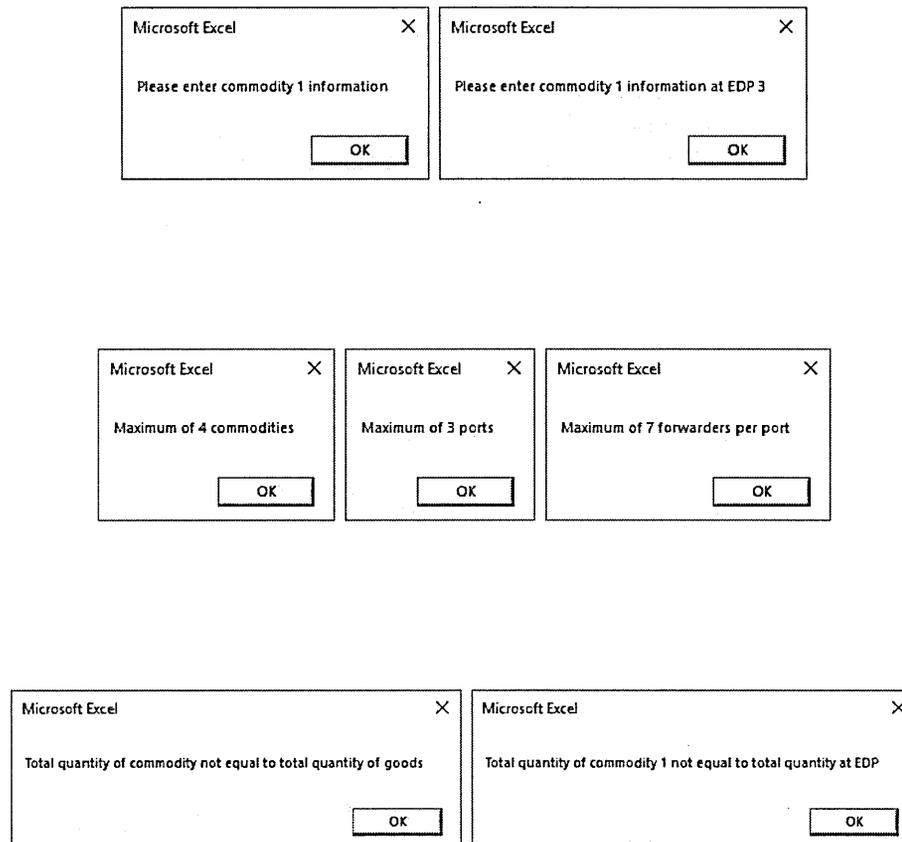


FIGURE 3.5 Validations

Le bouton « Enter Data » permet de fermer la fenêtre « Main » et d'ouvrir le deuxième type de fenêtre, où on indique les temps et coûts demandés par les transitaires. Si la quantité totale du don indiquée dans la fenêtre « Main » est inférieure ou égale à λ (quantité maximale dans les contrats à long terme), le modèle considère qu'il n'y a qu'un seul type de commodité et la fenêtre de la figure 3.6 s'affichera :

FIGURE 3.6 Fenêtre de données pour un contrat à long terme

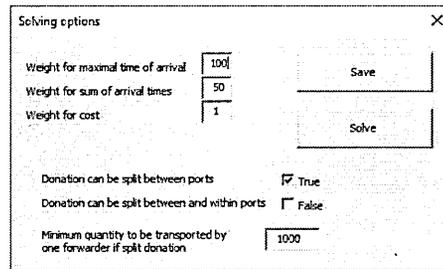
Si la quantité totale du don est supérieure à la limite des contrats à long terme, la fenêtre de la figure 3.7 s'affichera :

FIGURE 3.7 Fenêtre de données pour un contrat à court terme

Si dans la fenêtre « Main » il est indiqué qu'il y a plusieurs commodités (pour les contrats à court terme), d'autres fenêtres seront disponibles à l'aide des boutons « Commodity 1/2/3/4 ». Il n'est pas possible d'avoir deux fenêtres ouvertes en même temps, donc elles seront affichées, une à la fois.

Dans les fenêtres d'information des transitaires, il y a des onglets pour chaque port et chaque type d'information (coûts et temps). L'utilisateur doit entrer les informations dans chaque case selon ce que les transitaires demandent en terme de coûts et de temps. Si un transitaire n'offre pas de service pour une certaine région (qui doit être desservi selon les quantités mentionnées dans le don), il ne faut pas laisser les cases vides, mais plutôt mettre des coûts très élevés. Ces fenêtres ont aussi un bouton « Clear », qui cette fois efface les informations de toutes les cases et un bouton « Save » qui enregistre les informations. Elles disposent aussi de boutons pour accéder aux fenêtres des autres commodités, s'il y a plus d'une commodité. À noter qu'il est important de sauvegarder avant de changer de fenêtre de commodité. Il y a aussi un bouton « Close », il ferme les fenêtres d'information sur les transitaires et ouvre une nouvelle fenêtre où se trouve les options de soumission de l'algorithme comme on peut le voir à la figure 3.8. La fenêtre d'options de soumission permet d'indiquer quel critère est à prioriser pour ce don. Dans cette fenêtre il est aussi possible d'indiquer s'il est possible de séparer le don entre les ports ou encore entre plusieurs transitaires d'un même port. Lorsqu'une des cases de « split » est cochée, il est important d'indiquer une quantité minimale à transporter par transitaire, pour s'assurer qu'un des transitaires ne transporte pas 99% des denrées et l'autre qu'une infime partie. Lorsque la quantité du don est moins que la limite des contrats à long terme, automatiquement l'algorithme prend en compte qu'il y a seulement le contrat à long terme possible avec le transitaire prédéterminé à chaque port. Par contre, si la quantité du don est supérieure à cette limite, il est possible d'utiliser les options mentionnées ci-haut pour partager le don entre plusieurs transitaires. Le bouton « Solve » lance l'algorithme d'optimisation.

Lorsque l'OADMC a trouvé une solution, un message apparaît disant « Optimal solution found! ». En cliquant sur le « OK » de cette boîte de message, une



Solving options

Weight for maximal time of arrival: 100

Weight for sum of arrival times: 50

Weight for cost: 1

Save

Solve

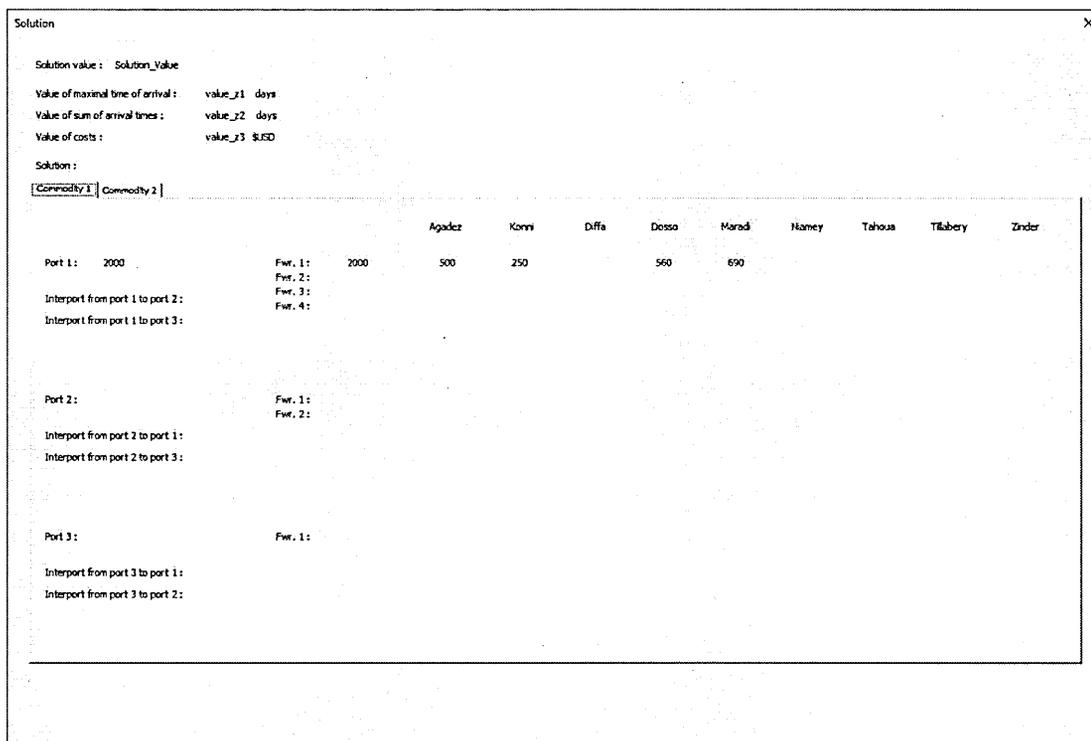
Donation can be split between ports: True

Donation can be split between and within ports: False

Minimum quantity to be transported by one forwarder if split donation: 1000

FIGURE 3.8 Options de soumission

nouvelle fenêtre apparaît pour présenter la solution proposée (voir figure 3.9). La solution est séparé en 2 parties, soit les résultats chiffrés (valeur de la solution et valeurs des 3 critères) et le détail du chemin des denrées, qui est séparé par des onglets représentant les commodités (lorsque plusieurs).



Solution

Solution value : Solution_Value

Value of maximal time of arrival : value_1 days

Value of sum of arrival times : value_2 days

Value of costs : value_3 \$USD

Solution :

[Commodity 1] Commodity 2

			Agadez	Konni	Diffa	Dosso	Maradi	Namey	Tahoua	Tilabery	Zinder
Port 1:	2000	Fwr. 1:	2000	500		560	690				
		Fwr. 2:									
		Fwr. 3:									
		Fwr. 4:									
Interport from port 1 to port 2:											
Interport from port 1 to port 3:											
Port 2:		Fwr. 1:									
		Fwr. 2:									
Interport from port 2 to port 1:											
Interport from port 2 to port 3:											
Port 3:		Fwr. 1:									
Interport from port 3 to port 1:											
Interport from port 3 to port 2:											

FIGURE 3.9 Solution

Si l'utilisateur clique sur le "X" en haut à droite et ferme la fenêtre en cours, il

va perdre les données de la fenêtre courante si elles n'ont pas été enregistrées. Si toutes les fenêtres sont fermées, des boutons sont disponibles sur la feuille Excel pour pouvoir retourner à une étape, comme le démontre la figure 3.10. À noter que pour enregistrer la solution courante, il faut enregistrer le fichier Excel.

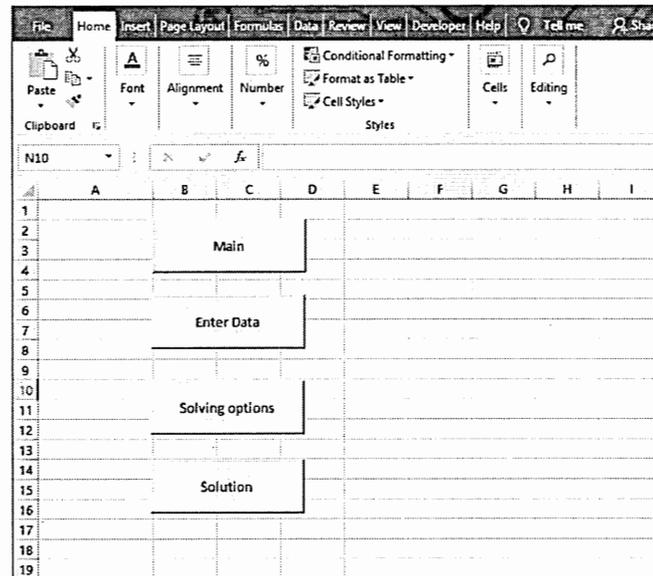
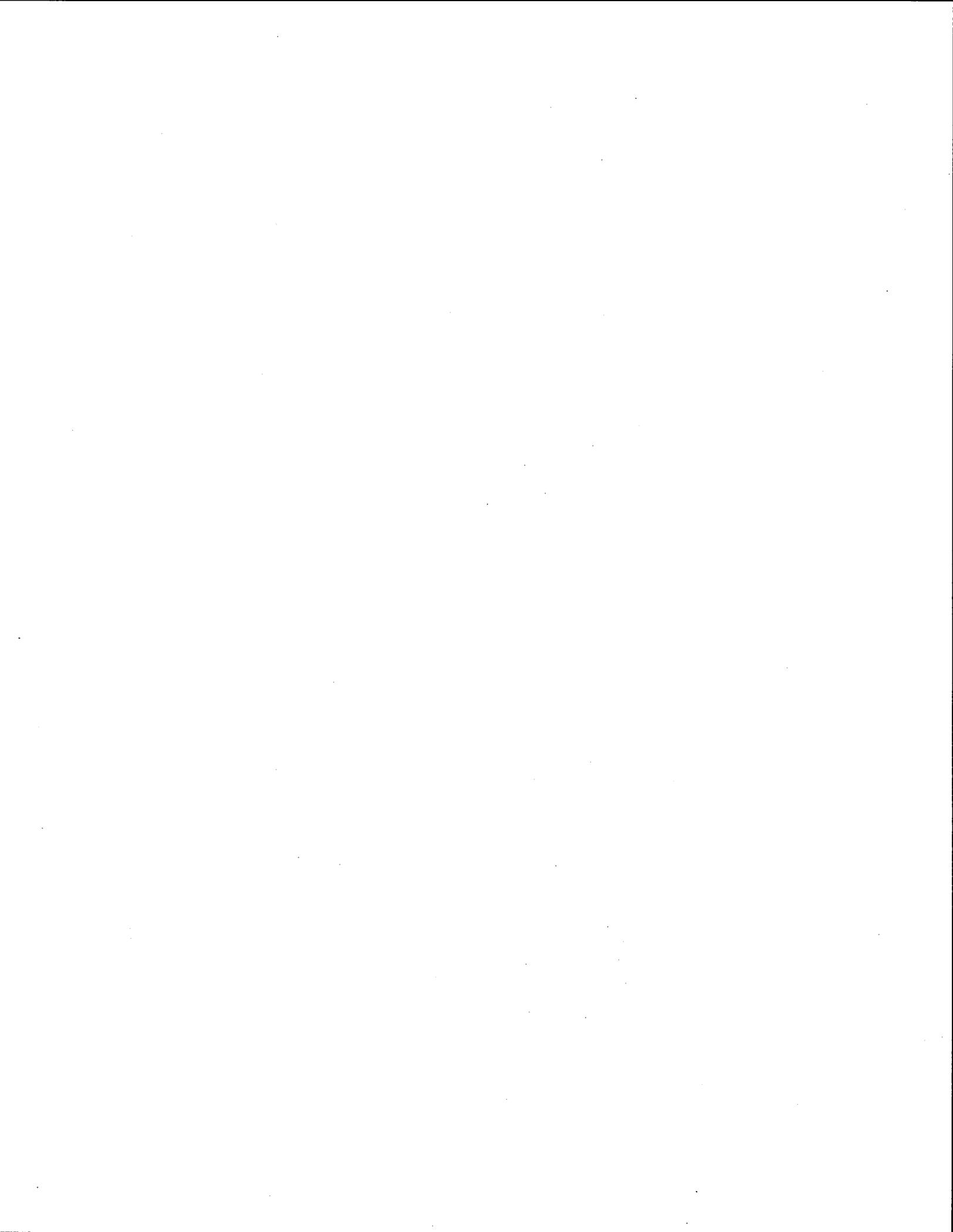


FIGURE 3.10 Feuille Excel



CHAPITRE IV

RÉSULTATS DE L'ANALYSE MULTICRITÈRE

L'évaluation de l'outil s'est faite grâce aux analyses multicritères effectuées sur deux cas qui nous ont été fournis par le PAM et avec des données artificielles. La méthodologie employée est décrite au chapitre 3.4 et le présent chapitre détaille l'ensemble de l'analyse, en commençant par la description des cas envoyés par le PAM et de la génération des instances artificielles, suivi d'une analyse des résultats obtenus suite aux analyses multicritères et se termine avec une discussion incluant des recommandations pour l'implémentation de l'outil au sein des opérations du PAM au Niger.

4.1 Explication des cas et instances analysés

Les deux cas envoyés par le PAM sont des informations relatives à deux dons reçus à l'été 2018, à environ 1 mois d'intervalle l'un de l'autre. Ces dons proviennent de l'international par bateau et arrivaient tous deux au port de Cotonou. De plus, les quatre mêmes transitaires ont fait des offres de transport pour les denrées, que nous nommeront ci-après 1, 2, 3 et 4. Puisque le PAM procède présentement de façon séquentielle, les logisticiens au Niger avaient déjà choisi le port d'arrivée, soit Cotonou, et ont demandé aux transitaires du pays de faire des offres sur le transport terrestre vers les EDP. Avec l'OADMC nous avons donc résolu la partie

"choix du transitaire" du problème sur les deux cas.

Nous ne connaissons pas la nature des denrées des dons, par contre nous savons que dans le premier cas, les denrées sont dans des sacs et dans le deuxième cas, elles sont dans des sacs et des cartons. Dans le premier cas, le don est de 6 040 tonnes métriques et les denrées doivent être acheminées vers 3 EDP (A, B et F). Pour le deuxième cas, ce sont 12 220 tonnes métriques de denrées qui doivent être acheminées vers 6 EDP (A à F). Dans les deux cas, lorsque le don en direction du Niger a été confirmé, les logisticiens au PAM ont déterminé la quantité de denrées à envoyer à chaque EDP, basé sur la planification de la distribution (qui tient compte du nombre de bénéficiaires à nourrir et des rations journalières, entre autres). La quantité de denrées envoyée à chaque EDP peut donc être très variable d'un don à l'autre et d'une commodité à l'autre. Par exemple, dans le premier cas, 42% du don va à l'EDP A, tandis que dans le deuxième cas, c'est seulement 3% qui va à cet EDP. De plus, de très grandes ou très petites quantités peuvent être envoyés vers une région, comme c'est le cas dans le deuxième cas où 1% du don va à l'EDP F et 47% du don à l'EDP D.

Sur leurs offres de transport, les transitaires indiquent pour chaque destination (EDP), le détail des coûts de transport (douanes import/export, escorte, transport routier, etc.) par tonnes métriques en dollars USD, ainsi que les temps de transport en jours pour la totalité du tonnage. Dans les deux cas du PAM, le transitaire 2 a les coûts les plus élevés, ainsi que des temps de transport dans la moyenne. Les trois autres transitaires ont fait des offres comparables au niveau des coûts et des temps, et ce, pour les deux cas.

Dans le premier cas, le PAM n'a pas sélectionné le transitaire 3, celui ayant les coûts les plus bas et les temps de transport les plus élevés, puisque ce transitaire avait déjà eu de la difficulté à acheminer des denrées dans le passé. Ils ont donc

opté pour le transitaire 4 qui a des coûts légèrement plus élevés (2.7%) mais des temps de transport beaucoup plus bas. Sans surprise, dans le deuxième cas, le transitaire sélectionné par le PAM est le transitaire 1, celui qui a les coûts les plus bas et les temps de transport les plus bas aussi.

Puisque nous avons très peu de données réelles pour faire l'analyse, nous avons aussi généré des données artificielles pour être en mesure de mieux évaluer l'outil. Ces données sont basées sur les données reçues du PAM. Nous avons utilisé le deuxième cas, celui de 12 220 tonnes, puisqu'il contenait une plus grande quantité de denrées à transporter, avec plus de variations dans les quantités à livrer par EDP et une plus grande offre de transitaire. Ce basant sur ce cas, nous avons calculé la moyenne et l'écart-type des coûts et des temps pour la manutention au port de Cotonou et pour le transport vers chaque destination (EDP). Ensuite, nous avons utilisé ces moyennes et écart-types, avec des nombres aléatoires, et suivant une loi normale nous avons générés 100 coûts et 100 temps pour la manutention au port et le transport vers chaque EDP. Les coûts ont été arrondis à deux décimales, tandis que les temps ont été arrondis par jour (donc avec aucune décimale). Avec cet ensemble, nous avons déterminé, une valeur maximale (10e valeur maximale), une deuxième valeur maximale (25e valeur maximale), une valeur minimale (10e valeur minimale), une deuxième valeur minimale (25e valeur minimale), la moyenne, la moyenne multipliée par un nombre aléatoire et la médiane. Nous avons répété ce processus pour générer sept ensembles de valeurs. Avec toutes ces valeurs, nous avons été en mesure de créer des ensembles de données pour plusieurs transitaires. Le modèle de données est défini au tableau 4.1.

Dans tous les cas analysés, ce sont des problèmes relativement petits à résoudre avec peu de nœuds et d'arcs. De plus, ils ont sensiblement les mêmes caracté-

TABLE 4.1 Caractéristiques des transitaires des instances artificielles

Transitaire	Type de coûts	Type de temps
1	Le plus cher	Le 2e plus rapide
2	Le 2e plus cher	Le plus rapide
3	Coûts médians	Temps moyens
4	Coûts moyens (multiplié par une valeur aléatoire)	Temps médians
5	Coûts moyens	Temps moyens (multiplié par une valeur aléatoire)
6	Le moins cher	Le 2e moins rapide
7	Le 2e moins cher	Le moins rapide

ristiques, entre autres le même nombre de commodité et de port. Le tableau 4.2 détaille la liste des caractéristiques des cas du PAM et des instances artificielles.

TABLE 4.2 Caractéristiques des cas analysés

Caractéristiques	Cas 1	Cas 2	Instances artificielles
Nombre d'arcs dans le réseau	17	29	50
Nombre de nœuds dans le réseau	18	30	51
Nombre de commodités	1	1	1
Nombre de ports	1	1	1
Nombre de transitaires	4	4	7
Nombre d'EDP	3	6	6
Quantité totale à transporter (en tonnes)	6 040	12 220	12 220
Valeur de λ (en tonnes) (Quantité maximale des contrats à long terme)	2 500	2 500	2 500
Valeur de δ (en tonnes) (Quantité minimale à transporter si le don peut être séparé)	800	1 000	2 500

4.2 Analyse des résultats

Pour faire notre analyse multicritère et générer des résultats, nous avons utilisé la méthodologie décrite au chapitre 3.4. Tous les tests ont été effectués sur Excel avec la version de UFFLP 3.3.0. Ils ont été effectués sur un ordinateur qui contient un système d'opération de 64-bit et un processeur Inter(R) Core(TM) i7-3520M avec un CPU de 2.90GHz. Nous avons utilisé les deux cas qui nous ont été envoyés par le PAM et avons fait deux analyses multicritères. Dans les deux cas, les analyses ont été fait en deux étapes : nous avons fait une première analyse avec le modèle de base et une deuxième analyse avec la possibilité de séparé le don pour avoir plus d'un transitaire pour le transport des denrées. Il est a noter que nous n'avons pas d'exemple de décisions passées (avec coûts et temps) pour plusieurs ports en même temps pour un même don, puisque le PAM procède présentement de façon séquentielle, en commençant par la sélection du port pour ensuite déterminer le transitaire. Il ne nous a donc pas été possible de faire une analyse multicritère avec plus d'un port. Nous n'avons pas été en mesure de faire plus d'analyses, en se basant sur les données historiques fournies par le PAM, puisque ce fichier contient seulement les temps de transport réels du transitaire ayant fait le transport des denrées, il n'y a donc aucune information sur les autres possibles transitaires, et il ne contient aucune information au niveau des coûts. Par contre, il a été possible de faire d'autres tests avec des données artificielles générées, comme mentionné précédemment. Pour les 10 instances qui ont été générées, nous avons encore une fois fait deux types d'analyse ; la première sans laisser la possibilité de séparer le don et une deuxième analyse qui laisse la possibilité de séparer le don pour que le transport soit effectué par plus d'un transitaire.

Le temps de résolution de l'outil est assez rapide. En effet, cela prend environ 20 minutes pour résoudre 1 331 problèmes multicritères de 50 arcs et 51 noeuds (une

instance artificielle). Le temps de résolution augmente lorsqu'on laisse la possibilité de séparer le don, pour atteindre, dans nos tests, environ 1 heure. Le tableau 4.3 présente le détail des temps de résolution de chaque analyse multicritère (qui ont chacune générées 1 331 solutions). Si l'on compare le deuxième cas du PAM ainsi que les instances artificielles, on peut voir qu'en augmentant le nombre de transitaire, passant de quatre à sept, le temps de résolution augmente lui aussi. En effet, en ajoutant des variables au problème, cela ajoute des possibilités de solution et donc le temps de résolution est plus long. Comme déjà mentionné, ces temps de résolution sont pour la génération de 1 331 solutions. Il est donc facile de constater que pour un utilisateur normal, qui souhaite résoudre un seul problème, le temps de résolution est extrêmement faible.

TABLE 4.3 Temps de résolution de l'outil pour l'analyse multicritère (1 331 solutions) de chaque instance (en secondes)

Instances	Options	
	Sans possibilité de séparer le don	Avec possibilité de séparer le don
Cas 1	205.58	195.84
Cas 2	1	389.39
1	1 166.6	4 464.66
2	1 212.32	4 279.51
3	1 262.25	4 449.61
4	1 229.52	3 887.39
5	1 205.47	4 747.91
6	1 196.13	3 740.79
7	1 298.57	4 128.87
8	1 203.21	3 956.57
9	1 237.32	3 986.69
10	1 295.58	3 828.56

4.2.1 Premier cas du PAM

Lors de l'analyse du premier cas envoyé par le PAM (qui a généré 1 331 solutions en 3 minutes 25 secondes) l'OADMC propose deux solutions. Dans 89.82% des cas où le σ du critère des coûts est supérieur ou égal à la somme de ceux des critères sur le temps ($\sigma_3 \geq \sigma_1 + \sigma_2$), la solution proposée par l'OADMC est d'utiliser le transitaire numéro 3. Dans tous les autres cas, l'OADMC propose de sélectionner le transitaire numéro 4. Ceci n'est pas très surprenant lorsqu'on regarde le détail des données, puisque le transitaire numéro 3 est celui ayant les coûts les plus bas mais aussi celui ayant les temps de transport les plus long. Tandis que le transitaire numéro 4 a des coûts légèrement plus élevés (une moyenne de 0.04% de plus) mais a les temps de transport les plus rapides. Il est donc logique que si la proportion du critère des coûts est plus basse que ceux des temps, le transitaire recommandé soit le transitaire numéro 4. Nous avons fait une deuxième analyse multicritère sur ce cas, mais en laissant cette fois la possibilité de séparer le don à un ou plusieurs transitaires, ce qui a généré 1 331 solutions en 3 minutes 15 secondes. Dans cette analyse, l'OADMC propose 4 solutions. Une des solutions est d'utiliser le transitaire numéro 1 et numéro 3 (une partie des denrées chacun) lorsque le critère des coûts a un σ supérieur à 0.7142 ou lorsque le critère des coûts a un σ égal à 0.7142 et que les deux autres critères sont considérés (ils n'ont pas un σ de 0). Selon les autres différentes proportions de σ possibles, trois autres solutions sont proposées, soit d'envoyer un transitaire par EDP avec les transitaires numéro 1, 3 et 4, d'utiliser les transitaires numéro 1 et numéro 4 qui se séparent la quantité totale du don, ou encore de ne pas séparer le transport des denrées et de ne sélectionner que le transitaire numéro 4 pour faire le transport vers tous les EDP. Dans ce cas, le transitaire numéro 2 n'est jamais sélectionné, notamment à cause que ses coûts sont les plus élevés et parce que ses temps de transport

sont égaux à ceux du transitaire numéro 1 (qui, lui, offre de meilleurs coûts). Aussi, il est possible d'aller réduire les coûts de 1.96% en offrant la possibilité de séparer le transport des denrées entre plusieurs transitaires. Dans le graphique de la figure 4.1 on peut voir les quatre solutions proposées par l'OADMC lorsqu'il y a la possibilité de séparer le don. Les quatre solutions ont chacune 3 résultats, un pour chaque objectif. Les bandes sont à interpréter en terme de temps et la ligne en terme de coûts. Les bandes bleues représentent le résultat de l'objectif 1, soit le temps maximal pour se rendre aux EDP et les bandes oranges représentent le résultat de l'objectif 2, soit la somme des temps pour se rendre aux EDP. Pour ce qui est de la ligne, elle représente le résultat de l'objectif 3, soit la somme des coûts. Il est possible de constater que plus les temps de transport sont bas, plus les coûts sont élevés, ce qui est aussi le reflet des offres des transitaires.

4.2.2 Deuxième cas du PAM

Dans le deuxième cas envoyé par le PAM, lors de cette analyse multicritère une seule solution a été générée, puisque peu importe la proportion de chacun des critères, c'est toujours le même transitaire qui effectue le transport. La décision prise par le PAM est la même que proposée par l'OADMC, soit la solution optimale ($\bar{x}_z - x_z^* = 0$). Ceci peut facilement s'expliquer puisque le transitaire choisi (numéro 1) est celui qui a les coûts et les temps les plus bas dans la majorité des cas. Il y a deux cas d'exception : un autre transitaire (numéro 3) a pour un EDP un coût de transport légèrement plus bas (0.65%) et un autre transitaire (numéro 4) a pour un EDP en particulier un temps de transport égal au transitaire numéro 1. Nous avons donc fait une autre analyse multicritère sur ce cas, mais cette fois avec la possibilité de séparer le don et que le transport soit assuré par plus d'un transitaire. Lors de cette analyse 1 331 solutions ont été générés en 6 minutes 29 secondes. Si le transport du don peut être séparé entre plusieurs transitaires et

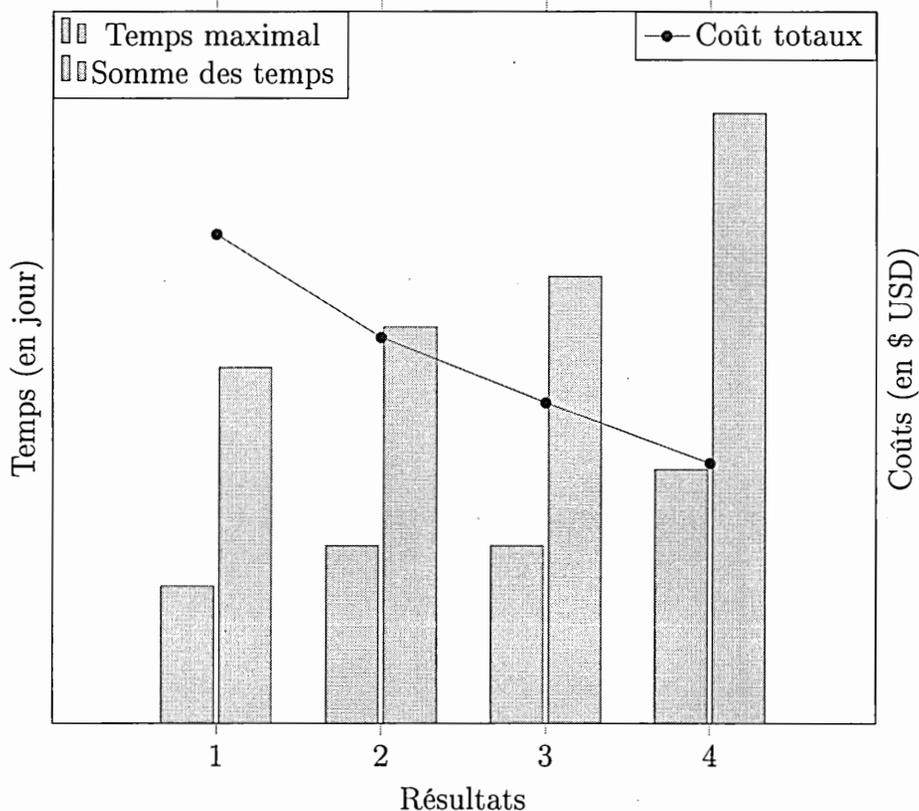


FIGURE 4.1 Premier cas du PAM avec option de séparer le don

que le seul critère pris en compte est le coût, la solution proposée par l'OADMC est d'utiliser deux transitaires, le transitaire numéro 3, celui ayant un coût de transport plus bas pour un EDP, est sélectionné pour faire le transport de la quantité de denrées qui va jusqu'à cet EDP et le transport du reste des denrées est assuré par le transitaire numéro 1, soit celui ayant les coûts et les temps les plus bas, pour les autres EDP. Si au contraire, les coûts ne sont pas pris en compte du tout, l'OADMC propose deux solutions et ces solutions dépendent des proportions des deux critères sur le temps. Une des solutions est de séparer le don entre le transitaire numéro 4 pour les denrées allant à un EDP spécifique (celui qui a le même temps de transport que le transitaire numéro 1) et le le transitaire numéro

1 pour le reste des denrées jusqu'aux autres EDP. L'autre solution proposée est de seulement sélectionner le transitaire numéro 1. Si le coût n'est pas le seul critère pris en compte, le don n'est jamais séparé et le transitaire choisi reste le même que lorsqu'il n'y a pas de possibilité de diviser le don (transitaire numéro 1). De plus, en laissant la possibilité de diviser le transport des denrées, il est possible de réduire les coûts de transport et manutention de 0.09%. Dans le graphique de la figure 4.2 où les bandes et la ligne représentent la même chose que pour la figure 4.1, on voit qu'encore une fois lorsque les temps de transport diminuent, les coûts augmentent. Par contre on peut voir que la deuxième solution propose les mêmes temps que la première solution, avec des coûts plus bas. Ceci permet de comprendre qu'il serait possible pour le PAM de réaliser des économies en laissant la possibilité que le transport soit effectué par plus d'un transitaire.

Suite aux quatre analyses effectuées sur les deux cas du PAM, il semblerait que plus un transitaire à des temps de transport rapide, plus il a des coûts élevés, ce qui se reflète sur les résultats proposés par l'OADMC comme le démontre les graphiques ci-haut. Toutefois, il ne nous a pas été possible de faire une courbe de Pareto 3-dimensions avec les solutions obtenus suite aux analyses multicritères, puisqu'il y avait trop peu de résultats. Si tous les offres de contrats reçus par le PAM suivent la même tendance, le problème du PAM, pourrait bien être bi-critère. En effet, dans les deux exemples, le transitaire ayant le plus court temps de transport maximal est toujours celui ayant la plus petite somme des temps de transport. Si tel est toujours le cas, de considérer un des deux critères sur le temps revient au même. De plus, en séparant le transport des denrées à plus d'un transitaire, nous avons vu qu'il était possible d'effectuer certaines économies, notamment au niveau des coûts.

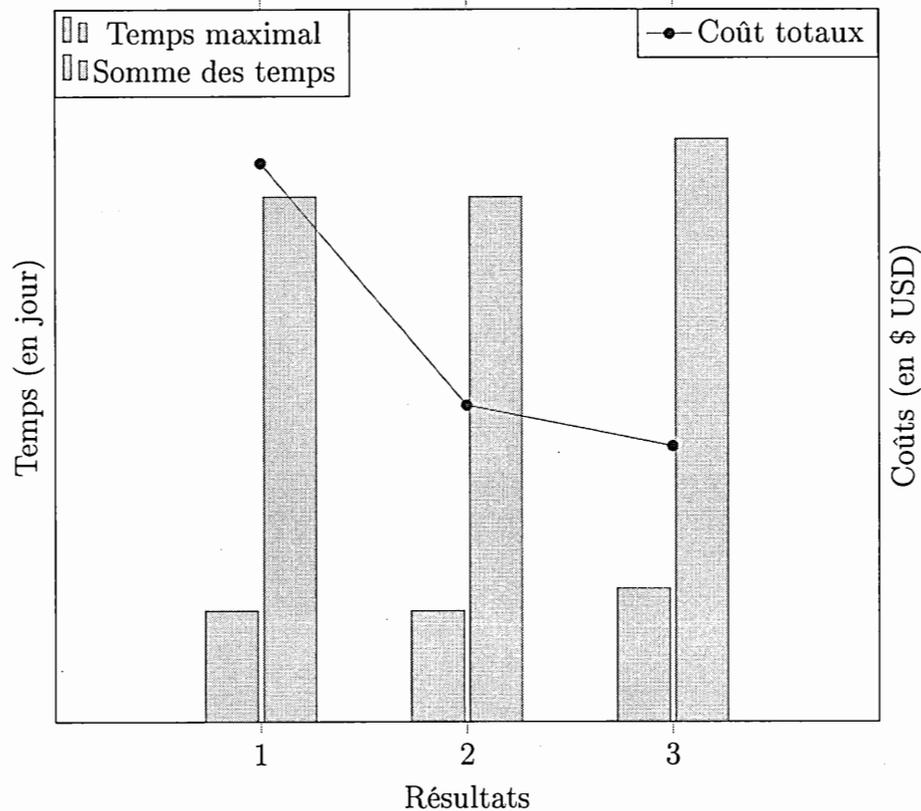


FIGURE 4.2 Deuxième cas du PAM avec option de séparer le don

4.2.3 Instances artificielles

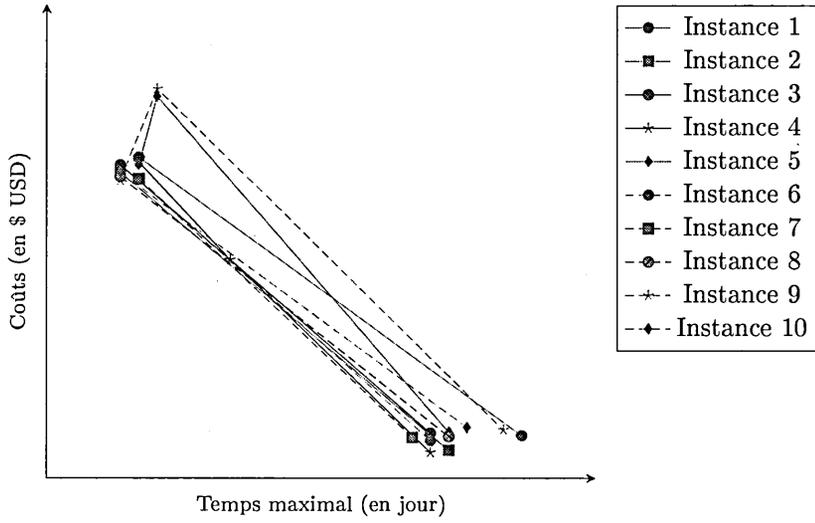
Lors des tests multicritères sur les 10 instances artificielles générées, dans le cas où on ne laissait pas la possibilité de séparer le don, les transitaires 2 et 6 étaient ceux proposés, et ce, dépendamment des poids sur les différents critères. En moyenne, le transitaire 2 est préféré dans 81.70% des cas (avec un écart-type de 0.41%), tandis que le transitaire 6 est dans 18.10% des cas (avec un écart-type de 0.33%). Le transitaire 2 est dans les plus cher, par contre c'est le plus rapide et le transitaire 6 est le deuxième plus lent, mais le moins cher. Pour ce qui est des transitaires avec des coûts et temps moyens, seul le transitaire 3 a été sélectionné, et seulement dans

10 solutions d'une des instances. De plus, dans deux instances, le transitaire 1 est proposé, dans une seule solution pour deux instances. On peut donc comprendre que ce sont les transitaires qui ont des coûts et temps aux extrêmes qui ont le plus de chance d'obtenir le contrat.

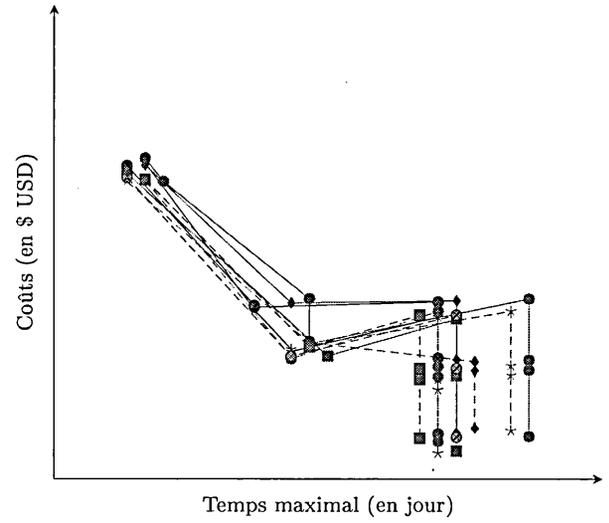
Dans les tests où l'on laissait la possibilité de séparer le transport du don, nous avons fixé la limite minimale δ à transporter à 2 500 tonnes, puisque c'est présentement la limite des contrats à long terme. C'est encore majoritairement les transitaires 2 et 6 qui sont sélectionnés, dans en moyenne respectivement 75.90% et 13.20% des solutions, avec des écart-types de 1.44% et 1.70%. En moyenne seulement 8.30% des solutions proposent de séparer le don à plus d'un transitaire, soit les transitaires 2 et 6, et 3 et 6. En séparant le don, cela permet d'avoir des solutions moins coûteuses que si le transitaire 2 avait été seul, mais plus rapide, au niveau de la somme des temps, que si le transitaire 6 avait été seul. On peut donc comprendre que le PAM, pourrait tirer profit de cette possibilité pour assurer de meilleurs coûts sans pour autant avoir de trop grand temps de transport.

Nous avons défini la frontière de Pareto pour les 10 instances, pour tenter de comprendre comment réagissent les différents critères entre eux. Nous avons étudié le temps maximal en fonction des coûts, ainsi que la somme des temps en fonction des coûts pour les deux types d'analyses (avec ou sans possibilité de séparer le don). Les graphiques sont disponibles en figure 4.3 et 4.4. Lorsqu'il n'est pas possible de séparer le don, on voit que majoritairement, lorsque les temps augmentent, les coûts diminuent. Comme nous avons seulement 2 à 3 solutions uniques par instances, il est difficile de trouver une courbe représentative, ce sont plutôt des droites, avec une pente moyenne de -32520 pour le temps maximal et de -6895.6 pour la somme des temps. Par contre, on voit que lorsqu'il y a 3 solutions, il peut y avoir une légère augmentation au niveau des temps et des coûts. Au niveau de la

frontière de Pareto avec la possibilité de séparer le don, on voit la tendance encore une fois de diminution de coûts lorsque les temps augmentent. Par contre, cette dernière est plus complexe après un certain point. En effet dans la première partie des graphiques, on voit clairement une droite avec une pente négative, où les coûts diminuent lorsque les temps augmentent. Dans la figure 4.3 (b) la première partie du graphique a une pente moyenne de -39070 et dans la figure 4.4 (b) la pente moyenne est de -3315. Par contre, après un certain point, on voit que les coûts restent plutôt stables, mais augmentent tout de même légèrement. On voit que vers la fin du graphique, les coûts diminuent drastiquement. Le temps maximal d'une solution est défini par la valeur des temps qui ont instanciés le problème. En effet, le temps maximal est la plus grande valeur, entre toutes celles calculées pour se rendre à chaque EDP, en sommant les temps de transport et de manutention sur tout le réseau, à partir du don jusqu'à chaque EDP. On voit avec le graphique 4.3 (b) que pour un certain temps maximal, il y a plusieurs valeurs de coûts. Ceci est dû au fait qu'on laissait la possibilité de séparer le transport du don. Il était donc possible de sélectionner plus d'un transitaire et que les transitaires desservent différents EDP. Dans le cas présent, pour une même valeur de temps maximal, il y avait plusieurs possibilités de somme de temps et de coûts, tout dépendant quel transitaire transporte quelle quantité vers quel EDP, comme le démontre la figure 4.4 (b) avec une pente moyenne de -13205. Lorsqu'on augmente la valeur de δ , cela laisse moins de possibilité de transport et donc les solutions se rapprochent de plus en plus des solutions où l'on ne permet pas de séparer le don. De l'autre côté, lorsqu'on diminue la valeur de δ , cela laisse plus de possibilité à l'algorithme et la frontière de Pareto pour le temps maximal et pour la somme des temps, en fonction des coûts est sensiblement la même. En effet, avec les mêmes données et un δ de 1 000 tonnes au lieu de 2 500 pour les temps maximaux la pente moyenne est de -22967.7 et pour la somme des temps elle est de -6869.57.

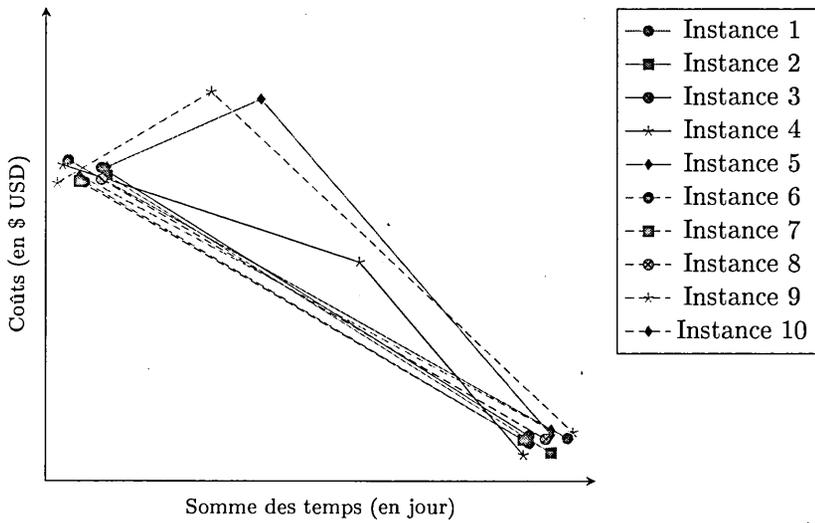


(a) Sans possibilité de séparer le don

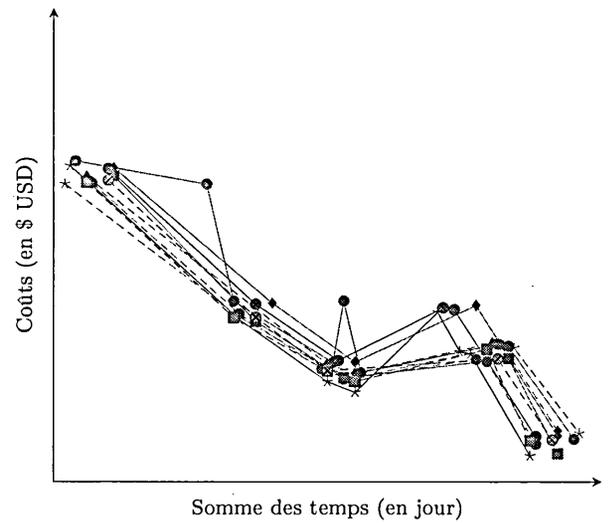


(b) Avec possibilité de séparer le don

FIGURE 4.3 Frontière de Pareto des 10 instances artificielles pour le temps maximal en fonction des coûts



(a) Sans possibilité de séparer le don



(b) Avec possibilité de séparer le don

FIGURE 4.4 Frontière de Pareto des 10 instances artificielles pour la somme des temps en fonction des coûts

Ces analyses nous permettent de comprendre qu'il y a une relation directe entre les coûts et les temps de transport. De plus, les temps maximaux et les sommes de temps sont généralement comparables, notamment pour les cas où on ne sépare pas le don. Si la structure des temps des transitaires est toujours la même que celle représenté ici (avec temps maximaux et sommes des temps comparables), le problème est plutôt bi-critère. De plus, il est possible de voir qu'en offrant la possibilité de séparer le don, il est possible d'aller chercher certaines économies en ne restant pas dans les extrêmes de « coûts élevés ; temps bas » et « coûts bas ; temps élevés ».

4.3 Discussion et recommandations

Puisque les logisticiens du PAM ont les informations des offres de contrat avant de prendre leur décision, nous avons procédé de la même façon pour les analyses. Il faut aussi avoir en tête que les données des deux cas du PAM sont ce que les transitaires indiquent sur les offres de contrat et puisque ce sont des contrats, les prix ne peuvent pas bouger. Par contre, les temps de transport vers les EDP peuvent être différents dans la réalité que ce qui était indiqué dans l'offre. Lorsque les transitaires ne respectent pas les temps indiqués dans leurs contrats, ils ont des pénalités en dollars USD par tonne par jour de retard. Par contre, comme déjà mentionné, les temps de transport sont parfois cruciaux et il est nécessaire d'avoir les denrées à des EDP pour des dates très précises. En effet, malgré qu'il y ait des pénalités, l'argent de ces pénalités ne permettra pas de nourrir des bénéficiaires qui manquent leur ration journalière en raison des retards. De plus, les logisticiens doivent être vigilants avec l'attribution de poids sur les différents critères. En effet, dépendamment de l'importance des critères dans l'optimisation, l'outil peut proposer des solutions différentes en donnant de bons résultats pour un ou certains critères, et ce, au détriment des autres.

Présentement, le PAM fait des demandes d'offres de transport aux transitaires pour la quantité totale du don. Si l'organisme souhaite prendre avantage des possibles économies en laissant le transport à plus d'un transitaire, ils devront revoir leur contrat avec les transitaires pour s'assurer que les transitaires soient conscients que les offres reçues pourraient n'être acceptées qu'en partie. De plus, en laissant l'option de séparer le don à plus d'un transitaire, le PAM devra être vigilant pour indiquer une valeur δ représentative des quantités minimales que les transitaires acceptent réellement de transporter pour l'offre qu'ils ont fait.

Avec les données que nous avons, il n'a pas été possible de tester le modèle avec plus d'un port. Ceci est dû au fait que présentement le PAM fonctionne de façon séquentielle en déterminant le port, pour ensuite faire des demandes aux transitaires de ce port. Il n'y a donc pas de données réalistes sur une offre de transport pour une même commodité et une même quantité de denrées dans au moins deux ports différents. Dans de futures recherches, il serait intéressant de compiler des données avec plusieurs ports pour pouvoir comparer les temps et les coûts proposés selon les différents tracés des transitaires dans les différents pays (les corridors de transport). Notre modèle étant déterministe, nous ne considérons pas les facteurs externes dans notre modèle. Il serait très utile pour le PAM d'utiliser notre modèle en le jumelant avec un modèle d'évaluation des risques. En effet, en soumettant les coûts et temps proposés par un transitaire à un modèle d'évaluation des risques, qui évaluerait les temps et les coûts projetés, selon certains facteurs de risques sur les différents corridors de transport et selon les transitaires, le PAM pourrait utiliser les temps et coûts extrants de ce modèle pour les utiliser dans l'OADMC. Les résultats de ces modèles combinés pourraient certainement apporter une dimension plus réaliste aux choix proposés par l'outil, et ainsi appuyer davantage les preneurs de décisions.

L'OADMC est présenté comme un outil déterministe prescriptif, mais dans le cadre des opérations du PAM, les preneurs de décisions pourraient effectuer des analyses en intégrant de la variabilité dans les paramètres. En effet, plusieurs analyses pourraient être effectuées par le PAM, grâce à l'OADMC, pour permettre aux preneurs de décisions d'avoir de l'information sur les différentes décisions possibles et leurs impacts. Pour ce faire, il serait nécessaire d'avoir une collecte des données qui est standardisée. Plus précisément, les données historiques de tous les offres de contrat au niveau des temps et des coûts de transport de tous les transitaires devront être sauvegardées. De plus, des analyses entre les temps indiqués dans les offres et les temps réels devront être faits, dans l'optique d'avoir des éléments concrets par mois et par année des performance de chacun des transitaires, au niveau des temps. Toutes ces données permettront d'effectuer des analyses plus précises en intégrant de la variabilité avec les données réelles des transitaires, en ce basant sur les offres passées. Dans cette optique, l'OADMC pourra être d'autant plus utile aux logisticiens du PAM, puisqu'il sera possible de faire des analyses de scénarios pour déterminer la solution la plus efficace considérant la situation actuelle. Aussi, toutes ces informations conservées permettraient de garder des données historiques sur les transitaires. Ce qui pourrait éventuellement, permettre d'avoir des négociations plus proactives entre le PAM et les transitaires, à savoir les temps prévus d'un transitaire qui sont toujours respectés ou pas, par exemple.

CHAPITRE V

CONCLUSION

Ce projet avait pour but de concevoir un outil d'aide à la décision pour soutenir les logisticiens du PAM au Niger dans leur prise de décision lorsque des denrées proviennent de l'international par bateau. Ce pays n'ayant pas accès à la mer fait face à plusieurs obstacles pour faire acheminer les denrées alimentaires aux bénéficiaires de l'aide alimentaire. Il faut déterminer à quel port d'un des pays voisins les denrées vont transiger et quel transitaire va faire le transport des denrées jusqu'aux EDP, tout en utilisant aux mieux les ressources disponibles provenant de dons.

L'objectif de cette recherche a été atteint, puisqu'à l'aide de méthodologies de modélisation et d'optimisation nous avons développé un outil d'aide à la décision déterministe prescriptif multicritère qui permettra d'assister les preneurs de décisions, pour la sélection du transitaire qui fera le transport de denrées alimentaires provenant de l'international, vers le Niger. Le projet avait cinq objectifs sous-jacents, qui ont tous pu être atteints, grâce à l'utilisation d'une méthodologie éprouvée en cinq étapes. Premièrement, faire une collecte et une analyse des données pour comprendre l'étendue de la problématique. Nous avons été en mesure d'avoir assez de données primaires, secondaires et tertiaires de la part de l'organisme pour avoir une vue globale de la problématique à l'étude. Deuxièmement,

formuler et modéliser le problème de façon réaliste en utilisant les principes de la recherche opérationnelle, c'est-à-dire à l'aide d'un modèle de programmation mathématique et multicritère. Ce que nous avons fait dans un premier temps avec un graphe pour valider avec le PAM que notre modèle correspondait à leur problématique, ensuite avec le modèle mathématique, pour pouvoir concevoir l'outil d'aide à la décision. Troisièmement, résoudre le problème, analyser et valider les résultats obtenus pour s'assurer qu'ils soient admissibles pour le PAM. En effet, nous avons effectué des tests avec des données réelles dans l'OADMC pour s'assurer que le modèle donnait des résultats meilleurs ou équivalents par rapport à des exemples de décisions passées prises par les gestionnaires au PAM. Quatrièmement, faire une analyse multicritère pour évaluer certains arbitrages, ce que nous avons pu faire grâce à l'analyse de deux cas réels fournis par l'organisme, mais aussi en ayant générées quelques instances artificielles pour s'assurer de la robustesse du modèle. Dernièrement, permettre la transférabilité de l'outil au PAM, c'est pourquoi nous nous sommes assurés d'utiliser des programmes gratuits, facilement accessibles et facile d'utilisation. L'OADMC n'a pas été encore transféré au PAM, par contre nous sommes confiants qu'avec les explications du fonctionnement de l'outil de la section 3.5 et les composantes de l'outil (solveur gratuit et utilisation d'Excel) la transférabilité pourra se faire sans problème.

Les cas du PAM ne comprenaient que les informations d'offres de contrat des transitaire d'un seul port, il n'a donc pas été possible de faire des analyses en considérant plus d'un port, puisqu'aucune donnée historique n'est actuellement disponible. De plus, il n'y avait des données historiques sur les temps de transport que sur deux des quatre transitaires à l'étude. Il ne fut donc pas possible de faire des scénarios pour comparer les temps proposés et les temps passés réels, pour ajouter de la variabilité aux analyses. Dans cette ordre d'idée, il serait intéressant dans un projet futur de se pencher sur des analyses de scénarios avec l'OADMC

en incluant de la variabilité sur les paramètres, entre autres sur les temps de transport qui peuvent être variables à cause de l'efficacité des transitaires, mais aussi en lien avec les différents risques sur les corridors de transport en Afrique de l'Ouest.

Une des limites de notre modèle est qu'il n'est pas possible d'avoir plus de 4 commodités, 3 ports et 7 transitaires et qu'il y a un maximum de 9 destination. Par contre dans le cas d'utilisation du PAM, ce sont des nombres suffisants, puisqu'ils ont rarement plus de 2 commodités et plus de 7 transitaires qui font des offres pour un même port. De plus, ils utilisent présentement seulement 3 ports comme point d'entrée. Aussi la variabilité n'est pas prise en compte puisque c'est un modèle déterministe, mais comme déjà mentionné, il serait possible pour le PAM de faire des scénarios de tests ou encore de combiner l'OADMC avec un modèle d'évaluation des risques pour avoir des solutions encore plus réalistes.

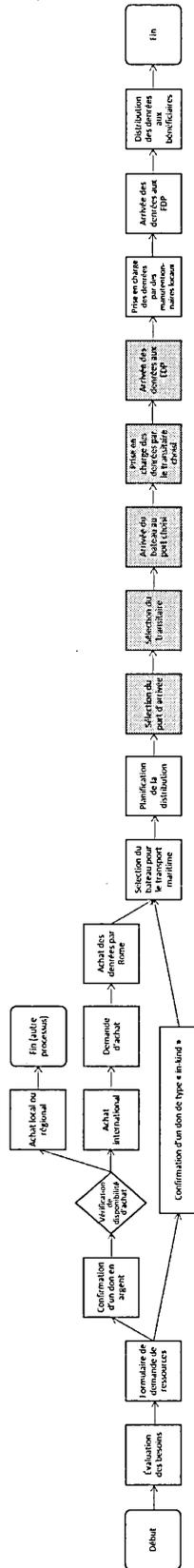
En conclusion, ce projet est très pertinent puisqu'il s'enracine dans une problématique réelle et qu'il comble une lacune dans la littérature. L'outil d'aide à la décision multicritère (OADMC) développé aura un impact autant sur les populations bénéficiant de l'aide alimentaire au Niger que sur la communauté scientifique. En effet, la méthodologie utilisée dans ce contexte est novatrice, puisque peu de méthodes appliquent un modèle d'optimisation déterministe multicritère dans un outil d'aide à la décision pour ce type de problème dans les réseaux de transport vers un pays enclavé. L'utilisation de l'OADMC permettra de soutenir les logisticiens dans leurs prises de décision et d'améliorer la gestion des ressources pécuniaires et temporelles du PAM au Niger, pour, nous l'espérons, permettre de nourrir plus de bénéficiaires dans des temps plus rapide. L'OADMC a été conçu spécifiquement pour le cas du PAM au Niger, néanmoins, il pourrait assurément être utilisé dans des contextes similaires pour le transport de denrées ou de mar-

chandises où les preneurs de décisions doivent composer avec des coûts et des temps restreints.

ANNEXE A

PROCESSUS COMPLET D'ACHEMINEMENT DE DENRÉES ALIMENTAIRES AU NIGER

La figure du processus complet d'acheminement de denrées alimentaires au Niger est disponible à la page suivante en format paysage.



BIBLIOGRAPHIE

- Altay, N. et Green, W. (2006). OR/MS Research in Disaster Operations Management. *European Journal of Operational Research*, 175(1), 475–493.
- Alvarenga, R., Ergun, Ö., Li, J., Mata, F., Shekhani, N., Slaton, D., Stone, J., Vasudevan, A. et Yang, E. (2010). *World Food Programme East African Corridor Optimization*. Rapport technique, H. Milton Stewart School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Anaya-Arenas, A., Renaud, J. et Ruiz, A. (2014). Relief Distribution Networks : A Systematic Review. *Annals of Operations Research*, 223(1), 53–79.
- Arvis, J.-F., Raballand, G. et Marteau, J.-F. (2010). *The cost of being landlocked : logistics costs and supply chain reliability*. World Bank Publications.
- Aviles, S., Bah, E., Jimenez, M., Li, L., Morales, A. et Wade, J. (2008). *World Food Programme Supply Chain Optimization*. Rapport technique, H. Milton Stewart School of Industrial and Systems Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Balcik, B., Beamon, B., Krejci, C., Muramatsu, K. et Ramirez, M. (2010). Coordination in Humanitarian Relief Chains : Practices, Challenges and Opportunities. *International Journal of Production Economics*, 126(1), 22–34.
- Balcik, B., Beamon, B. et Smilowitz, K. (2008). Last Mile Distribution in Humanitarian Relief. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 12(2), 51–63.
- Bendoly, E. (2016). Fit, Bias, and Enacted Densemaking in Data Visualization : Frameworks for Continuous Development in Operations and Supply Chain Management Analytics. *Journal of Business Logistics*, 37(1), 6–17.
- Blanning, R. W. (1979). The functions of a decision support system. *Information & management*, 2(3), 87–93.
- Blecken, A. (2010). Supply Chain Process Modelling for Humanitarian Organizations. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 40(8/9), 675–692.

- Bozorgi-Amiri, A., Jabalameli, M. et Mirzapour Al-e Hashem, S. (2013). A Multi-Objective Robust Stochastic Programming Model for Disaster Relief Logistics Under Uncertainty. *OR Spectrum*, 35(4), 905–933.
- Campbell, A. et Jones, P. (2011). Prepositioning Supplies in Preparation for Disasters. *European Journal of Operational Research*, 209(2), 156–165.
- Çelik, M., Ergun, Ö., Johnson, B., Keskinocak, P., Lorca, Á., Pekkün, P. et Swann, J. (2012). Humanitarian Logistics. In *New Directions in Informatics, Optimization, Logistics, and Production* 18–49. INFORMS.
- Clímaco, J. C., Craveirinha, J. M. et Pascoal, M. M. (2006). An automated reference point-like approach for multicriteria shortest path problems. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 15(3), 314–329.
- Coppola, D. (2015). *Introduction to International Disaster Management* (3 éd.). Boston : Butterworth-Heinemann.
- Crainic, T. et Kim, K. (2007). Intermodal Transportation. In *Handbooks in Operations Research and Management Science*, volume 14 chapitre 8, 467–537. Elsevier.
- Das, R. et Hanaoka, S. (2014). An Agent-Based Model for Resource Allocation During Relief Distribution. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 4(2), 265–285.
- De La Torre, L., Dolinskaya, I. et Smilowitz, K. (2012). Disaster Relief Routing : Integrating Research and Practice. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1), 88–97.
- Dufour, É., Laporte, G., Paquette, J. et Rancourt, M.-È. (2017). Logistics Service Network Design for Humanitarian Response in East Africa. *Omega*.
- Ehrgott, M. (2005). *Multicriteria optimization*, volume 491. Springer Science & Business Media.
- Foley, É. et Guillemette, M. G. (2010). What is business intelligence? *International Journal of Business Intelligence Research (IJBIR)*, 1(4), 1–28.
- Galindo, G. et Batta, R. (2013). Review of Recent Developments in OR/MS Research in Disaster Operations Management. *European Journal of Operational Research*, 230(2), 201–211.
- Gapso analytics (2019). UFFLP : Simply and easily integrating Mixed Integer Programming with Spreadsheets. Accédé le 01-07-2019. Récupéré de <http://www.gapso.com.br/en/ufflp-en/>

- Govindan, K., Fattahi, M. et Keyvanshokoo, E. (2017). Supply Chain Network Design Under Uncertainty : A Comprehensive Review and Future Research Directions. *European Journal of Operational Research*, 263(1), 108–141.
- Gralla, E., Goentzel, J. et Fine, C. (2014). Assessing Trade-offs among Multiple Objectives for Humanitarian Aid Delivery Using Expert Preferences. *Production and Operations Management*, 23(6), 978–989.
- Gregor, S. et Hevner, A. R. (2013). Positioning and presenting design science research for maximum impact. *MIS quarterly*, 337–355.
- Grodzevich, O. et Romanko, O. (2006). Normalization and other topics in multi-objective optimization.
- Haavisto, I. et Goentzel, J. (2015). Measuring Humanitarian Supply Chain Performance in a Multi-Goal Context. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 5(3), 300–324.
- Holguín-Veras, J., Jaller, M., Van Wassenhove, L., Pérez, N. et Wachtendorf, T. (2012). On the Unique Features of Post-Disaster Humanitarian Logistics. *Journal of Operations Management*, 30(7), 494–506.
- Jahre, M., Kembro, J., Rezvanian, T., Ergun, Ö., Håpnes, S. et Berling, P. (2016). Integrating Supply Chains for Emergencies and Ongoing Operations in UNHCR. *Journal of Operations Management*, 45, 57–72.
- Kokina, J., Pachamanova, D. et Corbett, A. (2017). The Role of Data Visualization and Analytics in Performance Management : Guiding Entrepreneurial Growth Decisions. *Journal of Accounting Education*, 38, 50–62.
- Koutsoukis, N.-S. et Mitra, G. (2003). *Decision modelling and information systems : The information value chain*. Springer Science & Business Media.
- Kovács, G. et Spens, K. (2007). Humanitarian Logistics in Disaster Relief Operations. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 37(2), 99–114.
- Leiras, A., de Brito Jr, I., Queiroz Peres, E., Rejane Bertazzo, T. et Tsugunobu Yoshida Yoshizaki, H. (2014). Literature Review of Humanitarian Logistics Research : Trends and Challenges. *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, 4(1), 95–130.
- Logistics Capacity Assessment (LCA) (2014). Logistics Capacity Assessment. Niger Road Network. Accédé le 02-02-2017. Récupéré

de <http://dlca.logcluster.org/display/public/DLCA/2.3+Niger+Road+Network;jsessionid=9B94FC5382C26E3F2AD9105B0BDC16C5>

Nathan Associates Inc. (2013). *Logistics Cost Study of Transport Corridors in Central and West Africa*. Rapport technique, Africa Transport Unit : The World Bank.

Oloruntoba, R. et Gray, R. (2006). Humanitarian Aid : An Agile Supply Chain ? *Supply Chain Management : An International Journal*, 11(2), 115–120.

Park, J., Fables, W., Parker, K. et S. Nitse, P. (2010). The Role of Culture in Business Intelligence. *International Journal of Business Intelligence Research*, 1(3), 1–14.

Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A. et Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. *Journal of management information systems*, 24(3), 45–77.

Rancourt, M.-È., Bellavance, F. et Goentzel, J. (2014). Market Analysis and Transportation Procurement for Food Aid in Ethiopia. *Socio-Economic Planning Sciences*, 48(3), 198–219.

Rancourt, M.-È., Cordeau, J.-F., Laporte, G. et Watkins, B. (2015). Tactical Network Planning for Food Aid Distribution in Kenya. *Computers & Operations Research*, 56, 68–83.

Rancourt, M.-È. et Paquette, J. (2014). Multicriteria Optimization of A Long-Haul Routing and Scheduling Problem. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 21(5-6), 239–255.

Ransikarbum, K. et Mason, S. (2016). Multiple-Objective Analysis of Integrated Relief Supply and Network Restoration in Humanitarian Logistics Operations. *International Journal of Production Research*, 54(1), 49–68.

Sahinyazan, F. D., Rancourt, M.-È. et Verter, V. (2017). Price Flexible Transportation Procurement Contracts for Food Aid Delivery in Developing Countries. *CIRRELT-2017-65*.

Schulz, S. et Heigh, I. (2009). Logistics Performance Management in Action within a Humanitarian Organization. *Management Research News*, 32(11), 1038–1049.

Shan, S. et Yan, Q. (2017). *Emergency Response Decision Support System* (1st éd.). Springer Publishing Company, Incorporated.

- Shim, J. P., Warkentin, M., Courtney, J. F., Power, D. J., Sharda, R. et Carlsson, C. (2002). Past, present, and future of decision support technology. *Decision support systems*, 33(2), 111–126.
- StadieSeifi, M., Dellaert, N., Nuijten, W., Van Woensel, T. et Raoufi, R. (2014). Multimodal Freight Transportation Planning : A Literature Review. *European journal of Operational Research*, 233(1), 1–15.
- Teravaninthorn, S. et Raballand, G. (2009). *Transport Prices and Costs in Africa : A Review of the Main International Corridors*. World Bank Publications.
- Tofighi, S., Torabi, S. et Mansouri, S. (2016). Humanitarian Logistics Network Design Under Mixed Uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 250(1), 239–250.
- UN Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (UNOCHA) (2010). Niger : Crise de la sécurité alimentaire. Aperçu. ReliefWeb : Infographic.
- Von Alan, R. H., March, S. T., Park, J. et Ram, S. (2004). Design science in information systems research. *MIS quarterly*, 28(1), 75–105.
- World Food Programme (WFP) (2016). *Fighting Hunger WorldWide : Enhancing the resilience of chronically vulnerable populations in Niger*. Standard Project Report (PRRO 200583). Republic of (NE) : WFP.
- World Food Programme (WFP) (2018a). *Operations*. Accédé le 21-10-2018. Récupéré de <https://www.wfp.org/operations>
- World Food Programme (WFP) (2018b). *WFP Niger : Country Brief*. Juillet.