

Système d'aide à la décision pour le déploiement en situation d'urgence

DJAMEL BERKOUNE, MONIA REKIK, ANGEL RUIZ, JACQUES RENAUD

¹ Centre Interuniversitaire de Recherche sur les Réseaux d'Entreprise, la Logistique et le Transport (CIRRELT).
Université Laval, Québec, Canada

Djamel.Berkoune@cirrelt.ca, Monia.Rekik@cirrelt.ca, Angel.Ruiz@fsa.ulaval.ca, Jacques.Renaud@fsa.ulaval.ca

Résumé – Cet article présente un modèle d'optimisation et un système d'aide à la décision afin de planifier le déploiement de l'aide vers des régions sinistrées. L'approche proposée permet de répondre à trois questions principales : Combien de centres de distribution faut-il ouvrir, où ces centres doivent-ils être localisés et quelles ressources doivent leur être attribuées ? Le système peut être utilisé seul ou en mode interactif avec un décideur. Finalement, le système est complété par un module d'aide à la décision multicritère.

Abstract - This article presents an optimization model and a decision support system to provide assistance to disaster areas in crisis situations. The proposed approach answers three main questions: How many distribution centers should be open, where these centers should be placed and what resources must be allocated to each open center? The system can be used interactively with a decision maker and is coupled with a multi-criteria analysis module.

Mots clés - Logistique humanitaire, Modélisation, Localisation.

Keywords - Emergency logistics, Modeling, Location.

1 INTRODUCTION

À travers l'histoire, l'humanité a fait face à de multiples situations de crises. L'occurrence d'un désastre présente plusieurs défis au niveau de la capacité de prévention, des actions de réponse et de la vitesse de récupération. Une bonne maîtrise des systèmes de gestion des situations d'urgence est primordiale pour minimiser les pertes tant humaines qu'économiques. Un sinistre exige un déploiement de ressources de secours de façon coordonnée et efficace. Les équipages de sauvetage et les médicaments doivent être distribués dans les zones affectées de façon rapide et équitable. C'est dans cet objectif que la logistique d'urgence est devenue au cours des dernières années un objet d'intérêt privilégié pour les chercheurs [Sheu, 2007a].

Le déploiement physique du réseau logistique sur le terrain est un élément central qui détermine la réactivité, la capacité ainsi que la rapidité du réseau à faire face aux demandes des sinistrés. L'organisation des lieux du sinistre a pour objectif d'assurer la sécurité de la population et des intervenants et de faciliter l'arrivée et la distribution de l'aide. Pour ce faire, plusieurs dépôts, ou *Centres de Distribution de l'Aide Humanitaire* (CDAH) doivent être ouverts afin d'offrir des ressources aux sinistrés. La sélection des sites permettant d'ouvrir un CDAH est une décision hautement stratégique. En plus de la distribution de l'aide, les CDAH doivent remplir plusieurs rôles comme le support, l'hébergement et la restauration des secouristes.

Plusieurs travaux [Haddow, Bullock et Coppola, 2008 ; Lindell, Prater et Perry, 2007] définissent un processus de gestion et de planification en cas de crise. Ce processus comprend quatre grandes phases. La première phase est l'« atténuation » où l'objectif est d'éliminer ou de réduire les risques et les impacts d'un sinistre futur. La seconde phase est la « préparation » qui consiste à prendre des mesures

préparatoires pour éviter les conséquences négatives associées à une menace donnée. La troisième phase est la « réponse » ou l'« intervention » lors du sinistre, elle correspond à la mobilisation et au déploiement des services d'urgence à l'intérieur de la zone sinistrée dans le but de protéger la population et réduire les dommages humains et matériels. La dernière phase est celle de « récupération », ou de *rétablissement*, elle correspond aux mesures menant au retour à la normale, c'est-à-dire, à un niveau de vie de même qualité que ce qu'il était avant le sinistre. Une revue des applications de la recherche opérationnelle aux situations d'urgence [Altay et Green, 2006] montre que près de la moitié des articles porte sur la phase d'atténuation et que plus de recherches sont nécessaires, particulièrement dans la phase de réponse. De façon complémentaire [Balcik et al, 2010] concluent que si les chaînes logistiques industrielles ont été bien traitées, les études sur les chaînes logistiques dans le contexte de la gestion des urgences en sont encore qu'à leurs premiers balbutiements.

Parmi les premières décisions que les décideurs doivent prendre suite à un sinistre, le choix du nombre et de l'emplacement des CDAH qui garantiront une aide adéquate en des temps relativement courts est d'une importance prépondérante. Ces décisions doivent prendre en compte la nature de la demande d'aide, de la position géographique des zones sinistrées, de la sévérité des dommages, des caractéristiques des sites potentiels où les CDAH peuvent être placés, etc. Ces décisions doivent être prises sans tarder afin de permettre une mise en œuvre rapide des services d'urgences et de la livraison de l'aide humanitaire. Les points de demande, que nous appellerons par la suite *zones sinistrées*, correspondent à toutes les localisations qui doivent recevoir de l'aide. Cela peut correspondre à un hôpital, à un centre communautaire ou même à des maisons précises si le sinistre est tel que les gens ne peuvent se déplacer.

L'aide humanitaire qui devra être acheminée vers ces zones peut être de toute sorte. Elle peut correspondre à des produits tangibles (repas, produits sanitaires, médicaments, eau, lits, etc.) ou à des services (sécurisation d'un pont, rétablissement d'une ligne électrique, etc.).

L'analyse de la littérature montre que les travaux sur cette problématique sont récents. Ce n'est qu'au cours des dix dernières années que la communauté scientifique a commencé à accorder une certaine importance à la logistique d'urgence (*emergency logistics*).

Cet article présente un système d'aide à la décision complet permettant la localisation de centres d'aide humanitaire lors de situations de crise. Le système optimise les décisions quant au nombre et à l'emplacement des CDAH afin de répondre au besoin des sinistrés à l'intérieur de temps de couvertures déterminés. Le système proposé est autonome ou peut être utilisé de façon interactive. Tous les résultats sont enregistrés et envoyés vers un module d'analyse multicritère où les décideurs peuvent calibrer leurs préférences par rapport aux qualités souhaitées d'un bon plan de déploiement. En fonction des préférences exprimées, le système permet de déterminer le meilleur déploiement.

L'approche de résolution proposée répond à trois questions principales :

- (1) Combien de centres de distribution d'aide humanitaire (CDAH) doivent être ouverts?
- (2) Où ces CDAH doivent-ils être placés?
- (3) Quelles sont les ressources (personnel et matériel) qui doivent être attribuées à chaque CDAH ouvert?

Nous proposons pour la résolution de ce problème une approche de modélisation qui décompose le problème en trois sous-problèmes où la prise de décision est effectuée de façon itérative à l'aide de modèles mathématiques.

La suite de cet article est organisée comme suit. Une brève revue de littérature est présentée à la Section 2. La section 3 définit formellement le problème et la modélisation est effectuée à la Section 4. Les résultats numériques sont présentés à la Section 5. La Section 6 décrit brièvement le système d'aide à la décision déployé et la Section 7 présente nos conclusions.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

Étant donné la forte médiatisation des catastrophes naturelles des dernières années, l'intérêt de la communauté scientifique pour la gestion de la logistique d'urgence a littéralement explosé au cours des dernières années. Un numéro spécial du « *Journal of Transportation Research Part E* » publié en 2007 a été dédié à la logistique d'urgence. Cette section effectue un bref survol de la littérature pertinente en logistique d'urgence plus particulièrement sur les recherches sur la localisation des installations et sur les systèmes d'aide à la décision.

2.1 Localisation

[Tzeng et al. 2007] proposent un modèle de distribution de l'aide humanitaire en utilisant la programmation multi-objectif. Trois objectifs sont pris en compte, la minimisation des coûts, la minimisation du temps des voyages et la maximisation de la satisfaction des points de la demande. Le but du modèle est de décider des centres à ouvrir et des quantités de produits à transporter à partir des points de distribution vers les points de demande. Dans un autre contexte, [Yi et Özdamar, 2007] proposent un modèle intégré de localisation et de distribution (*location-routing*) sur un horizon de plusieurs périodes. Les auteurs proposent une procédure en deux étapes. La première

détermine la quantité de flux (produits et blessés) à travers chaque arc du réseau à chaque période de l'horizon de planification afin de minimiser une somme pondérée de la demande non satisfaite pour tous les produits et toutes les demandes de transport. Ce problème est modélisé en utilisant une formulation en nombres entiers. La deuxième étape vise à construire des routes pour les véhicules.

2.2 Aide à la décision en gestion de crise

[Chang et al. 2007] proposent un système d'aide à la décision pour la planification logistique en cas d'inondation, qui prend en compte l'aspect incertain du problème. Ils ont présenté deux modèles de programmation stochastique pour déterminer les emplacements des centres de distribution, les quantités requises d'équipement ainsi que la distribution de ces équipements. Des plans de déploiement robuste sont produits en utilisant la méthode SAA (*Sample Average Approximation*). Un système basé sur l'état de l'infrastructure de transport est développé par [Minciardi et al. 2007] afin de planifier l'affectation des ressources aux nœuds du réseau. Le système considère diverses caractéristiques du réseau comme la vulnérabilité, l'intégrité physique et l'état de fonctionnement. Le système procure un estimé du temps de déploiement et la stratégie de déploiement des ressources considérant l'état du réseau. [Sheu, 2007b, 2010] propose un système complet pour planifier la distribution de l'aide. Le système inclut la prévision de la demande des régions touchées, le regroupement géographique des zones touchées en fonction de la gravité estimée des dommages, la détermination des priorités et la distribution de l'aide aux zones touchées.

En résumé, on constate que relativement peu d'études ont abordé le problème de la gestion logistique dans les situations d'urgence. Il y a donc un intérêt pour développer des méthodes qui reproduisent le comportement décisionnel séquentiel des gestionnaires et qui apportent un support d'aide à la décision pour ce problème multicritère.

3 PROBLEMATIQUE DE LOCALISATION

En situation de crise, l'objectif principal est de faire parvenir l'aide nécessaire à la zone sinistrée en des temps relativement courts. Dans cet article, nous nous intéresserons aux décisions de localisation qui doivent être prises rapidement dans les premières heures qui suivent le sinistre. Nous supposons que la demande initiale de chaque zone sinistrée « z » pour différents produits, que nous appelons fonctions humanitaires « f », est connue. Le but est de proposer un certain nombre d'alternatives aux différents intervenants quant au nombre, à l'emplacement et à la dotation des CDAH (notés l). Dans ce travail, nous proposons une approche flexible qui reproduit le processus décisionnel des gestionnaires de crises. L'objectif est de fournir aux intervenants un système d'aide à la décision pour faire face à des situations d'urgence et qui les aideront à optimiser leurs décisions.

Les différents CDAH potentiels sont caractérisés par leurs facilités d'accès. L'accessibilité d'un site se traduit en fonction du temps nécessaire pour accéder aux différentes zones sinistrées. Afin d'assurer une couverture adéquate du territoire, chaque zone doit pouvoir être accessible à partir d'un CDAH à l'intérieur d'un temps limite appelé temps de couverture T_c . Une zone z est dite couverte par le centre l si son temps d'accès est inférieur ou égal à T_c . Un CDAH l est caractérisé

par son habilité « h_{lf} » à fournir une fonction humanitaire f . Finalement, l'importance de desservir une zone z est représentée par le degré de sévérité de ses dommages noté « θ_z ». La notation suivante sera utilisée :

- F : Ensemble de fonctions humanitaires
- Z : Ensemble des zones sinistrées (bénéficiaires)
- L : Ensemble des sites potentiels pouvant servir comme CDAH
- d_{zf} : Demande de la zone z pour la fonction humanitaire f
- s_{lf} : Capacité du CDAH l pour la fonction humanitaire f
- s_l : Capacité globale du CDAH l pour l'ensemble des fonctions
- h_{lf} : Habilité du site l à fournir la fonction humanitaire f . Plus h_{lf} est élevé plus le site est habile pour fournir la fonction humanitaire f
- θ_z : Degré de sévérité des dommages de la zone z . Plus θ_z est grand plus les dommages sont sévères.
- w_f : Coefficient de pondération pour classer les fonctions humanitaires par ordre de priorité. Plus w_f est grand, plus la fonction est prioritaire.
- L_z : Ensemble des sites potentiels qui peuvent desservir la zone z en un temps inférieur ou égal à T_c .
- \hat{L} : Ensemble des sites sélectionnés.

L'objectif visé par le modèle est la minimisation du nombre de CDAH à ouvrir et la maximisation de la satisfaction des besoins des sinistrés.

4 MODELISATION

L'approche de modélisation proposée décompose le problème global en trois sous-problèmes ou étapes décisionnelles. La première étape permet de déterminer le nombre minimum de CDAH nécessaire. La deuxième étape détermine l'emplacement de ces CDAH. Finalement, la troisième étape détermine les ressources à affecter à chaque CDAH (la dotation).

4.1 Décomposition mathématique

Cette section présente les modèles mathématiques des trois étapes décrites précédemment. Les variables de décision utilisées par ces modèles sont les suivantes :

$$x_l = \begin{cases} 1, & \text{si le centre } l \text{ est ouvert comme CDAH} \\ 0, & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$y_{zf} = \begin{cases} 1, & \text{si la fonction } f \text{ demandée par la zone } z \\ & \text{est satisfaite} \\ 0, & \text{Sinon} \end{cases}$$

$$O_{lf} = \begin{cases} 1, & \text{si la fonction } f \text{ est offerte par le centre } l \\ 0, & \text{Sinon} \end{cases}$$

u_{zf} est le pourcentage de sous-couverture de la fonction f dans la zone z .

v_{lz} est le pourcentage de la fonction f demandée par la zone z qui est desservie à partir du centre l .

a- Nombre minimum de CDAH nécessaire : Modèle 1

Le but de ce modèle est de déterminer le nombre minimum de CDAH qui permet de couvrir toutes les zones sinistrées tout en respectant le temps de couverture maximum défini. Le modèle est le suivant :

$$\text{Min } p = \sum_{l \in L} x_l \quad (1)$$

Sujet à

$$\sum_{l \in L_z} x_l \geq 1 \quad \forall z \in Z \quad (2)$$

$$x_l \in \{0,1\} \quad \forall l \in L \quad (3)$$

La fonction objectif (1) minimise le nombre de sites à ouvrir. La contrainte (2) assure que chaque zone sinistrée z est couverte par au moins un des sites de l'ensemble L_z dans la limite du temps de couverture. La contrainte (3) restreint la valeur des variables de localisation à être binaire.

b- Choix des CDAH à ouvrir : Modèle 2

À cette étape on connaît le nombre p de CDAH qu'il faut ouvrir. Le but de ce second modèle est de localiser ces p CDAH de façon à maximiser la couverture de la demande.

Nous avons vu que la demande, en cas de sinistre, concerne plusieurs fonctions humanitaires. Évidemment, ces fonctions ne présentent pas toutes le même degré de priorité. De plus, une zone sinistrée peut être priorisée en fonction du degré de sévérités de ses dommages. Le modèle du choix de l'emplacement des CDAH tient compte de ces caractéristiques. Le modèle mathématique pour choisir les CDAH à ouvrir est le suivant :

$$\text{Max } \sum_{z \in Z} \sum_{f \in F} \theta_z w_f \frac{d_{zf}}{\sum_z d_{zf}} y_{zf} + \sum_{l \in L} \sum_{f \in F} w_f h_{lf} O_{lf} \quad (4)$$

Sujet à

$$y_{zf} \leq \sum_{l \in L} O_{lf} \quad \forall z \in Z, f \in F \quad (5)$$

$$O_{lf} \leq x_l \quad \forall l \in L, f \in F \quad (6)$$

$$\sum_{l \in L} x_l = p \quad (7)$$

$$x_l, y_{zf}, O_{lf} \in \{0,1\} \quad \forall l \in L, f \in F, z \in Z \quad (8)$$

La fonction objectif (4) maximise une somme pondérée de deux éléments. Le premier terme cherche à maximiser le poids associé à la satisfaction des fonctions humanitaires. Ce poids est fonction de la demande normalisée d'une fonction humanitaire par zone (d_{zf}), de l'ordre de priorité de cette fonction ($w_f \in [0,1]$) et du niveau de sévérité des dommages de la zone ($\theta_z \in [0,1]$). Le second terme cherche à maximiser l'habilité des sites sélectionnés pour offrir une fonction humanitaire (O_{lf}). Il s'agit d'une fonction des sites sélectionnés (O_{lf}), de l'habilité de chaque site à offrir une fonction (h_{lf}) et de la priorité de la fonction humanitaire (w_f). La contrainte (5) assure que la demande d'une zone pour une fonction humanitaire donnée n'est considérée couverte ($y_{zf}=1$) que si un site à l'intérieur de la zone de couverture requise (L_z) est ouvert et que ce site offre la fonction humanitaire en question ($O_{lf}=1$). La contrainte (6) lie les variables O_{lf} aux variables x_l assurant ainsi qu'un site ne puisse offrir une fonction humanitaire donnée que s'il est ouvert. La contrainte (7) limite le nombre de sites ouverts à p (valeur déterminée par le modèle 1). Finalement, la contrainte (8) fixe les variables comme étant binaires.

c- Dotation des CDAH : Modèle 3

À cette étape, nous connaissons l'ensemble des centres qui sont ouverts, \hat{L} , et l'ensemble des fonctions humanitaires offertes par chaque CDAH l , O_{lf} . Le problème de dotation se ramène à trouver une solution réalisable affectant les zones aux différents CDAH de façon à minimiser la sous-couverture des

fonctions. Une fois cette affectation connue, on peut facilement déduire les quantités nécessaires de fonctions humanitaires à affecter à chaque CDAH ouvert.

Une solution réalisable idéale affecterait chaque zone à un CDAH à l'intérieur de son temps de couverture tout en satisfaisant la demande de toutes les zones pour toutes les fonctions humanitaires. Cependant la solution du Modèle 2 ne garantit pas que toute la demande soit satisfaite dans les limites de temps requises pour toutes les zones sinistrées et pour toutes les fonctions humanitaires. De plus, cette solution ne tient pas encore compte de la capacité des CDAH. Ainsi, le troisième modèle cherche à minimiser la sous-couverture des fonctions humanitaires. Ce modèle qui est le suivant.

$$\text{Min } \sum_{z \in Z} \sum_{f \in F} \theta_z w_f \frac{d_{zf}}{\sum_z d_{zf}} u_{zf} \quad (9)$$

Sujet à

$$\sum_{l \in \hat{L} \cup L_z} v_{lzf} + u_{zf} = 1 \quad z \in Z, f \in F \quad (10)$$

$$\sum_{z: l \in L_z} d_{zf} v_{lzf} \leq s_{lf} \quad \forall l \in \hat{L}, f \in F \quad (11)$$

$$\sum_{z: l \in L_z} \sum_{f \in F} d_{zf} v_{lzf} \leq s_l \quad \forall l \in \hat{L} \quad (12)$$

$$v_{lzf} \geq 0 \quad \forall l \in \hat{L}, z \in Z, f \in F \quad (13)$$

$$u_{zf} \geq 0 \quad \forall z \in Z, f \in F \quad (14)$$

La fonction objectif (9) cherche à minimiser la sous-couverture de la demande des fonctions humanitaires, cette dernière étant pondérée par le degré de sévérité de la zone et par l'importance de la fonction. La contrainte (10) détermine pour chaque zone et chaque fonction, la proportion de la demande satisfaite (v_{lzf}) et non satisfaite (u_{zf}). Les contraintes (11) et (12) assurent que pour chaque site sélectionné et chaque fonction offerte à ce site, la proportion de la demande satisfaite permet de respecter la capacité du site pour chaque fonction humanitaire (11) et la capacité globale du site tout type de fonctions confondues (12).

4.2 Indicateurs de performance

Pour bien évaluer la performance d'un déploiement, nous avons défini deux indicateurs reliés à la demande des zones et à l'habilité des sites.

a- Indicateur par rapport à la demande des zones

Pour évaluer la performance d'une solution à satisfaire la demande des zones, nous utilisons le pourcentage moyen de sous-couverture. Nous présentons ci-dessous le calcul de l'indicateur global pour toutes les fonctions humanitaires. Cet indicateur peut facilement être calculé par fonction également.

- **Indicateur Global**: Pourcentage moyen pondéré de la demande non-couverte pour toutes les zones et toutes les fonctions confondues :

$$I^u = \frac{\sum_{z \in Z} \sum_{f \in F} \theta_z w_f u_{zf}}{\sum_{z \in Z} \sum_{f \in F} w_f} \quad (15)$$

b- Indicateur par rapport à l'habilité des sites

Ici nous cherchons à voir à quel point chaque fonction est desservie par le CDAH qui est le plus efficace pour celle-ci.

- **Indicateur d'écart d'habilité** : Pour chaque fonction humanitaire on trie l'habilité de tous les sites possibles en ordre décroissant:

$$(h_f^{\max(i)})_{i \in L}$$

Ainsi, $h_f^{\max(1)}$ est l'habilité maximale qu'on peut avoir pour la fonction f et $h_f^{\max(2)}$ est la deuxième meilleure habilité.

Pour chaque fonction, on calcule l'écart d'habilité de la solution par rapport à la meilleure habilité qui aurait pu être atteinte avec les p sites ouverts. L'écart pour une fonction f est donné par :

$$E_f = \frac{(\sum_{i=1}^p h_f^{\max(i)} - \sum_{l \in \hat{L}} h_{lf})}{\sum_{i=1}^p h_f^{\max(i)}} \quad (16)$$

Où : $\sum_{i=1}^p h_f^{\max(i)}$ est la somme des p meilleures habilités sur l'ensemble des sites potentiels L et $\sum_{l \in \hat{L}} h_{lf}$ est la somme des habilités des p sites ouverts.

De là il est possible de calculer un indicateur de performance d'habilité pondéré moyen pour toutes les fonctions :

$$I^h = \frac{\sum_f w_f E_f}{\sum_f w_f} \quad (17)$$

Plus la valeur de cet indicateur est basse, plus les sites sélectionnés s'approchent des sites idéaux.

4.3 Résolution itérative

L'approche présentée peut être exécutée de façon itérative jusqu'à l'atteinte d'un niveau satisfaisant sur les indicateurs de performance. Dans le cas où le décideur fixe un objectif de sous-couverture et que le nombre de sites ouverts avec le Modèle 1 ne satisfait pas cette sous-couverture, on incrémente le nombre de sites ouverts et on applique à nouveau les modèles 2 et 3 pour se rapprocher de la sous-couverture fixée. Toutes les solutions peuvent être enregistrées pour être analysées par le module d'analyse multicritère.

5 EXPERIENCE NUMERIQUE

Dans cette section nous étudions la performance du modèle ainsi que de l'approche itérative.

a- Performance de l'approche de 3 modèles

Cette section analyse la qualité des solutions produites par le modèle de décomposition en trois étapes en termes de temps de calcul et par rapport aux indicateurs définis. Cette première analyse vise à évaluer les solutions trouvées par l'algorithme sans aucune interaction avec l'utilisateur afin de savoir si les modèles sont assez rapides pour permettre une mise en œuvre dans une plate-forme d'aide à la décision interactive. Pour ce faire, nous avons généré des problèmes de différentes tailles. Nous avons fait varier les paramètres d'un problème comme suit :

- nombre de zones : $|Z| = 80$ et 200 ,
- nombre de sites potentiels : $|L| = |Z|$ et $2|Z|$,
- nombre de fonctions humanitaires : $|F| = 4, 6$ et 10 ,
- pour les problèmes à 80 zones, les coordonnées des sites et des zones sont générées dans un plan $[500, 500]$ et les temps de couvertures T_c sont fixés à 250 et 166 .
- pour les problèmes à 200 zones, les coordonnées des sites et des zones sont générées dans un plan

[1000,1000] et les temps de couvertures T_c sont fixés à 500 et 333.

Le Tableau 1 présente les combinaisons qui ont été testées. Le tableau présente le temps de calcul moyen en secondes (*Temps*), le nombre moyen de CDAH ouverts (I^n) et le pourcentage moyen de sous-couverture de la demande (I^n) définie dans la section 4.2. Chaque ligne dans le Tableau 1 correspond à une moyenne sur 60 problèmes différents.

Le Tableau 1 démontre que les temps de calcul sont très courts, allant d'une fraction de seconde à 6 secondes pour les plus grands problèmes avec 200 zones, 400 sites potentiels et 10 fonctions humanitaires.

Tableau 1 : Résultats des 3 modèles de Localisation

Z	L	F	Tc=250			Tc=166		
			Temps	In	Iu	Temps	In	Iu
80	80	4	0.36	3	27.15	0.32	4.33	19.38
		6	0.37	3	27.78	0.31	4.17	21.58
		10	0.4	3	29.32	0.41	4.17	21.08
	160	4	0.71	3	28.38	0.57	4.67	19.65
		6	0.76	3	28.85	0.62	4.17	21.27
		10	0.92	3	31.35	0.7	4	23.27
Z	L	F	Tc=500			Tc=333		
			Temps	In	Iu	Temps	In	Iu
200	200	4	2.42	3	23.05	1.99	4.67	15.93
		6	2.57	3	24.88	2.04	4.67	17.68
		10	3.02	3	26.78	2.34	4.83	19.67
	400	4	4.85	3	22.82	4	4.17	17.1
		6	5.03	3	23.53	3.94	4	18.13
		10	5.77	3	25.53	4.54	4	20.52

Il ressort également que les temps de résolution sont légèrement plus longs lorsque les temps de couvertures sont plus élevés. Cette situation est normale car il y a alors plus de solutions potentielles. De plus, comme prévu, plus le temps de couverture est faible, plus le nombre de CDAH ouverts augmente. En résumé, les résultats rapportés confirment que l'approche de résolution proposée peut être mise en œuvre dans un système d'aide à la décision en temps réel avec un utilisateur.

b- Performance de la boucle d'itération

Dans cette section nous étudions le cas où le décideur fixe une limite supérieure liée à la sous-couverture totale de la demande, Max^u . Dans cette situation, les modèles présentés sont appliqués une première fois sans contrainte et les indicateurs de performance évalués. Si le niveau de sous-couverture dépasse l'objectif du décideur, $I^u > Max^u$, le nombre de CDAH ouverts est augmenté de un ($p = p + 1$) et les

modèles 2 et 3 sont résolus de nouveau. Ces étapes sont répétées jusqu'à ce que la sous-couverture respecte les objectifs du décideur, $I^u \leq Max^u$. Cette approche de résolution itérative permet d'aider les gestionnaires dans la prise de décision. Le Tableau 2, montre les résultats avec différentes valeurs de sous-couverture maximum, Max^u . Nous avons fixé arbitrairement cinq valeurs pour Max^u : 0% (ce qui signifie que toutes les fonctions humanitaires de toutes les zones doivent être totalement satisfaites), 5%, 10%, 20% et 100% (ce qui revient à n'imposer aucune condition de satisfaction ; on laisse donc l'approche résoudre le problème sans itération). Le Tableau 2 présente le temps de calcul (*Temps*) et le nombre moyen de CDAH ouverts (I^n). Chaque ligne dans le tableau correspond à la moyenne sur 60 répétitions.

Les résultats du Tableau 2 montrent qu'à chaque fois que Max^u diminue, le temps de calcul augmente. Cependant ce temps demeure assez faible avec un maximum de 22 secondes. Ces résultats montrent aussi qu'à chaque fois que la limite Max^u est abaissée, comme prévu le nombre de CDAH ouverts augmente. Notons que si une sous-couverture maximale de 5% demande un nombre de CDAH raisonnable, l'atteinte d'une sous-couverture de 0% demande de doubler et même de tripler le nombre de CDAH.

Afin de mieux orienter le gestionnaire, le Tableau 3 détaille les indicateurs de performances définis à la section 4.2. Pour illustrer ces indicateurs, nous avons générés 10 nouveaux problèmes avec 80 zones, 160 sites potentiels, 4 fonctions humanitaires et un temps de couverture de $T_c = 166$. Le Tableau 3 présente le nombre de CDAH ouverts (I^n), le pourcentage de sous-couverture (I^u) ainsi que le niveau d'habilité des sites ouverts, I^h .

Les résultats du Tableau 3 montrent que les résultats varient grandement en fonction des problèmes. De plus, l'augmentation du nombre de CDAH offre parfois des diminutions rapides du pourcentage de sous-couverture. Ainsi, pour l'exemple 6, l'ouverture de 4, 5 et 7 CDAH permet de faire passer la sous-couverture de 16,60 % à 7,4 % et finalement à 0 %. Cependant, pour cet exemple, le passage de 4 à 7 CDAH produit une augmentation relative de l'indicateur d'écart d'habilité des sites ouverts, dans cet exemple, l'écart d'habilité passe de 11,2 % à 17,2 %. On peut donc conclure que bien que la demande soit mieux satisfaite en termes de quantité, les sites ouverts sont de moins en moins efficaces. Ces aspects contradictoires des différents critères justifient l'utilisation d'un module d'analyse multicritère, module présenté à la section suivante.

Tableau 2 : Résultats de la boucle d'itération

Z , Tc	L	F	Maxu=100%		Maxu=20%		Maxu=10%		Maxu=5%		Maxu=0%	
			Temps	In	Temps	In	Temps	In	Temps	In	Temps	In
80;166	80	4	0,32	4,33	0,26	4,93	0,41	6,17	0,47	7,83	0,99	17,73
		6	0,31	4,17	0,35	5,23	0,49	6,53	0,56	7,97	1,44	19,63
		10	0,41	4,17	0,44	5,43	0,69	6,93	0,82	8,6	2,4	21,47
	160	4	0,57	4,67	0,72	4,7	0,8	5,68	0,82	6,93	1,48	15,63
		6	0,62	4,17	0,8	4,73	0,96	5,93	0,95	7,1	1,59	13,23
		10	0,7	4	0,96	4,97	1,28	6,28	1,3	7,5	3,48	19,62
200;333	200	4	1,99	4,67	1,97	4,83	2,17	5,72	2,19	6,92	3,99	17,53
		6	2,04	4,67	2,16	5,03	2,49	6,05	2,46	7,25	5,13	17,05
		10	2,34	4,83	2,44	5,28	3,14	6,47	3,4	7,65	10,61	22,7
	400	4	4	4,17	3,58	4,67	3,96	5,53	3,89	6,4	6,5	14,72
		6	3,94	4	4,46	4,67	4,68	5,75	4,58	6,75	9,2	16,4
		10	4,54	4	5,28	4,88	5,98	6,12	6,59	7,37	16,51	19,38

Tableau 3 : Résultats des indicateurs de performance avec la boucle d'itération

Inst.	Maxu = 100%			Maxu = 10%			Maxu = 5%			Maxu = 0%		
	In	lu	lh	In	lu	lh	In	lu	lh	In	lu	lh
1	4	10,10	18,20	5	6,20	17,10	6	5,00	17,10	43	0,00	19,50
2	4	7,50	11,60	4	7,50	11,60	5	5,00	10,10	11	0,00	13,10
3	4	11,40	14,10	5	10,00	14,10	8	2,50	16,70	10	0,00	17,30
4	4	15,60	20,70	5	9,10	23,20	6	4,70	23,20	11	0,00	22,60
5	4	5,20	14,60	4	5,20	14,60	5	2,70	13,90	9	0,00	15,10
6	4	11,20	16,60	5	7,40	17,10	7	0,00	17,20	7	0,00	17,20
7	4	8,20	19,50	4	8,20	19,50	7	0,00	18,70	7	0,00	18,70
8	4	16,00	20,80	5	4,60	18,80	5	4,60	18,80	9	0,00	16,50
9	4	6,80	22,00	4	6,80	22,00	6	3,80	18,30	56	0,00	18,50
10	4	15,40	22,60	5	8,90	20,70	11	2,50	20,00	20	0,00	21,30

6 SYSTEME D'AIDE A LA DECISION

Cette section présente un survol du système d'aide à la décision développé.

6.1 Structure du système

L'ensemble du système développé est programmé en VB.Net 2010 et utilise CPLEX 12.1 pour la résolution des modèles mathématiques. Le chargement des données s'effectue par le biais d'un fichier de format XML. Ce fichier renferme toutes les données du problème dont les coordonnées de latitude et longitude des centres de distribution et des zones de demande. Une fois la lecture des données effectuée, le système fait appel à l'API de Google Maps pour effectuer tous les calculs de distance nécessaires. Une interface GMAPS.NET opensource est accessible à l'intérieur de l'application pour visualiser la structure géographique du problème (Figure 1). Le système effectue alors la résolution du problème à l'aide des trois modèles présentés précédemment et affiche la solution ainsi que les indicateurs de performance.

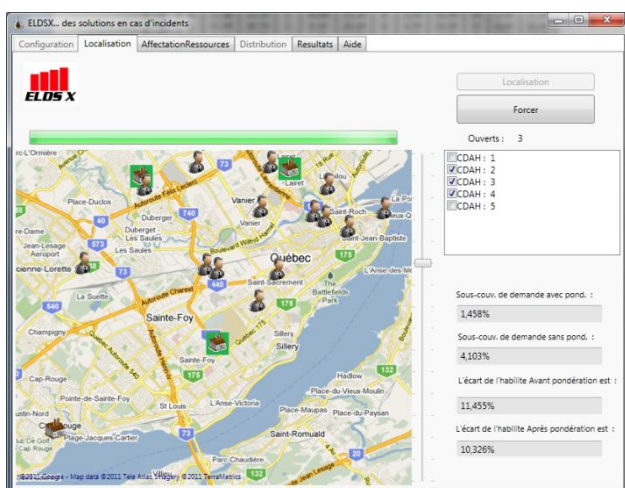


Figure 1. Fenêtre qui permet de visualiser les résultats de l'approche

6.2 Interactivité

Après avoir obtenu la solution initiale, l'utilisateur peut en modifier les principaux éléments. Dans le cas où l'utilisateur souhaite ouvrir d'autres CDAH, ou fermer ceux qui sont ouverts pour en ouvrir d'autres, il suffit de cocher ou décocher les CDAH correspondants et demander une nouvelle résolution

des modèles 2 et 3 qui incorporeront alors ces choix comme des contraintes à respecter. La nouvelle solution sera affichée et les indicateurs de performance notés. À chaque nouvelle résolution, les solutions ainsi que les indicateurs de performance sont enregistrés afin de pouvoir être affichés ultérieurement et analysés dans le module multicritère.

6.3 Aide à la décision multicritère

Le contexte décisionnel du déploiement de réseaux logistiques en situation de crise exige de prendre des décisions conflictuelles. En effet, afin d'obtenir le meilleur impact, la solution optimale consisterait simplement à ouvrir le maximum de centres de distribution. Il serait alors possible d'obtenir la sous couverture minimale et d'atteindre chaque zone le plus rapidement possible. Cependant, une telle solution peut avoir un coût extrêmement élevé, mais surtout demandera un déploiement de ressources très important. Dans plusieurs situations, le décideur peut préférer ne pas faire entrer trop de secouristes et de ressources dans la zone sinistrée puisque le réseau logistique devra également les soutenir en tout temps. Ce module d'analyse multicritère vise à analyser ces compromis.

Un problème de décision multicritère peut être défini par le processus qui vise à définir la meilleure option parmi toutes les options envisageables. Dans le cadre du problème de déploiement logistique en situation de crise, la méthode d'analyse multicritère que nous avons retenue est l'approche TOPSIS [Hwang et Yoon, 1981 ; Jahanshahloo et al, 2006]. L'acronyme TOPSIS signifie «*Technique for Order Performance by Similarity to Ideal Solution*». Cette technique est un outil qui est fait pour aider les décideurs à organiser le problème de sorte qu'il soit possible de le résoudre en obtenant un rangement ordinal des alternatives. L'approche TOPSIS est construite sur le principe de base que la meilleure alternative devrait être celle qui s'approche le plus de l'action idéale et qui s'éloigne le plus de l'action anti-idéale. L'approche TOPSIS présente plusieurs avantages. Premièrement, la représentation est logique et elle représente de façon rationnelle la pensée humaine. Deuxièmement, elle tient compte de valeurs scalaires qui tiennent compte simultanément de la meilleure et de la pire option. Finalement, la simplicité de la méthode de calcul en fait une approche facilement programmable. Ces principaux avantages font de la méthode TOPSIS un outil comparable à d'autres techniques d'analyse hiérarchique comme AHP et ELECTRE [Shih et al, 2007]. D'un autre côté, les principaux désavantages de cette approche résident dans le fait qu'elle ne

propose pas d'outils afin d'évaluer la pondération relative des différents critères entre eux en plus de ne pas offrir un outil visant à évaluer la consistance des jugements du décideur. D'autres outils d'aide à la décision comme MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*) proposent une façon d'agréger les préférences des décideurs et pourraient être intégrés au présent système [Bana e Costa et al. 2005]. Considérant la modularité du système développé, n'importe quelle autre méthode jugée appropriée pourrait y être intégrée [Zanakis et al. 1998]

Après avoir défini l'ensemble des critères qui seront analysés, le système offre une procédure qui permet de déterminer le poids relatif de chacun. Le décideur peut fixer par évaluation directe le poids qu'il accorde à chaque critère sans contrainte (la somme des poids doit cependant donner 1).

6.4 Illustration numérique

Dans cette section nous illustrons l'utilité du modèle d'aide à la décision. Nous avons utilisé un problème tiré du Tableau 2 et ayant quatre fonctions humanitaires. Dans un premier temps, nous avons laissé le modèle s'exécuter seul ce qui a produit la solution numéro 1 du Tableau 4. Le Tableau 4 détaille, pour chaque solution, le niveau de sous couverture des différentes fonctions humanitaires (F1 à F4), le nombre de centres de distribution ouverts (Nb CDAH) ainsi que l'écart d'habilité (Écart Hab.). La première solution renferme un seul centre de distribution. En changeant la localisation de ce centre, nous avons obtenu la solution 3. Les solutions 2 et 5 sont des solutions ayant respectivement 4 et 3 CDAH et ont l'avantage de satisfaire pleinement la demande des quatre fonctions. Finalement, la quatrième solution est un déploiement basé sur deux centres de distribution.

Tableau 4 : Les diverses solutions

Solutions	Sous-couverture				Nb CDAH	Écart Hab.
	F1	F2	F3	F4		
1	0,329	0,369	0,381	0,383	1	7,20
2	0,000	0,000	0,000	0,000	4	23,83
3	0,563	0,569	0,330	0,453	1	19,22
4	0,069	0,105	0,075	0,051	2	28,48
5	0,000	0,000	0,000	0,000	3	25,04

Au Tableau 5, nous présentons cinq ensembles de poids qui auraient pu être donnés par un planificateur qui évalue l'importance relative des 6 critères de ce problème. Les quatre premiers critères reflètent l'importance accordée à la minimisation de la sous couverture de la demande pour chacune des fonctions. Le cinquième critère modélise l'importance accordée à la minimisation du nombre de centres de distribution ouverts. Finalement, le dernier critère pondère l'importance de minimiser l'écart d'habilité des centres sélectionnés. L'application de la méthode de classement TOPSIS mène aux résultats du Tableau 5. L'analyse du Tableau 5 montre que chacun des cinq ensembles de poids amène à un classement différent des solutions. Si on priorise l'ensemble de poids 2 qui accorde beaucoup d'importance à la satisfaction des fonctions, on comprend que la solution 5 soit priorisée. Les ensembles de poids 1 et 3 accordent plus d'importance au nombre de centres de distribution ouverts ce qui peut être intéressant si l'étendue des dommages est telle qu'il est difficile d'intervenir dans la zone sinistrée. Dans ce cas, les solutions 1 et 4 deviennent plus intéressantes.

Tableau 5 : Pondération des critères et classement résultants

Critères	Poids1	Poids2	Poids3	Poids4	Poids5
Sous F1	10%	20%	10%	10%	17%
Sous F2	10%	20%	10%	10%	17%
Sous F3	10%	20%	10%	10%	17%
Sous F4	10%	20%	10%	10%	17%
Nb CDAH	30%	10%	50%	10%	22%
Écart H	30%	10%	10%	50%	10%
Ordre	1-4-5- 2-3	5-2-4- 1-3	1-4-3- 5-2	1-2-5- 4-3	4-5-2- 1-3

De façon plus générale, on constate que la solution 1 obtient le meilleur classement pour trois des cinq ensembles et que la solution 3 est quatre fois sur cinq la pire solution, malgré le fait qu'elle ne soit pas dominée. Finalement, le classement des solutions 2 et 4 est très variable en fonction du poids des critères.

Cet exemple permet donc d'illustrer la valeur ajoutée d'un module d'aide à la décision multicritère lorsque le décideur doit évaluer rapidement la qualité de plusieurs solutions sur divers critères. Bien que nous ayons présenté ici un exemple simplifié avec six critères, cinq ensembles de poids et cinq solutions différentes, le système développé n'impose aucune limite. Précisons également que le système identifie toutes les solutions dominées qui sont automatiquement écartées du processus d'analyse.

7 CONCLUSION

Dans ce travail nous avons développé un système d'aide à la décision pour aider les gestionnaires des crises dans la conception d'un réseau de distribution d'aide humanitaire. Les modèles proposés répondent à trois questions clés qui sont les suivantes : combien et où placer les centres de distribution d'aide humanitaire, et quelle sera la répartition des ressources entre chaque centre en fonction de leur mission. De nombreuses expériences numériques ont été réalisées pour illustrer la façon dont le prototype peut être utilisé par les spécialistes de la gestion des crises et afin d'évaluer sa performance dans le contexte de prise de décision en situation de crise. Les résultats obtenus montrent qu'il s'agit d'un outil rapide et souple qui permet de guider efficacement la prise de décision.

8 REMERCIEMENTS

Ce projet n'aurait pu être réalisé sans le support financier du programme *Projet d'envergure de partenariat de recherche en microélectronique, photonique et télécommunication* (PROMPT), du *Conseil de recherches en sciences naturelles et en Génie du Canada* (CRSNG) dans le cadre d'une subvention *Recherche et Développement Coopérative* (CG095123), ainsi que du financement de DMR Une société Fujitsu. Ce support est grandement apprécié.

9 REFERENCES

- Altay N. et Green III W. G., (2006). OR/MS research in disaster operations management. *European Journal of Operational Research*, 175, 475-493.
- Bana e Costa C. A., De Corte J. M. et Vansnick J. C., (2005). On the mathematical foundations of MACBETH. J.

- Figueira, S. Greco, M. Ehrgott, eds. *Multiple Criteria Decision Analysis : State of the art surveys*. Springer, New York, 409-442.
- Balcik B., Beamon B. M., Krejci C. C., Muramatsu K. M. et Ramirez M. (2010). Coordination in humanitarian relief chains: Practices, challenges and opportunities, *International Journal of Production Economics*, 126, 22-34.
- Chang, M., Tseng, Y. & Chen, J., (2007). A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(6), 737-754.
- Haddow G. D., Bullock J. A. & Coppola D. P. (2008). *Introduction to Emergency Management*, Butterworth-Heinemann homeland security series, Elsevier Inc.
- Hwang C. L. et Yoon K. L., (1981). *Multiple attribute decision making : Methods and applications*. Springer-Verlag, New-York.
- Jahanshahloo G.R., Hosseinzadeh Lotfi F., Izadikah M. (2006). An algorithmic method to extend TOPSIS for decision-making problems with interval, *Applied Mathematics and Computation*, 1755, 1375-1384.
- Lindell M. K., Prater C. et Perry R. W. (2007). *Emergency Management*, John Wiley & Sons.
- Minciardi R., Sacile R. et Trasforini E. (2007). A decision support system for resource intervention in real-time emergency management. *International Journal of Emergency Management*, 4, 59-71.
- Sheu J.-B. (2007a). Challenges of emergency logistics management. *Transportation Research Part E*, 43, 655-659.
- Sheu J.-B. (2007b). An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters. *Transportation Research Part E*, 43, 687-709.
- Sheu J.-B. (2010). Dynamic relief-demand management for emergency logistics operations under large-scale disasters. *Transportation Research Part E*, 46, 1-17.
- Shih H.-S., Shyur H.-J. et Lee E. S. (2007). An extension of TOPSIS for group decision making. *Mathematical and Computer Modelling*, 45, 801-813.
- Tzeng G.-H., Cheng H.-J. et Huang T. D. (2007). Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems. *Transportation Research Part E*, 43, 673-686.
- Yi W. & Özdamar L. (2007). A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities. *European Journal of Operational Research*, 179, 1177-1193.
- Zanakis S. H., Solomon A., Wishart N. et Dubliss S., (1998). Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods. *European Journal of Operational Research*, 107, 507-529.