

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

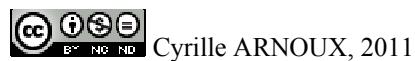
MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE EN GÉNIE

PAR  
CYRILLE ARNOUX

MISE EN PLACE DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE DANS UNE SITUATION  
D'URGENCE HUMANITAIRE

MONTRÉAL, LE 22 SEPTEMBRE 2011



Cyrille ARNOUX, 2011



Cette licence [Creative Commons](#) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Marc PAQUET, directeur de mémoire  
Génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

Amin CHaabane,  
Génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

Michel RIOUX, président du jury  
Génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 31 AOÛT 2011

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## **AVANT-PROPOS**

Ce travail m'a permis d'appréhender une discipline et un sujet qui m'étaient auparavant inconnus. Il a été motivé par la brutalité du séisme qui a secoué Haïti le 12 Janvier 2010, et par les nombreuses informations concernant les difficultés logistiques que rencontraient les secours au cours de leurs opérations. La revue de littérature m'a permis d'élargir ma connaissance de l'optimisation logistique en découvrant les principales méthodes de résolution et les principaux modèles. J'ai ensuite appliqué ces connaissances pour essayer d'apporter une solution au problème que j'avais identifié. J'espère pouvoir apporter un point de vue différent qui pourra être utile lors du développement de ce domaine. Je retire de ce travail la satisfaction d'avoir appris beaucoup sur ce sujet et d'avoir participé à la recherche dans un domaine dont l'utilité est incontestable.



## **REMERCIEMENTS**

Je remercie grandement Marc PAQUET pour son aide et ses conseils précieux, ainsi que mon père et ma mère, pour leur soutien, et Cliny pour son soutien et ses encouragements. Je tiens également à remercier mon oncle Christophe ARNOUX et mon grand-père Henri ARNOUX pour leur aide dans la rédaction de ce mémoire.



# **MISE EN PLACE DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE DANS UNE SITUATION D'URGENCE HUMANITAIRE**

Cyrille ARNOUX

## **RÉSUMÉ**

Ce mémoire propose un modèle décomposé en cinq phases ayant pour but d'améliorer la logistique humanitaire en cas de catastrophe naturelle. Le principe de ce modèle est de gérer de façon continue les différentes phases afin d'éviter les problèmes de coordination. Les phases proposées sont : (1) la localisation d'un dépôt permanent ; (2) le transport immédiat des premières denrées ; (3) la localisation d'un dépôt temporaire ; (4) la détermination des besoins et (5) la planification du transport à moyen terme. Pour vérifier certaines hypothèses du modèle sur la localisation du dépôt permanent, l'évolution dans le temps des dégâts causés par les catastrophes naturelles aux Antilles et en Amérique Centrale a été étudiée. Cette évolution est représentée par le nombre de morts, de blessés, de sans-abris, de personnes affectées et par les dommages économiques. La répartition des diverses catégories de dégâts entre les différents pays a également été étudiée. Une forte différence entre les deux régions a été remarquée, ainsi qu'une disparité entre les catégories étudiées. Pour vérifier le fonctionnement des différentes phases, des simulations en utilisant des données sur des catastrophes récentes ont été effectuées.



# **MISE EN PLACE DE LA CHAÎNE LOGISTIQUE DANS UNE SITUATION D'URGENCE HUMANITAIRE**

Cyrille ARNOUX

## **ABSTRACT**

This report proposes a model composed of five distinct phases in an effort to improve humanitarian logistics during a natural disaster. The principle of this model is to manage in a continuous manner the different phases in order to avoid coordination problems. These phases are : (1) the location of a permanent warehouse ; (2) the immediate transport of first supplies ; (3) the location of a temporary warehouse ; (4) the future needs assessment ; (5) mid-term planning for deliveries. To verify some hypotheses on the model locating the permanent warehouse, we watched the evolution of damages occasioned by natural disasters in the Caribbean and Central America, represented by the numbers for casualties, injured, homeless, affected persons as well as economic damage. We also studied the distribution of the particular categories between the different countries and observed important difference between the two regions, and a disparity in the studied categories. To verify the models, we conducted several simulations using data on recent catastrophes.



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTERATURE .....	5
1.1    Précurseurs .....	6
1.2    Développement du sujet suite au séisme d'Istanbul en 1999 .....	6
1.3    Problèmes classiques de logistique adaptés .....	8
1.4    Autres approches .....	11
1.5    Concepts utilisés .....	16
1.6    Vulnérabilité .....	18
1.7    Prévision des dégâts .....	21
1.8    Évaluation des besoins .....	23
1.9    Retour d'expérience et analyse des résultats obtenus .....	24
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE .....	27
2.1    Conception d'ensemble .....	27
2.2    Définition de la catastrophe naturelle .....	32
2.3    Problèmes liés à la notion de vulnérabilité .....	32
2.4    Vérification des hypothèses de travail .....	33
2.5    Données pour la phase 1 .....	34
2.6    Données pour la phase 2 .....	34
2.7    Données pour la phase 3 .....	35
2.8    Données pour la phase 4 .....	35
2.9    Comparaison des résultats .....	35
CHAPITRE 3 MODÈLES MATHÉMATIQUES .....	37
3.1    Phase 1 : Choix de l'emplacement du Centre de Distribution Régional .....	37
3.1.1    Modèle mathématique .....	38
3.1.2    Vulnérabilité d'une zone .....	39
3.1.3    Proposition de calcul de la vulnérabilité .....	40
3.2    Phase 2 : Transport direct depuis le Centre de Distribution Régional .....	41
3.3    Phase 3 : Choix de l'emplacement du Centre de Distribution Local .....	42
3.3.1    Modèle mathématique .....	42
3.3.2    Adaptation à la situation réelle .....	45
3.4    Phase 4 : Évaluation des besoins .....	45
3.4.1    Paramètres .....	45
3.4.2    Formulation mathématique .....	46
3.4.2.1    Consommation .....	46
3.4.2.2    Equipement .....	47
3.5    Phase 5 : Approvisionnement entre le Centre de Distribution Régional et le Centre de Distribution Local .....	48

3.5.1	Modèle mathématique.....	48
<b>CHAPITRE 4 VÉRIFICATION DES HYPOTHÈSES .....</b>		<b>53</b>
4.1.1	Évolution dans le temps .....	54
4.1.1.1	Antilles .....	54
4.1.1.2	Amérique Centrale .....	55
4.1.2	Répartition géographique.....	56
4.1.2.1	Antilles .....	56
4.1.2.2	Amérique Centrale .....	58
<b>CHAPITRE 5 ESSAIS ET RÉSULTATS .....</b>		<b>61</b>
5.1.1	Phase 1 : Localisation du centre de gravité des besoins .....	61
5.2	Phase 2 : Transport direct depuis le CDR.....	69
5.3	Phase 3 : Localisation du Centre de Distribution Local .....	70
5.3.1	Haïti – Tremblement de terre du 12 Janvier 2010 .....	70
5.3.2	Pakistan - Inondations de Juillet 2010 .....	70
5.4	Phase 4 : Évaluation des besoins .....	72
5.4.1	Eau potable.....	73
5.4.2	Nourriture.....	74
5.4.3	Soins basiques .....	74
5.4.4	Abris.....	75
5.4.5	Installations sanitaires.....	75
5.4.6	Soins traumatologiques .....	76
5.5	Phase 5 : Approvisionnements entre le CDR et le CDL .....	77
<b>CONCLUSION .....</b>		<b>79</b>
<b>ANNEXE I PROGRAMME LINGO DE LA PHASE 1 .....</b>		<b>83</b>
<b>ANNEXE II PROGRAMME LINGO DE LA PHASE 3 .....</b>		<b>85</b>
<b>ANNEXE III PROGRAMME LINGO DE LA PHASE 5.....</b>		<b>87</b>
<b>ANNEXE IV ÉVOLUTION DES DÉGÂTS AUX ANTILLES.....</b>		<b>89</b>
<b>ANNEXE V ÉVOLUTION DES DÉGÂTS EN AMÉRIQUE CENTRALE .....</b>		<b>92</b>
<b>ANNEXE VI RÉPARTITION DES DÉGÂTS AUX ANTILLES.....</b>		<b>95</b>
<b>ANNEXE VII RÉPARTITION DES DÉGÂTS EN AMÉRIQUE CENTRALE.....</b>		<b>101</b>
<b>ANNEXE VIII APPLICATION DU PROGRAMME LINGO DE LA PHASE 3 AUX INONDATIONS DU PAKISTAN EN 2010.....</b>		<b>107</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>		<b>113</b>

**LISTE DES TABLEAUX**

	Page
Tableau 5-1 : Moyenne annuelle des dégâts en Amérique Centrale.....	61
Tableau 5-2 : Moyenne annuelle des dégâts aux Antilles.....	62
Tableau 5-3 : Ratio Poids/Débit des unités de purification d'eau .....	73
Tableau 5-4 : Poids et capacité des différents modèles de tente.....	75
Tableau 5-5 : Besoins de chaque catégorie de personnes affectées pour la phase 1 .....	76
Tableau 5-6 : Besoins de chaque catégorie de personnes affectées pour la phase 3 .....	77



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure I-1 : Étapes du traitement de l'urgence .....	2
Figure 1-1: Groupage des zones de Chang, <i>et al.</i> (2007).....	12
Figure 1-2 : Logigramme de Sheu (2007).....	16
Figure 2-1 : Les différentes phases du modèle proposé.....	27
Figure 2-2 : Illustration de la phase 1 .....	28
Figure 2-3 : Illustration de la phase 2 .....	29
Figure 2-4 : Illustration de la phase 3 .....	29
Figure 2-5 : Illustration de la phase 4 .....	30
Figure 2-6 : Illustration de la phase 5 .....	30
Figure 2-7 : Enchaînement des phases et des données .....	31
Figure 4-1 : Évolution du nombre de morts et de blessés aux Antilles .....	54
Figure 4-2 : Évolution du nombre de morts et de blessés en Amériques Centrale.....	55
Figure 4-3 : Proportion de chaque pays dans la population totale des Antilles.....	56
Figure 4-4 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des morts.....	57
Figure 4-5 : Proportion de chaque pays dans la population totale de l'Amérique Centrale....	58
Figure 4-6 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des morts.....	59
Figure 5-1 : Situation générale des centres de gravité des différentes catégories de dommages aux Antilles .....	63
Figure 5-2 : Détail des centres de gravité des différentes catégories de dommages.....	64
Figure 5-3 : Situation générale des centres de gravité des différentes catégories de dommages en Amérique Centrale .....	65
Figure 5-4 : Détail des centres de gravité des différentes catégories de dommages.....	66

Figure 5-5 : Centre de gravité des besoins logistiques aux Antilles .....	67
Figure 5-6 : Centre de gravité des besoins logistiques en Amérique Centrale .....	68
Figure 5-7 : Centre de Distribution Local situé à Charsadda.....	71
Figure 5-8 : Évolution du nombre de morts et de blessés aux Antilles .....	89
Figure 5-9 : Évolution du nombre de sans-abris aux Antilles .....	90
Figure 5-10 : Évolution du nombre de personnes affectées aux Antilles .....	90
Figure 5-11 : Évolution des dommages économiques aux Antilles.....	91
Figure 5-12 : Évolution du nombre de morts et de blessés en Amériques Centrale .....	92
Figure 5-13 : Évolution du nombre de sans abris en Amérique Centrale .....	93
Figure 5-14 : Évolution du nombre de personnes affectées en Amérique Centrale .....	93
Figure 5-15 : Évolution des dommages économiques en Amérique Centrale .....	94
Figure 5-16 : Proportion de chaque pays dans la population totale des Antilles.....	95
Figure 5-17 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des morts.....	96
Figure 5-18 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des blessés .....	97
Figure 5-19 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des sans-abris.....	98
Figure 5-20 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des personnes affectées.....	99
Figure 5-21 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des dommages économiques	100
Figure 5-22 : Proportion de chaque pays dans la population totale de l'Amérique Centrale.	101
Figure 5-23 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des morts.....	102
Figure 5-24 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des blessés .....	103
Figure 5-25 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des sans-abris.....	104
Figure 5-26 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des personnes affectées.....	105
Figure 5-27 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des dommages économiques	106

Figure 5-28 : Centre de Distribution Local situé à Charsadda.....	107
Figure 5-29 : Emplacements des deux CDL .....	108
Figure 5-30 : Emplacement des trois CDL .....	109
Figure 5-31 : Répartition des CDL pour une distance maximale de 300 km .....	110
Figure 5-32 : Répartition des CDL pour une distance maximale de 200 km .....	111
Figure 5-33 : Répartition des CDL pour une distance maximale de 100 km .....	112



## **INTRODUCTION**

Lors d'une catastrophe, naturelle ou industrielle, il est courant d'évoquer la malchance ou l'imprévisibilité. Néanmoins, il est nécessaire de constater qu'un ouragan dans les Caraïbes ou un tremblement de terre au Japon sont des phénomènes fréquents. On peut donc penser qu'il est possible de s'y préparer et de développer des chemins d'approvisionnement à l'avance en supprimant l'aspect fataliste habituellement constaté.

Ce travail propose une nouvelle façon de gérer l'aide humanitaire d'urgence, en introduisant la planification sur le long terme et en calquant les phases de la réaction sur les phases de développement d'une catastrophe. Nous savons qu'un évènement ne devient une catastrophe que parce qu'il s'est produit lors d'un certain nombre de circonstances aggravantes, qui créent une vulnérabilité. Nous pensons qu'un pré-positionnement des stocks de matériels d'urgence près des zones vulnérables pourrait permettre une réaction plus rapide et un fonctionnement logistique plus efficace. De même, une décision unique concernant l'emplacement du centre de distribution local, après la catastrophe, permettrait une centralisation des informations et un regroupement des moyens, simplifiant là encore la chaîne d'approvisionnement. On pourrait ainsi agréger la demande venant de toute la zone touchée, puis planifier les livraisons de manière plus méthodique.

Il est toutefois nécessaire de vérifier l'applicabilité d'un tel système en réalité. Nous chercherons donc à confronter les équations du modèle aux données réelles autant que possible, et à les modifier si besoin est.

## **PROBLEMATIQUE**

Les différentes étapes du déroulement d'une catastrophe sont représentées ci-dessous (Figure 1) :

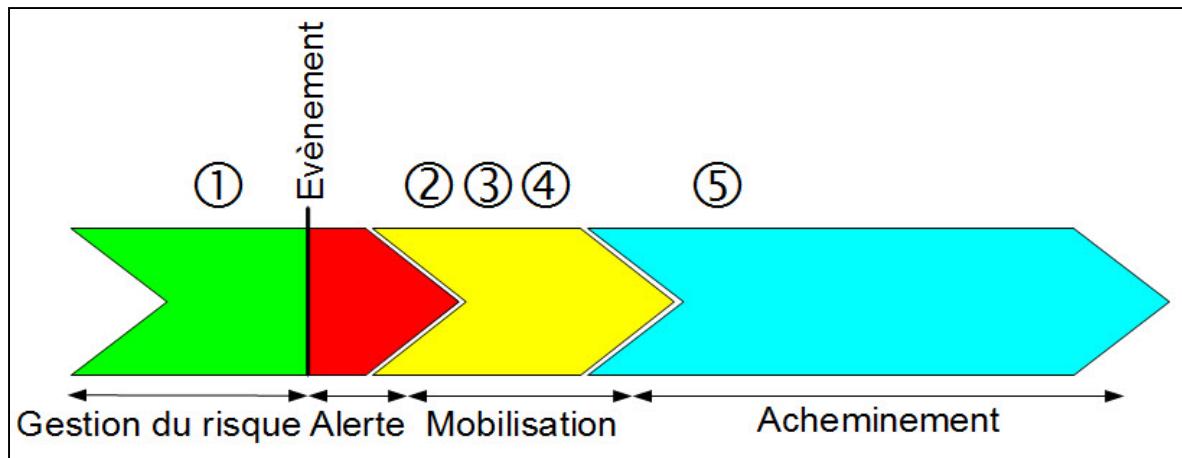


Figure I-1 : Étapes du traitement de l'urgence

L'étape de la gestion du risque, antérieure à la catastrophe, est le temps de la préparation à la catastrophe, où il est opportun de mettre en place des mesures de prévention, d'atténuation ou de préparation. Lorsque l'événement survient, l'étape d'alerte survient en premier, où les premières nouvelles de la catastrophe atteignent les responsables des organisations de secours. Ces organisations planifient alors leurs interventions. C'est l'étape de mobilisation des moyens. Enfin, les moyens de secours sont mis en œuvre et transportés sur place lors de l'étape d'acheminement.

Les trois (3) dernières étapes ne comprennent pas nécessairement de séparation claire dans le temps et peuvent se chevaucher. Toutes les organisations ne sont pas alertées en même temps, et peuvent commencer à se mobiliser avant d'avoir une information complète. Certaines informations peuvent arriver plus tard, surtout en cas de complication de la situation (glissement de terrain dû à un ouragan, incendies, *etc.*). La mobilisation peut également continuer tandis que les premiers secours sont en cours d'acheminement.

## OBJECTIFS

Nous cherchons à définir un modèle pouvant être utilisé pour mettre en place les bases d'un réseau logistique d'urgence, puis pour être en mesure de l'installer et de l'utiliser lorsqu'une

catastrophe survient. Nous nous occuperons du transport des ressources et non pas du transferts des personnes blessées, qui n'obéit pas à la même logique.

Le modèle développé ici est décomposé en cinq (5) phases, correspondant à la conception du problème à traiter.

La phase 1 consiste à préparer un réseau d'urgence, qui pourra être utilisé par la suite, et intervient avant l'arrivée d'une catastrophe. Les phases 2, 3 et 4 servent à mettre en place rapidement le réseau logistique d'urgence, immédiatement après la catastrophe, tandis que la phase 5 doit assurer la continuité et la régularité des approvisionnements tout au long de la phase d'acheminement.

Le principal intérêt du modèle est d'articuler entre elles les différentes phases de l'installation, assurant une compréhension de la situation à quelque moment que ce soit, de façon à minimiser l'improvisation.

Pour écrire chaque phase du modèle, nous avons tâché de résumer cette phase en un problème simple, de façon à garder des programmes de petite taille, facile à appréhender et à manipuler. On vérifie ensuite le bon fonctionnement du modèle en le programmant sous un progiciel d'optimisation tel que LINGO et en le faisant fonctionner avec des données simples.

## HYPOTHÈSES

Avant de commencer le calcul des emplacements, nous avons voulu nous assurer que les catastrophes se répartissaient effectivement de manière aléatoire dans les régions concernées. Nous avons donc recherché dans les données toute tendance forte pouvant permettre de prédire l'évolution de la position du dépôt, par exemple, un pays prenant une importance de plus en plus grande dans le décompte des victimes. On a donc observé la répartition géographique des catastrophes et son évolution dans le temps.

Dans ce rapport, nous évoquerons d'abord les articles ayant contribué à la recherche dans ce domaine dans la revue de littérature, en décrivant leur principales contributions et leur intérêt pour ce travail. Puis nous exposerons notre modèle dans la partie 2, en explicitant son fonctionnement et sa formulation mathématique. Dans la partie 3, nous vérifierons certaines hypothèses formulées dans cette étude, de façon à justifier les choix effectués. Nous testerons le modèle dans la partie 4 dans quelques scénarios choisis. Dans la conclusion, nous reviendrons sur les résultats trouvés, et proposerons des pistes d'améliorations pour ce modèle, ainsi que les récents développements de ce domaine d'étude

## **CHAPITRE 1**

### **REVUE DE LITTERATURE**

La gestion de l'urgence est un objet d'étude qui prend de l'importance du fait du phénomène de mondialisation, qui conduit les organismes et gouvernements à réagir à des évènements plus éloignés de leur bases, ce qui entraîne plus d'intervention, mais aussi plus d'intervenants lors de chaque intervention. Denis (2002) explique les mécanismes de réponse aux catastrophes et ce qu'elle désigne par le terme de méga-organisation de l'urgence, qui est l'ensemble des organisations et individus intervenant dans la gestion d'une catastrophe. L'auteure explique les différentes causes d'une catastrophe, comme les facteurs prodromiques ainsi que les évènements déclencheurs immédiats. Elle décrit aussi le déroulement usuel d'une catastrophe et de son traitement, en différentes phases : la phase prodromique, qui est antérieure à l'évènement, comprend toutes les décisions et mesures qui ont conduit à la catastrophe (ex : réduction du budget de maintenance d'une digue) ; la phase de réponse, qui survient immédiatement après l'évènement, comprenant l'alerte, la mobilisation et l'acheminement des secours et qui est la plus médiatisée ; la phase de rétablissement, ou retour à la normale, où l'on reconstruit les biens endommagés de façon à retrouver le niveau de vie antérieur à la catastrophe ; la phase de l'après-catastrophe, où les derniers points litigieux sont réglés, comme le partage des responsabilités et les plaintes aux assurances. Elle explique ensuite le rôle que tient chaque intervenant (responsables politiques, associations, organisations de secours, volontaires, médias, etc...) et les problèmes de coordination pouvant survenir entre eux. Un aspect intéressant concernant le rôle de l'être humain, ainsi que de la culture, est aussi étudié, notamment l'influence du stress sur les victimes comme les secouristes. Cet article se base sur un certain nombre d'évènements catastrophiques survenus au Canada, comme le verglas de 1998, les inondations du Saguenay, ou encore l'incendie de l'entrepôt de PBC de Saint Basile le Grand.

## 1.1 Précuseurs

La recherche d'optimisation dans la logistique d'urgence est un développement récent de la recherche opérationnelle. La notion de catastrophe semblait auparavant légitimer que les secours soient pris au dépourvu et qu'ils s'organisent comme ils pouvaient, sans garantie de résultats. Une publication précoce est l'article de Brown et Vassiliou (1993), qui propose d'utiliser l'outil informatique pour aider l'armée grecque dans l'allocation de ses unités en cas de catastrophe naturelle. Le système recense les ressources disponibles ainsi que la somme de travail à effectuer, et alloue ces ressources de la façon la plus efficace possible, en tenant compte de la répartition géographique, des quantités de travail disponibles et requises, ainsi que des compétences spécifiques de chaque bataillon. Ce système prend en compte le temps que prendra chaque unité à se rendre sur place.

## 1.2 Développement du sujet suite au séisme d'Istanbul en 1999

Le séisme d'Istanbul, le 17 août 1999, et ses 20 000 morts, et la crainte d'un prochain séisme de magnitude semblable a lancé l'idée de planifier les secours en avance. Des chercheurs ont commencés à explorer l'idée, réfléchissant surtout à l'aspect de transport des denrées vers les zones sinistrées, et l'évacuation des blessés. Cela a abouti à un premier article de Barbarasoglu *et al.* (2002) proposant un modèle pour déterminer la répartition optimale d'une flotte d'hélicoptères dans le cadre d'une opération de secours, et définir son trajet. Il se décompose en deux (2) parties. Au niveau tactique, il s'agit de minimiser la flotte totale d'hélicoptères et de pilotes mobilisés, tout en assignant des équipages compatibles avec les appareils désignés et en décidant du nombre de tournées possibles. Au niveau opérationnel, il cherche à minimiser le temps nécessaire aux opérations de transport, tout en décidant du parcours de chaque appareil et de son réapprovisionnement en carburant. Ces deux (2) parties étant interdépendantes, il est impossible de les résoudre l'une après l'autre, elles sont donc optimisées tour à tour par un procédé itératif, afin d'arriver à un meilleur compromis, ce qui nécessite qu'une personne qualifiée soit en charge d'exécuter le programme.

Par la suite Özdamar *et al.* (2004), ont définis une procédure de planification des trajets de véhicules dans le cadre des opérations logistiques liées aux catastrophes naturelles. Ce travail décrit un modèle logistique visant à minimiser la demande insatisfaite, c'est à dire le besoin des sinistrés en matière de nourriture, médicaments, vêtements et abris. Le problème est d'abord formulé comme un problème linéaire en nombres mixtes MIP (Mixed Integer Programming). Toutefois, cette formulation ne convenant pas pour un problème de taille plus grande, le problème a été divisé en deux (2) sous-problèmes articulés par une relaxation lagrangienne. Le premier sous-problème traite de l'approvisionnement des ressources aux points de demande, il tend à minimiser la demande non assouvie. Le deuxième sous-problème traite de la capacité de la flotte de transport, il tend à minimiser sa surcharge. Cette contrainte n'étant en réalité pas souple, les deux (2) sous-problèmes sont traités successivement par itérations jusqu'à arriver à une solution les satisfaisant tous les deux.

Yi et Özdamar (2007a) appliquent plus spécifiquement le problème de transport au cas des urgences médicales, ce qui signifie que la capacité de transport peut être utilisée aussi bien par des biens que par des blessés ayant besoin d'être évacués. Les blessés ainsi que les denrées se voient attribuées un coefficient de priorité, permettant de répartir les transports le plus efficacement possible. Le modèle est construit en deux (2) parties. La première partie est un modèle compact traitant des véhicules comme une quantité de transport, et non comme des véhicules séparés. Il permet de répartir les ressources de transport en fonction des différents besoins. La deuxième partie est un algorithme donnant l'itinéraire de chaque véhicule et les instructions de chargement/déchargement à chaque nœud en fonction des résultats de la première partie.

Enfin, Yi et Özdamar (2007b) s'intéressent à la part d'incertitude présente dans l'évaluation des situations de catastrophe naturelle, due à une information lacunaire au début, corrigée par les rapports d'informations successifs.

Le procédé présenté permet d'évaluer la quantité de ressources demandée par un intervalle flou, puis de réduire cet intervalle au fur et à mesure que des informations parviennent de la zone affectée. Les itinéraires optimaux sont alors recalculés, et une nouvelle solution trouvée. Berkoune *et al.* (2011), décrivent un modèle apportant une solution au problème de transport depuis un entrepôt jusqu'à des points de demande dans une situation d'urgence. Il propose un modèle de programmation MIP, cherchant à déterminer des routes de livraison minimisant le temps de livraison total, tout en délivrant la quantité demandée de chaque produit aux points de demande et en respectant les contraintes de disponibilité des produits et de capacités des véhicules. Ensuite, de façon à réduire le temps de calcul, une heuristique est proposée, basée sur les algorithmes génétiques. Un algorithme glouton remplissant les contraintes de capacité est utilisé pour construire la première génération de solutions, puis les solutions sont évaluées et les meilleures sont sélectionnées pour la génération suivante, après des opérations de croisement et de mutation aléatoire. La solution fournit des solutions utilisables et proches de l'optimum en environ 60 secondes, ce qui la rend très pratique pour l'assistance à la décision où l'entraînement des fonctionnaires municipaux.

### 1.3 Problèmes classiques de logistique adaptés

Certains aspects de la logistique humanitaire ne sont en rien différents des problèmes de logistique industrielle, il est donc facile d'adapter des solutions employées dans d'autres domaines à l'aide humanitaire.

Par exemple, Oloruntoba et Gray (2006) comparent la chaîne logistique humanitaire avec les chaînes logistiques utilisées dans le domaine commercial. Les différences citées sont la difficulté de planifier, mais aussi le manque de perspective stratégique à long terme, qui oppose les agences de développement aux agences de secours fonctionnant au cas par cas. Une différence fondamentale est aussi qu'une chaîne logistique commerciale est articulée de façon à satisfaire le consommateur qui est la source de revenu, tandis qu'une chaîne d'approvisionnement humanitaire cherche à satisfaire le sinistré, mais tire son revenu du

donateur. Le concept d'agilité peut se définir comme : « la capacité de prospérer dans un environnement en évolution constante et imprévisible » (Oloruntoba et Gray (2006)) . Ce concept pourrait très bien s'appliquer dans ce cas. Par la suite, l'article propose de gérer les stocks et l'information comme les deux (2) quantités parcourant la chaîne logistique, le premier du donateur au bénéficiaire, la seconde en sens contraire. Les stocks et livraisons pourraient être gérés en « Lean » le plus possible, jusqu'à leur répartition finale aux bénéficiaires, tandis que l'information serait gérée de façon « Agile » le plus longtemps possible, jusqu'à remonter aux donateurs, permettant à l'ensemble de la chaîne logistique d'être le plus efficace possible.

Ozbay et Ozguven (2007) proposent une version adaptée à l'aide humanitaire du « Hungarian Inventory Control Model ». Le modèle suppose un stock initial, une consommation régulière, et un délai de livraison stochastique. Le but est de définir le stock initial minimal qui permet de couvrir les besoins sur toute la période étudiée. Ensuite, une analyse de sensibilité est conduite sur le modèle utilisant un seul type d'approvisionnement. Elle analyse l'influence de la probabilité de disruption, du stock initial, du nombre de livraisons, et du rythme de consommation sur l'efficacité de la distribution.

Le problème des tournées de livraison est aussi abordé par Balcik *et al.* (2008) qui définissent un modèle optimisant la distribution de l'aide humanitaire entre le centre de distribution local, et les zones affectées. Il prend en compte la quantité limitée des ressources et des moyens de transport disponibles, ainsi que l'impact plus important d'un manque dans les situations d'urgence.

Le modèle qu'ils développent est constitué de deux (2) parties. La première partie recense les routes disponibles en fonction des différents points de demandes. La deuxième partie est un calcul de tournée, comprenant les capacités des véhicules, les quantités demandées ainsi que les pénalités en cas de non satisfaction de la demande. De plus, les biens d'équipement et les biens de consommation sont considérés séparément, les premiers faisant l'objet d'une demande ponctuelle, ne pouvant pas être arriérée, les seconds faisant l'objet d'une demande récurrente, pouvant être repoussée (moyennant pénalité).

Ce modèle est intéressant, mais ne semble pas pour l'instant assez rapide pour être mis en application (200 minutes de calcul avec 4 points de livraison), une version avec heuristique doit être mise en place.

On pourrait aussi appliquer au domaine de l'urgence les raisonnements liés aux ensembles flous, comme Teodorovic et Pavkovic (1996), qui utilisent ce type d'ensembles pour répondre au problème du routage des véhicules lorsque la demande à chaque nœud est incertaine. La demande à chaque nœud est alors représentée par un nombre flou triangulaire dont les deux (2) extrémités représentent les bornes de l'intervalle, et le sommet représente la valeur la plus probable. On cherche alors, en connaissant les emplacements du dépôt et des nœuds à desservir et la capacité du véhicule, à déterminer une route minimisant les coûts. L'algorithme le plus simple pour obtenir une route est le balayage, qui considère le dépôt comme le centre d'un repère polaire, et qui part d'un emplacement en joignant tous les autres par augmentation de l'argument. Le modèle doit alors choisir pour chaque nœud s'il préfère envoyer le véhicule ou le faire revenir au dépôt. Deux (2) raisonnements ont été proposés pour cette décision. Le premier modèle fait dépendre cette décision uniquement de la capacité disponible dans le véhicule après avoir servi le dernier nœud, ce qui signifie que la capacité (représentée par le centre de gravité du nombre flou triangulaire) est supposée inférieure à un paramètre préalablement choisi, alors le véhicule est renvoyé au dépôt. Si, au contraire, elle est supérieure ou égale, le véhicule continue sa route jusqu'au nœud suivant. Plus ce paramètre est choisi bas, plus il montre une tendance à utiliser la capacité du véhicule au maximum avant de retourner au dépôt. Un deuxième raisonnement utilise la demande estimée au nœud suivant pour affiner cette décision, en la représentant là aussi par un nombre flou triangulaire. Cette utilisation des nombres flous permet de traduire mathématiquement des données verbales comme "un peu plus", "environ", qui sont alors utilisable dans un algorithme.

Teodorovic et Radivojevic (2000) appliquent ainsi les ensembles flous aux transports en cherchant à améliorer la répartition des véhicules pour les entreprises de transport privé comme les compagnies de taxi. Lorsqu'un nouveau client appelle pour demander un véhicule, il est nécessaire de décider du véhicule qui va être assigné à ce trajet, ainsi que du nouveau

trajet et planning de ce véhicule. Les nombres flous sont utilisés de façon à transcrire en données numériques les indications linguistiques. Le temps d'arrivée du véhicule est défini comme un nombre flou triangulaire compris entre le temps au plus tôt et le temps au plus tard. En réagissant à la distance du véhicule par rapport à la destination demandée et au temps d'attente du véhicule, on établit une préférence pour les véhicules, ce qui permet de choisir le plus adapté. En procédant de la même façon pour le temps total de trajet et les détours engendrés, on définit le nouveau planning et la nouvelle route du véhicule. Nous pourrions parfaitement appliquer ce raisonnement pour les transports médicaux et les ambulances dans les situations d'urgence.

Le routage de véhicule stochastique pourrait aussi être utilisé dans ce cas. Une revue de la littérature scientifique est proposée par Gendreau *et al.* (1996) sur le sujet de la programmation stochastique du routage de véhicule. Les différents types de problèmes du voyageur de commerce sont décrit, avec des clients stochastiques, dont la présence au nœud de demande est inconnue, avec un temps de transport stochastique entre les nœuds, puis le problème de  $m$  voyageurs de commerce, qui est simplement le même problème, mais avec  $m$  véhicules. Le problème du routage de véhicule est alors présenté avec ses variantes, telle que la demande stochastique à chaque nœud, la présence stochastique d'un client, ou encore une combinaison des deux (2) précédents, clients stochastiques et demandes stochastiques. Il est intéressant de passer en revue les différentes options permettant d'inclure une variable aléatoire dans le modèle.

#### **1.4 Autres approches**

Un certain nombre d'autres pistes ont été explorées, prenant en compte d'autres spécificités des situations de catastrophes naturelles, ou d'autres conséquences sur les circuits logistiques, comme la périodicité des typhons, la destruction des routes, ou encore la fluctuation de la demande.

Ainsi, Chang *et al.* (2007) ont eu une approche différente, basée sur les données statistiques. Pour faire face aux inondations récurrentes à Taiwan, ils proposent de préparer des réseaux

logistiques potentiels. Ils définissent un certain nombre de situations (scénarios des niveaux de précipitation) différentes, puis déterminent les différentes zones à risques ainsi que leurs besoins en fonction de chaque situation.

Le premier point de cet article est de décomposer les zones en groupes (voir la Figure 2), suivant leurs proximités géographiques, qui sont eux-mêmes organisés en échelons, suivant leur hiérarchie dans l'organisation, et en niveaux, suivant le niveau de risque encouru. Pour réaliser ce regroupement, un modèle assez classique visant à minimiser la distance parcourue est utilisé.

Le deuxième point consiste à choisir les endroits où seront installés les dépôts en fonction de chaque situation, puis la quantité de matériel à allouer ainsi que le plan de transport.

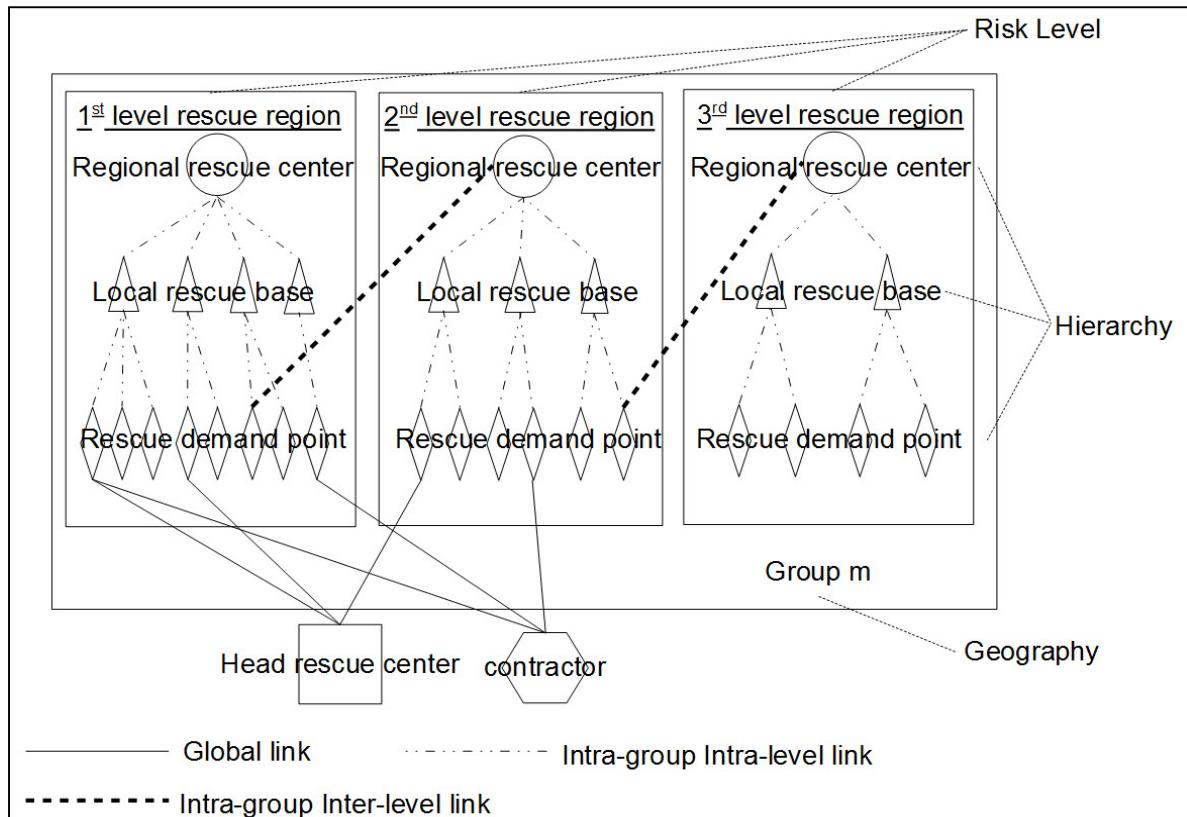


Figure 1-1: Groupage des zones de Chang, *et al.*(2007)

Afin d'obtenir différents scénarios, des cartes de divisions administratives, des cartes des réseaux de transport, des cartes des entrepôts éventuels et des cartes des niveaux d'inondations potentiels sont superposées.

Les différents réseaux logistiques possibles sont ainsi connus.

On crée ensuite aléatoirement des scénarios d'inondations, suivant les probabilités enregistrées, et on résout les deux (2) sous-problèmes pour chaque scénario. En croisant les solutions en fonction des probabilités de chaque scénario, la meilleure solution d'un point de vue stochastique est obtenue. Ce modèle repose sur des données disponibles d'après les précédentes inondations, ainsi que sur leur probabilité stochastique de se réaliser.

Nous pouvons aussi remarquer l'article de Ukkusuri et Yushimoto (2008), qui ont travaillé au positionnement préalable des stocks afin de répondre le plus efficacement possible en situation d'urgence. Il explique préalablement les quatre (4) phases de traitement de l'urgence de la *National Governors Association Emergency Preparedness Project* : Atténuation, Préparation, Réponse, Rétablissement. Il s'occupe de la partie "Préparation". Le pré-positionnement est ici effectué en fonction de la fiabilité supposée du réseau de transport après la catastrophe. Le modèle s'inspire du problème du chemin le plus court, en remplaçant la longueur du chemin par sa fiabilité. Nous avons donc finalement un modèle simple, permettant de savoir où localiser les stocks de manière à diminuer les coûts de livraison tout en continuant à être capable d'approvisionner les points de demande en cas de rupture de certains liens du réseau logistique.

Sforza et Sterle (2010) proposent une vision assez similaire, en étudiant les interruptions de réseaux logistiques et la criticité des infrastructures. Leur étude définit les infrastructures critiques d'un réseau logistique comme celles dont l'arrêt du fonctionnement cause le dommage maximal à un pays (ex : énergie, transport, communication). Cette définition de ces infrastructures critiques est illustrée par un modèle de localisation d'installation sans contrainte de capacité (Problème p-médian), puis un calcul du coût d'une panne de chaque installation calculée précédemment, afin de déterminer l'installation critique. L'identification des infrastructures critiques utilise deux (2) méthodes. Dans la première, un nouveau type d'installation est présenté, qui ne génère pas ou ne reçoit pas de flux, mais l'intercepte. On

utilise ici un modèle de localisation de ce type d'installation pour optimiser l'interception en la maximisant avec un nombre donné d'installation ou en minimisant le nombre d'installations pour un résultat donné. Dans la deuxième méthode, on identifie les installations dont la perte entraîne la plus grande disruption du service (problème de R-interdiction médian), qui sont ainsi les installations critiques. Les auteurs présentent une méthode de fortification des infrastructures, en permettant d'empêcher la panne d'un nombre limité d'installations. Il propose alors deux (2) modèles afin de concevoir des réseaux logistiques fiables, l'un ayant pour but de minimiser une combinaison du coût de fonctionnement et du coût de panne attendu, l'autre cherchant à minimiser le coût de fonctionnement tout en respectant une contrainte sur le coût de panne maximal. Ces méthodes peuvent s'appliquer à un grand nombre de domaines, y compris la logistique d'urgence, et améliorer la compréhension des interruptions dans les réseaux logistiques.

Sheu (2007) propose une autre logique pour s'attaquer au problème de la logistique d'urgence, utilisant un système hybride d'optimisation et de partitionnement flou pour exécuter de façon récursive le regroupement des zones touchées et la codistribution de l'aide. Son modèle se divise en cinq (5) étapes, dont l'articulation est explicitée à la Figure 3 :

1 - Prévision de la demande : La fonction de demande est considérée comme étant fluctuante en fonction du temps, et elle est envisagée de manière différente en fonction de la nature des commodités, bien de consommation ou d'équipement.

Pour les biens de consommation, on multiplie la demande par le nombre de sinistrés et par l'intervalle entre deux (2) livraisons, auxquelles on ajoute un stock de sécurité, tandis que pour les biens d'équipement, on multiplie la demande par le nombre de sinistrés auxquels on ajoute une demande tampon et auquel on doit retrancher la demande déjà servie.

2 – Regroupement des zones affectées en zones de livraison :

On commence par définir la sensibilité d'une zone affectée selon quatre (4) critères : 1) distance au centre de distribution ; 2) proportion de blessés; 3) proportion de personnes dépendantes; 4) niveau de dommage des bâtiments. On groupe les notes associées à ces 4 critères dans un vecteur, le vecteur des critères d'urgence et on les transforme alors en données binaires à 4 bits, que l'on harmonise. Les vecteurs de chaque zone, harmonisés, sont

comparés 2 à 2 au sein d'une matrice de corrélation floue, et s'ils sont considérés relativement proches, ils sont affectés au même groupe de livraison.

3 – Priorisation : Les groupes de livraison sont ensuite priorisés en fonction du résultat de l'agrégation des différents critères.

4 – Maximisation de l'utilité : En servant ensuite ces groupes de zones par ordre de priorité, on maximise l'utilité des ressources fournies. Pour cela, on définit d'abord deux (2) fonctions objectives pour chaque groupe de livraison, l'une pour maximiser la demande servie, l'autre pour minimiser les coûts de transport et d'installation. On rassemble ensuite ces deux (2) fonctions en une seule, équilibrée suivant des poids différents.

Enfin, on rassemble les fonctions de tous les groupes de livraison, en associant un poids différent en fonction de la priorité de chaque groupe, pour obtenir la fonction de répartition finale

5 – Prévision de la demande : Par une procédure dynamique, on prévoit la demande future, de façon à réguler l'afflux de biens en provenance des fournisseurs, et à éviter l'engorgement des centres de distributions.

Ces innovations permettent d'optimiser la chaîne d'approvisionnement en amont, en évitant l'engorgement des centres de distribution par des denrées inutiles, et en prévoyant les besoins futurs.

Elles permettent aussi d'optimiser l'utilité des ressources distribuées en aval, par la priorisation et la livraison aux endroits où la demande est la plus importante et la plus pressante.

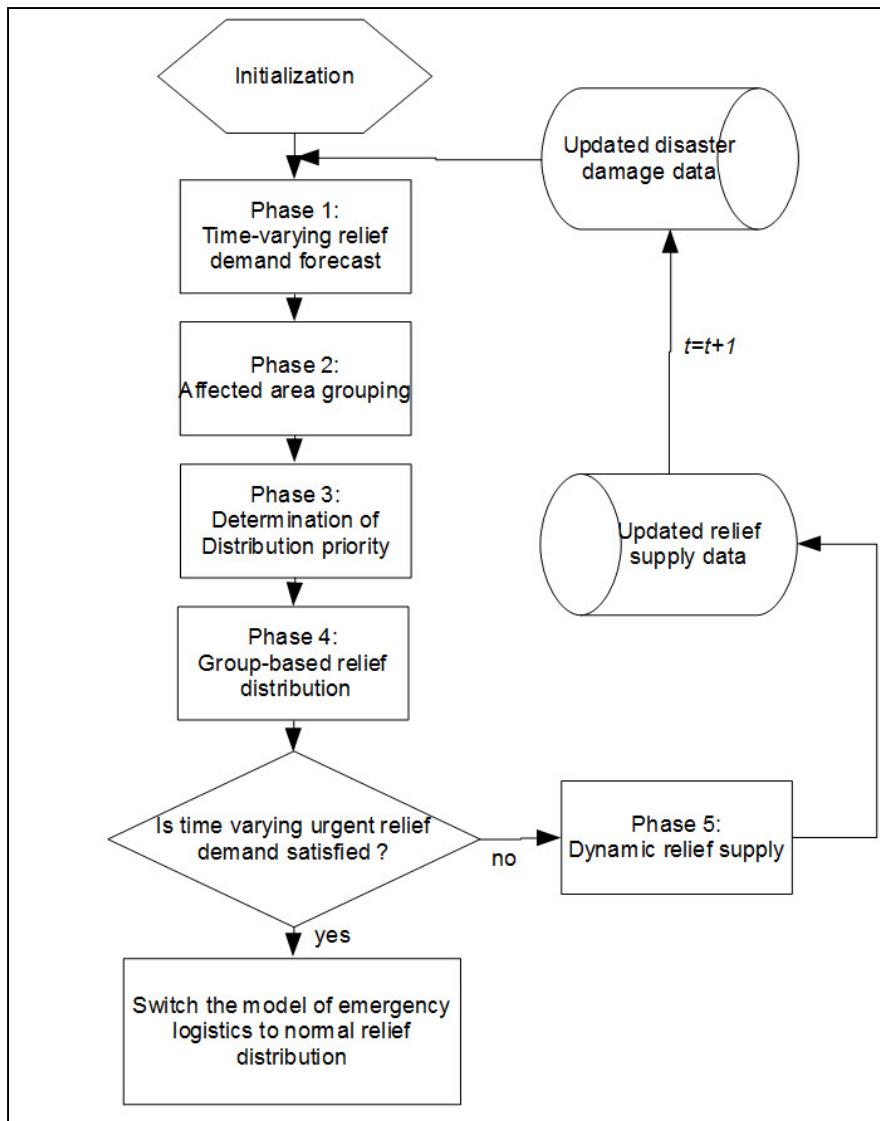


Figure 1-2 : Logigramme de Sheu (2007)

## 1.5 Concepts utilisés

Une des caractéristiques de ces modèles est leur taille souvent importante, car les zones touchées sont étendues et les besoins importants Balcik, Beamon *et al.* (2008). La deuxième caractéristique dont il faut tenir compte est que la solution doit pouvoir être obtenue rapidement, non seulement pour pouvoir être mise en place rapidement, mais aussi car

l'arrivée de nouvelles informations, fréquentes dans la confusion suivant une catastrophe naturelle, conduit souvent à devoir modifier les paramètres et relancer le calcul. La durée maximale couramment admise est de 30 minutes. On a donc recours à un certain nombre de méthodes pour raccourcir le temps de calcul.

Par exemple, Yi et Kumar (2007) propose une amélioration du modèle de l'article "A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities" de Yi et Özdamar (2007a). Ils proposent une nouvelle façon de résoudre le problème, basée sur l'optimisation par une colonie de fourmis. L'utilisation de cette heuristique de résolution a pour intérêt d'accroître la vitesse de résolution, ce qui est important pour une procédure d'urgence

Dans un premier temps, le chemin est construit de façon stochastique et le meilleur chemin est sélectionné par les traces de phéromones de façon à maximiser l'utilité du trajet pour le transport des approvisionnements. Pour éviter la sélection myope des chemins, l'algorithme glouton n'est pas employé, et le chemin est sélectionné aussi en partant de la fin. Une fois les chemins définis, les livraisons des approvisionnements sont conçus en fonction de ces chemins.

Dans un modèle précédent, Özdamar, Ekinci *et al.* (2004) utilisent la relaxation lagrangienne pour simplifier son modèle. Les deux (2) sous-problèmes articulés par cette relaxation ont pour but de minimiser la demande insatisfaite pour le premier et les dépassemens de capacité pour le second. Ce changement, s'il ne donne pas la solution optimale, donne néanmoins une bonne solution dans un temps beaucoup plus court, ce qui est essentiel lorsque les décisions doivent être prises rapidement.

Les algorithmes génétiques sont utilisés pour réduire les temps de calcul.

Lin *et al.* (2009) proposent un modèle de transport distribuant un certain nombre de provisions aux sinistrés. Un niveau de priorité différent est proposé pour la nourriture, les médicaments, l'eau, en fonction de la nécessité de ces articles pour la survie des personnes. Une pénalité est assignée aux livraisons non effectuées. Le modèle autorise des livraisons partielles pour couvrir les différents besoins. Le modèle est d'abord défini comme un modèle de programmation entière à multi-objectif, concernant un nombre limité de véhicules,

plusieurs périodes et plusieurs commodités. Les algorithmes génétiques sont ensuite utilisés pour générer des tournées près de l'optimal, puis un autre algorithme est utilisé pour assigner des véhicules à ces différentes tournées.

## 1.6 Vulnérabilité

Un certain nombre de données concernant les statistiques utilisées doivent être clarifiées pour être utilisées.

Notamment, les données démographiques ayant évolués, il faut prendre en compte certains changements dans le cas d'une étude à long terme (en utilisant des données datant de plus de 20 ans).

La recherche de statistiques concernant la vulnérabilité soulève le problème de la définition des mots et concepts clés intervenant dans le cadre d'une catastrophe, ces problèmes de définition se traduisant par des écarts dans les statistiques enregistrées lors de différentes catastrophes, rendant toute agrégation de chiffres pour des analyses statistiques peu fiable, comme le remarque Quarantelli (2001). Une étude de Weichselgartner (2001) relève ainsi 23 définitions du mot « vulnérabilité » et les différences entre les différentes définitions, ainsi que les conséquences de ces différences sur la façon d'analyser un danger et la façon de s'y préparer.

Cette notion de vulnérabilité est utilisée dans un certain nombre de champs d'étude. Thomalla *et al.* (2006) évoquent les points de convergence entre quatre (4) disciplines utilisant cette notion : la réduction des risques dus aux catastrophes naturelles, l'adaptation au changement climatique, la gestion de l'environnement et la réduction de la pauvreté. La réduction de la vulnérabilité socio-économique au changement climatiques et aux catastrophes climatiques a été menée par les quatre (4) disciplines. Les résultats ont été, pour la majeure partie, peu concluants. La raison évoquée est un manque de coordination entre ces disciplines, due à une perception différente de la nature et l'échelle du problème, les équipes de gestion du risque de catastrophe se concentrant en général sur la résolution d'un problème dans une zone, tandis que les équipes d'étude du changement climatique se penchent sur la

compréhension du mécanisme global. L'article avance aussi un manque de connaissance au niveau des causes de la vulnérabilité et un manque d'informations sur le niveau de base des communautés cibles, il propose des terrains d'études communs pour instaurer un dialogue entre les communautés de chercheurs, notamment sur la notion de résilience, des zones vulnérables de grande échelle pouvant être étudiées par les deux communautés, et l'établissement de méthodologies communes pour évaluer des données.

On doit également tenir compte lors de l'interprétation des dommages subis de l'état économique et démographique d'un pays. L'évolution de la population et de l'économie en Amérique Latine, par exemple, rend difficile de normaliser les dommages constatés sur une longue période, ainsi que de quantifier l'évolution du potentiel de perte sur la même période, comme l'expliquent Pielke *et al.* (2003).

Une étude d'Alcantara-Ayala (2002) s'intéresse à l'influence de la géomorphologie sur la distribution des catastrophes naturelles, notamment en constatant l'impact qu'a celle-ci sur les pays en voie de développement. On constate que ces pays sont pour la plupart situés dans des zones fortement touchées par les activités volcaniques, sismiques ainsi que les tempêtes et inondations. Ainsi, le nombre de morts est concentré dans les pays en voie de développement, avec un taux aussi haut de 95% des morts de la planète comme l'indique l'étude d'Alexander (1993). Ces catastrophes naturelles sont fortement liées à la géomorphologie. Celle-ci est donc un des facteurs les plus significatifs de la vulnérabilité aux catastrophes naturelles. Ce concept de vulnérabilité géographique est exploré plus profondément, étant considéré comme un facteur clé pour comprendre la survenue des catastrophes naturelles, et, en conséquence, dans le développement et la mise en application de stratégies de prévention efficaces. Ces notions sont étudiées et démontrées comme étant des aspects cibles à prendre en compte pour la réduction de la vulnérabilité et la préventions et l'atténuation des dégâts dus aux catastrophes naturelles. L'importance d'incorporer non seulement la géomorphologie, mais aussi des géomorphologistes dans les programmes d'évaluation et de management des risques est mise en emphase.

Une étude similaire en Asie par Haque (2002) étudie les corrélations entre les dégâts dus aux catastrophes naturelles et un certain nombre de variables socio-économiques. Les dégâts sont

comptabilisés en nombres de morts, de blessés, de sans-abris et des dommages économiques en dollars. Les variables socio-économiques étudiées sont la taille et la densité de la population, la taille de la population active, l'espérance de vie, le taux d'alphabétisation, le PNB et son taux de croissance, la proportion de population urbaine, et la consommation énergétique par personne. L'importance de ces facteurs dans la prédition des dommages varie dans le temps, les facteurs démographiques prenant plus de poids dans les années 80. On constate une corrélation importante entre les données démographiques et socio-économiques et le nombre de victimes des catastrophes, les données démographiques devenant les indicateurs les plus fiables du niveau d'une catastrophe. On peut supposer qu'un contrôle de la taille de la population et de sa répartition pourrait être une mesure d'atténuation des dégâts humains d'une catastrophe. Il est noté qu'un développement inadéquat de la région, notamment sans évaluation des risques, pourrait augmenter l'ampleur d'une catastrophe en accumulant des infrastructures et richesses vulnérables à un endroit risqué.

Wei *et al.* (2003) utilisent la méthode DEA (Data Envelopment Analysis) pour déterminer la vulnérabilité de différentes régions. Cette méthode permet de faire une comparaison entre différentes unités appelées DMU (Decision Making Units) lorsqu'on a plusieurs variables d'entrée ainsi que plusieurs variables de sortie, puisqu'il est alors impossible de calculer simplement Sortie/Entrée. La méthode DEA consiste à comparer chaque DMU à toutes les autres en utilisant les coefficients qui lui sont le plus favorable, et à reproduire la même procédure pour toutes les unités. On a de cette façon une évaluation impartiale de la performance de chaque DMU. La méthode DEA est ici utilisée pour comparer la vulnérabilité aux catastrophes des différentes régions chinoises. Les variables d'entrées utilisées sont la densité de population et la complexité de l'infrastructure commerciale qui est représentée par le Produit Intérieur Brut. Les variables de sorties sont le nombre de personnes affectées et le coût total des dommages.

## 1.7 Prévision des dégâts

Une façon plus spécifique de définir la vulnérabilité d'une zone est de trouver une méthode de prévoir les dégâts sur cette zone en fonction de la catastrophe. De nombreuses études se sont penchées sur des situations spécifiques, comme Sugimoto *et al.* (2003) qui présentent une méthode de prédiction des pertes humaines dues aux tsunamis tenant compte des activités d'évacuation utilisant des calculs numériques et des données GIS (Geographical Information System). Il a été mis en place pour la ville d'Usa, sur l'île de Shikoku, au Japon, en prévision d'un séisme sur la faille de Nankai au cours de la première moitié du 21e siècle. Le nombre de victimes a été estimé en utilisant les données de population dans les zones potentiellement inondées. Le nombre de morts a été estimé par une méthode agrégeant les nombres de morts de chaque zone inondée, prenant en compte le temps de départ vers les zones refuge, la hauteur de l'inondation, la vitesse du flot et la vitesse de l'évacuation. L'étude de la situation d'Usa conclut sur l'importance d'un départ précoce. La méthode présentée permet l'estimation du nombre de morts dus à un tsunami frappant une région côtière, et peut être utile pour mettre en place des contremesures.

Une autre étude sur les effets des séismes est celle de Powell et Allahabadi (1988), qui proposent un modèle permettant de prévoir les dommages subis par un bâtiment lors d'un séisme. Bien que la prédiction repose en majeure partie sur une méthode probabiliste, un certain nombre de critères déterministes peuvent avoir une grande influence sur les dégâts. L'article considère deux (2) méthodes. La première est basée sur un système de demande exercée sur la structure et la capacité correspondante du bâtiment à y répondre, avec des demandes de force, de déplacement, et de dissipation d'une quantité d'énergie. La deuxième méthode est basée sur la dégradation des propriétés de la structure, comme la rigidité, la résistance à la déformation plastique, et la capacité de dissipation d'énergie. Un indice de dégât est calculé pour chaque méthode, et les calculs proposés peuvent être appliqués aux sous-ensembles du bâtiment puis combinés pour donner un indice global selon une méthode proposée dans l'article.

La méthode précédente nécessite toutefois une évaluation bâtiment par bâtiment, ce qui implique un temps assez long. Giovinazzi et Lagomarsino (2003) indiquent que la principale cause de mortalité et de blessures dues aux séismes est l'effondrement et les dégâts aux bâtiments situés dans les régions à forte sismicité. Il présente les trois (3) méthodes les plus employées pour calculer la vulnérabilité des bâtiments situés dans les zones sismiques. La méthode typologique consiste à regrouper les bâtiments suivant un certain nombre de critères comme les matériaux, la hauteur, la technique de construction, et l'état d'entretien, en un certain nombre de classes de vulnérabilité dont le profil de dégât en fonction de la force du séisme est connu. La méthode d'inspection et de notation consiste à faire attribuer à chaque bâtiment un indice de vulnérabilité par un expert, sachant que la relation entre la force du séisme et les dégâts subis est établie pour chaque indice. La technique mécanique consiste à évaluer les caractéristiques mécaniques du bâtiment et à simuler sa résistance à un séisme à partir de celles-ci. Les auteurs présentent un nouveau modèle de vulnérabilité hybride, partant de la méthode typologique EMS 98 décrivant les types de bâtiments et leur classe de vulnérabilité, ainsi que les dégâts prévus pour chaque classe en fonction de l'intensité du séisme. Les catégories de dégâts "Peu", "Nombreux" et "La plupart" sont décrits en utilisant une fonction floue, et un ensemble de facteurs de modification sont inclus afin d'affiner le classement typologique.

Des évaluations de l'impact des ouragans sur les structures a aussi été réalisé par Pinelli *et al.* (2004), qui présentent un modèle de prédiction des dégâts causés par les ouragans sur les bâtiments résidentiels. La première étape de ce modèle est d'identifier les différents types de dégâts pouvant affecter les composants des bâtiments. Les types de dégâts sont ensuite combinés en différents scénarios de dégâts, dont les probabilités d'occurrence sont calculées en fonction de la vitesse du vent grâce à des simulations mécaniques sur des modèles de maison typiques. L'article décrit le principe du modèle ainsi que sa mise en place pour un type de bâtiment en fonction de données probabilistes. Le modèle est constitué de sous-ensembles qui garantissent la transparence et la flexibilité de son fonctionnement, ce qui permet de l'analyser après utilisation.

Cette étude est utile pour comprendre les mécanismes engendrant des dégâts lors d'un ouragan, et une étude plus générale des dégâts monétaires causés par les ouragans complète cette compréhension. Katz (2002) évalue les dégâts économiques associés aux ouragans en utilisant un processus de Poisson composé comme modèle stochastique. Ce modèle consiste en deux (2) composants, l'un calculant l'occurrence des ouragans, et l'autre spécifiant les dégâts associés à chaque ouragan particulier. Les dégâts sont donc représentés par une somme aléatoire, les variations dans les dégâts totaux décomposés en deux (2) sources, l'une attribuable aux variations de fréquence des évènements, l'autre aux variations des dégâts des évènements particuliers. Le modèle est appliqué aux dommages économiques dus aux ouragans de l'Atlantique Nord atteignant les États-Unis, corrigés pour la vulnérabilité sociétale. Le nombre annuel d'ouragans correspond raisonnablement bien à une distribution de Poisson, et les dégâts monétaires d'un ouragan correspondent à une loi lognormale. Il n'y a aucune indication d'une tendance dans la distribution des ouragans, et uniquement une faible indication d'une tendance à l'augmentation des dégâts pour les évènements individuels. Une indication plus forte existe liant ces deux (2) paramètres à l'état du phénomène El Nino.

## 1.8 Évaluation des besoins

La réponse à apporter à une situation de catastrophe naturelle dépend d'abord de la connaissance que l'on a de celle-ci. Or l'évaluation de la situation est quelque chose de difficile à apporter en temps utile, étant donné l'ampleur des éléments à vérifier et la désorganisation des infrastructures qui sont les caractéristiques d'une catastrophe.

L'évaluation des dommages lors des premières phases des catastrophes est très peu standardisée, ce qui rend difficile l'obtention de données cohérentes. Okada et Takai (1999) proposent donc un système de classification des dommages aux bâtiments qui résultent d'un tremblement de terre. L'idée de départ est qu'il est difficile d'obtenir des données cohérentes, faute d'une échelle de mesure commune de ces dommages. L'auteur propose donc des critères de classification simples, utilisant des critères visuels de façon à pouvoir être appliquées par une personne non formée, et permettant une appréciation rapide des dégâts. Ce système peut

aussi servir d'échelle commune pour les différents systèmes de classification précédents. Cet article donne aussi une répartition des types de victimes en fonction du type de dommage, ainsi qu'une fonction donnant la répartition des dommages en fonction de l'intensité et de la vitesse du séisme.

L'évaluation correcte des dégâts est nécessaire, mais pas suffisante pour une aide efficace. En effet une aide inadaptée est quelquefois plus nuisible qu'utile en encombrant les réseaux logistiques à la place des biens utiles, d'où l'importance d'une bonne évaluation des besoins, différents suivant le type de catastrophe. Redmond (2005) présente la procédure optimale d'évaluation des besoins en cas de crise humanitaire. Il explique que la priorisation des besoins est aussi primordiale et se fait dans l'ordre suivant : eau potable, installations sanitaires, nourriture, abri, soins médicaux, équipes de recherche. La coordination des efforts locaux et internationaux, ainsi que le partage d'informations entre les différents intervenants sont aussi importantes pour éviter les redondances et les lacunes.

Les agences internationales utilisent désormais des guides pour les évaluations de besoins. Celui proposé par Planitz (1999) décrit les principes d'un tel exercice, les différences entre l'évaluation initiale destinée à une réaction rapide, et l'évaluation détaillée, utile pour une reconstruction à long terme. Il décrit aussi la méthodologie de l'évaluation, ainsi que les ressources nécessaires en personnel et en information.

## **1.9        Retour d'expérience et analyse des résultats obtenus**

Il est aussi important de pouvoir connaître le résultat des actions engagées dans le cadre des actions humanitaires. Par exemple, Sklaver (2003) présente les rations humanitaires distribuées par les États-Unis et leur utilisation. Ces repas sont végétariens pour éviter tout problème liés aux interdits religieux, et conditionnées dans un emballage plastique résistant. Elles sont dérivés des MRE (Meal Ready to Eat), les rations de combats de l'armée américaine, qui ont été distribuées aux populations déplacées au début des années 1990, comme au Kosovo ou en Somalie. Les premières distributions ont été faites par aérolargage

au Kosovo puis en Afghanistan en 2001, et elles ont subies un grand nombre de critiques, comme le fait qu'elles ne couvrent qu'une faible partie des besoins, que les rations aérolarguées sont souvent récupérées par les individus les plus forts, qui ne sont pas les plus nécessiteux, ou encore, que le largage a plus d'effet médiatique que réel. L'article propose que leur efficacité soit mieux évaluée et que leur utilisation soit mieux encadrée.

Il apparaît aussi dans l'étude de Darcy et Hofmann (2003) que les seuils à partir desquels un besoin humanitaire est reconnu sont différents dans certains cas, notamment à cause du manque de données sur la situation avant la catastrophe. La priorisation des besoins, notamment ceux des groupes identifiés comme vulnérables, est également citée comme permettant une aide plus efficace.

En ce qui concerne l'enregistrement des catastrophes, il existe étonnamment peu de bases de données regroupant les informations disponibles.

Le Centre of Research on the Epidemiology of Disaster CRED (2011) de l'Université catholique de Louvain (maintenant en collaboration avec l'Organisation Mondiale de la Santé) collecte toutes les données concernant les catastrophes naturelles et technologiques, et les agrège en base de données. La base de données EM-DAT (EMergency DATabase) est mise à jour régulièrement, suivant des critères établies par avance, et en se basant sur les rapports des organisations de secours ou les agences gouvernementales.

Un nouvel outil mis à la disposition des organisations de secours est le site internet [www.reliefweb.int](http://www.reliefweb.int), qui regroupe les informations disponibles sur l'évolution des différentes crises, en rendant accessibles à tous les rapports des différentes agences de l'ONU, des différents gouvernements, mais aussi d'un certain nombre d'associations, comme Logistics Cluster ou Médecins Sans Frontières. Ce partage des informations est bénéfique pour augmenter la réactivité et l'efficacité des opérations d'aide humanitaire.

Tous ces articles et travaux dans le domaine de la logistique d'urgence montrent le développement considérablement récent de ce sujet. En effet, la plupart de ces études datent de moins de 10 ans. Les articles présentés ici étudient différents aspects des catastrophes naturelles, de leur prévention et de la logistique impliquée. Certaines de leur idées peuvent

d'ailleurs être combinées avec le modèle de ce rapport pour augmenter son efficacité, et ces idées sont exposées dans la conclusion comme des pistes d'amélioration. Dans ce travail, nous tâcherons de compléter ces articles, en apportant un point de vue différent sur l'installation d'un réseau logistique en situation d'urgence, qui, nous l'espérons, pourra être mis à profit pour améliorer les secours.

## CHAPITRE 2

### MÉTHODOLOGIE

Plutôt que de rassembler tous les processus en œuvre dans les opérations de secours en un seul processus, nous avons décidé de les séparer, afin de pouvoir traiter de façon plus efficace leur succession, et construire une structure d'action cohérente, partant des données basiques et arrivant au résultat final. Ceci afin d'éviter la situation où plusieurs modèles très sophistiqués, mais, rassemblés de façon hétéroclite et mal adaptés entre eux, donnent des résultats inadaptés ou inutiles.

On a pu constater dans les retours d'expérience que l'un des problèmes que rencontrent les gestionnaires de l'urgence est le manque de coordination entre les différentes parties du processus. L'idée de ce modèle est de conserver la même structure et d'agir comme un fil conducteur entre les différents moments de l'organisation.

#### 2.1 Conception d'ensemble

Le modèle se décompose donc en cinq (5) phases, organisées comme à la Figure 4.

Ce découpage montre la logique de la gestion de la catastrophe, qui commence, en réalité, avant la catastrophe elle-même :

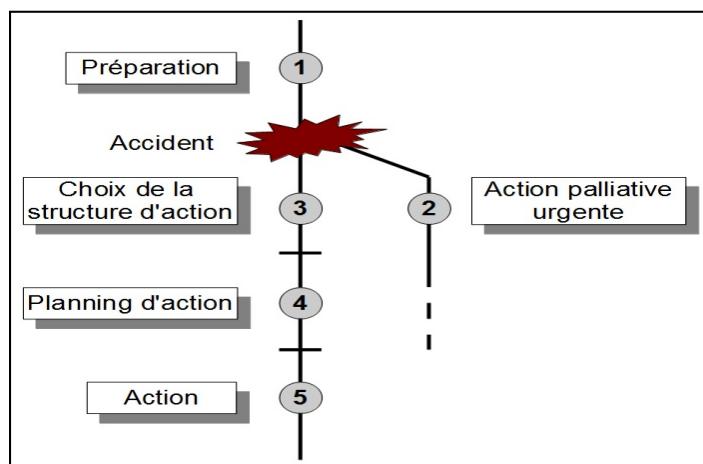


Figure 2-1 : Les différentes phases du modèle proposé

La phase 1 consiste à préparer une action efficace en prévision d'une catastrophe. On considère que dans chaque région du monde, il est inévitable qu'une catastrophe se produise. On tente donc d'être en mesure de réagir efficacement quand une catastrophe surviendra dans cette partie du monde (Figure 5).

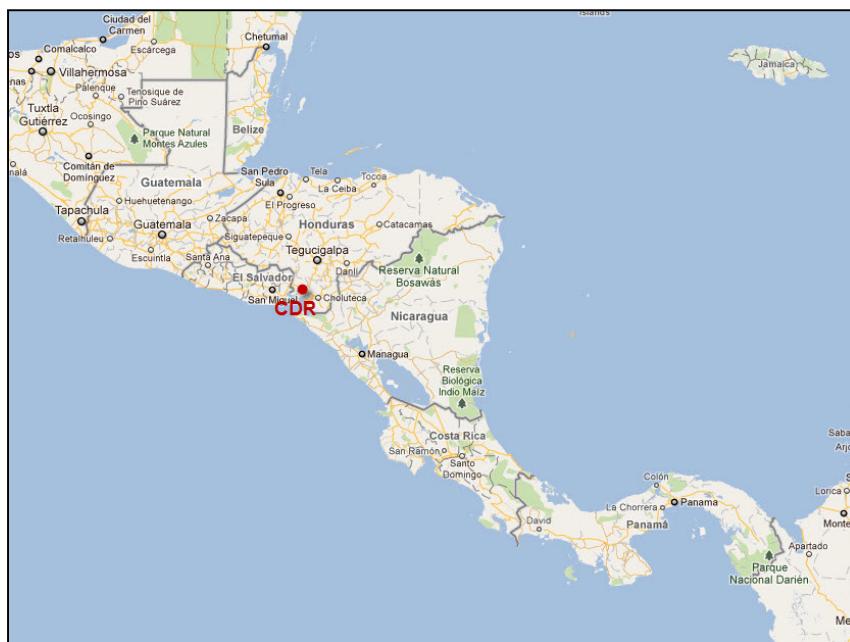


Figure 2-2 : Illustration de la phase 1

La phase 2 consiste à déterminer la meilleure façon d'envoyer de l'aide directement du Centre de Distribution Régional (CDR) vers la zone affectée (Figure 6). Elle est réalisée immédiatement après la catastrophe, elle a essentiellement un but palliatif pendant la réalisation de la phase 3.

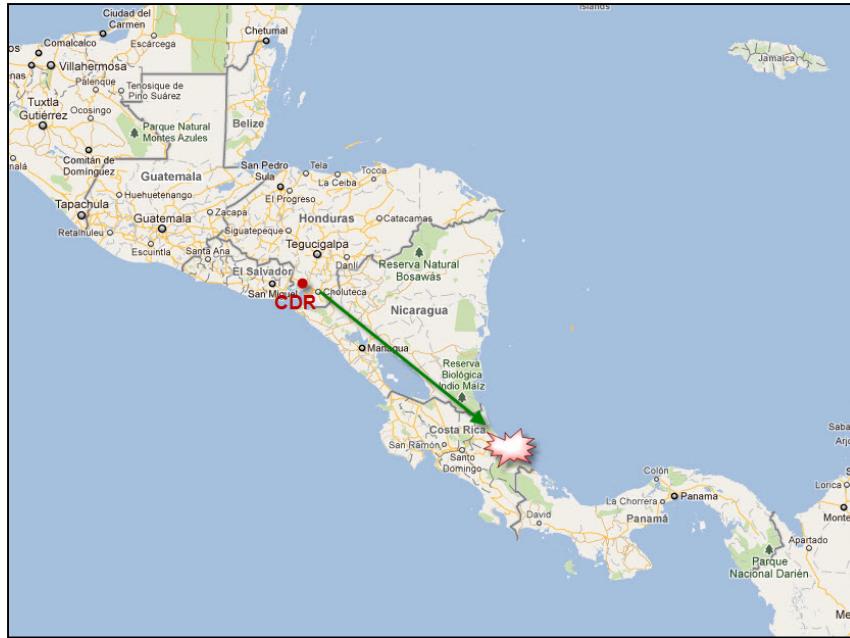


Figure 2-3 : Illustration de la phase 2

La phase 3 consiste, pour les zones touchées, à établir le meilleur endroit pour installer un Centre de Distribution Local, servant de centre avancé pour la gestion de la crise (Figure 7).

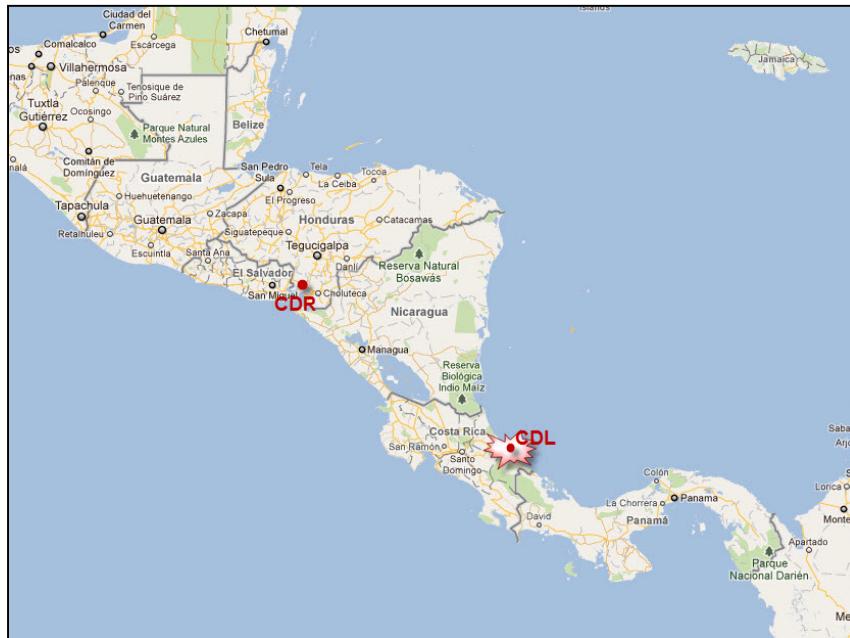


Figure 2-4 : Illustration de la phase 3

La phase 4 sert à estimer les besoins en ressources, en fonction du nombre de victimes, de catégories de victimes préétablies, et de besoins moyens (Figure 8).



Figure 2-5 : Illustration de la phase 4

La phase 5 sert à optimiser le planning de ravitaillement entre le CDR et le CDL (Figure 9).

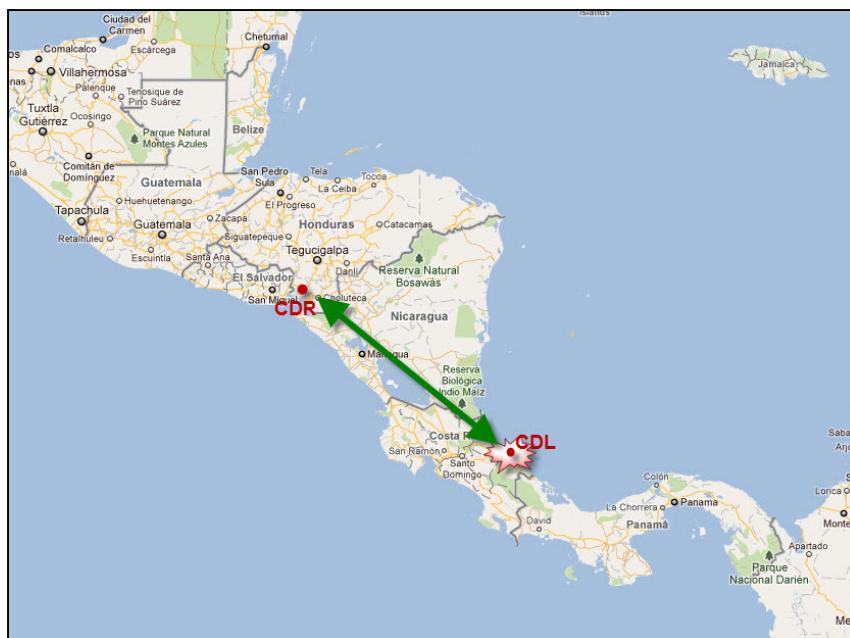


Figure 2-6 : Illustration de la phase 5

Les données d'entrée et de sortie des différentes phases du modèle, ainsi que leur utilisation dans les phases suivantes sont illustrées par la figure ci-dessous (Figure 10). On note que les données de sortie de la phase 1 font partie des données d'entrée des phases 2 et 5, et que les données de sortie des phases 3 et 4 font partie des données d'entrée de la phase 5.

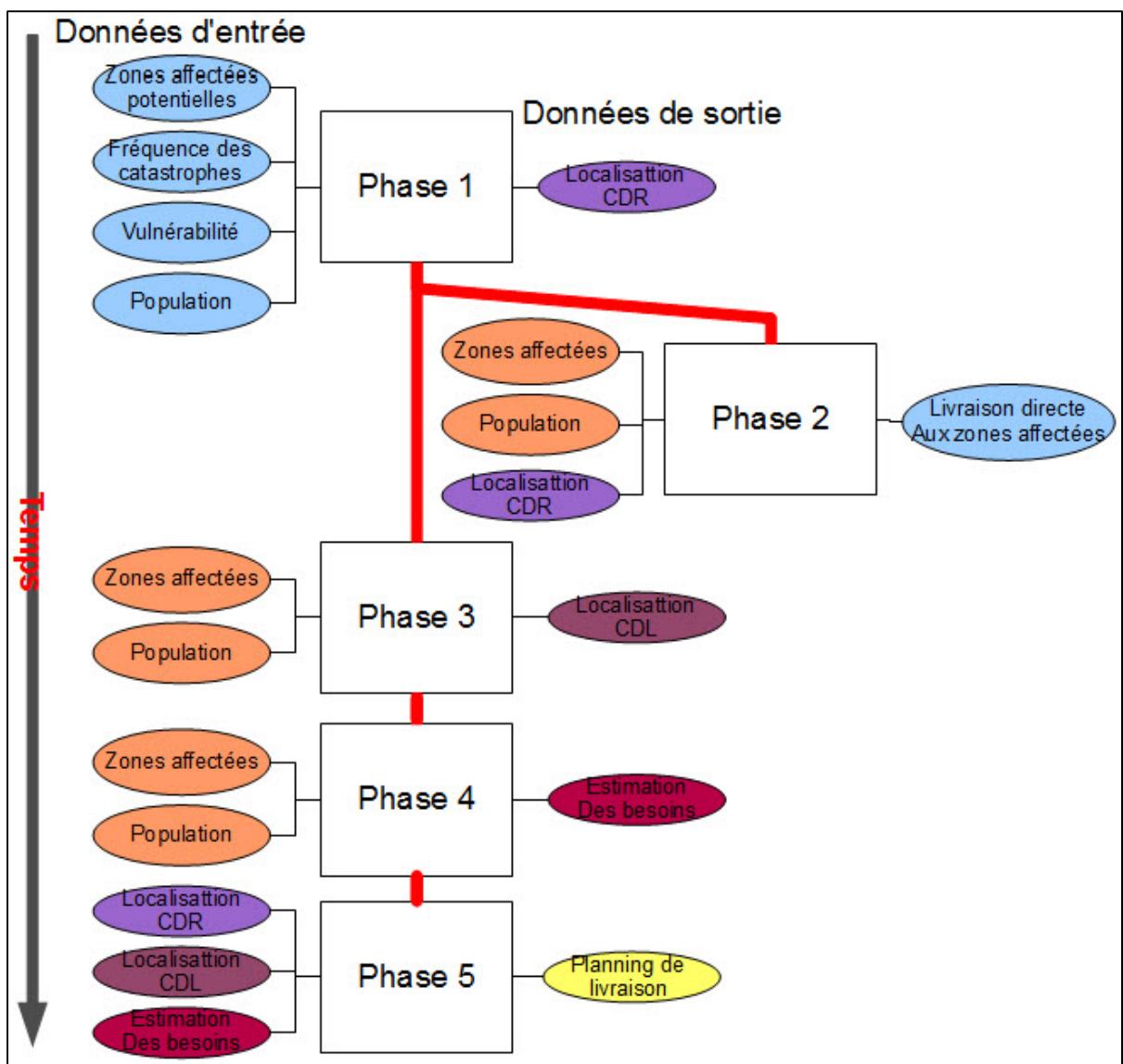


Figure 2-7 : Enchaînement des phases et des données

## 2.2 Définition de la catastrophe naturelle

On choisit de se référer aux critères de la base de données EM-DAT (EMergency DATabase) du Centre of Research on the Epidemiology of Disaster (CRED) pour différencier les différents types de catastrophe naturelle. On a ainsi la classification suivante :

Désastres de nature géophysique :

- Séismes
- Volcans
- Glissement de terrain

Désastres de nature météorologique :

- Cyclones

Désastres de nature hydrologique :

- Inondations

Certaines de ces causes peuvent être liées dans des catastrophes de nature plus complexes (Tsunami engendré par un volcan, ou inondation provoqué par un cyclone), on les considérera tout de même comme des catastrophes séparées de façon à simplifier l'analyse.

## 2.3 Problèmes liés à la notion de vulnérabilité

Nous avons d'abord cherché à évaluer la vulnérabilité des différentes zones de chaque région, de façon à pouvoir déterminer un facteur de sensibilité défini par le modèle de la phase 1, qu'on aurait multiplié par la fréquence de la catastrophe concernée, obtenant un indicateur de vulnérabilité de la zone à chaque type de catastrophe. Il s'est avéré qu'il n'existe pas d'étude donnant le facteur de sensibilité sous cette forme explicitement. De même, il n'existe pas de chiffres cohérents à grande échelle et sur l'ensemble des types de catastrophe pouvant être utilisé pour déterminer un facteur de vulnérabilité. Les études et les chiffres que nous avons

trouvé concernent souvent seulement un pays ou une région du monde, et chacun à sa propre définition et sa propre méthodologie, ce qui empêche de les utiliser conjointement. Nous avons donc décidé d'utiliser les données des années passées, supposant que la répartition et les impacts des catastrophes naturelles avaient toutes les chances d'être les mêmes à l'avenir, comme l'indique Alcantara-Ayala (2002).

## 2.4 Vérification des hypothèses de travail

Avant de commencer le calcul des emplacements, nous avons voulu nous assurer que les catastrophes se répartissaient de façon régulière dans les régions concernées, sans présenter de facteurs qui aurait pu nous empêcher d'utiliser les données des événements passés pour prévoir raisonnablement les probabilités d'événements futurs. Ces facteurs auraient pu être une importante périodicité ou une tendance changeant la répartition des dommages dans la région. Nous avons donc recherché dans les données toute tendance forte pouvant permettre de prédire l'évolution de la position du dépôt, par exemple, un pays prenant une importance de plus en plus grande dans le décompte des victimes. On a donc observé la répartition géographique des catastrophes et son évolution dans le temps.

Pour cela, on a eu recours pour cela aux données du CRED, EM-DAT. Les événements sont recensés suivant un certain nombre de critères, les événements devant dépasser 10 morts ou 100 personnes affectées, nécessiter l'état d'urgence ou une assistance internationale.

Pour cette étude, nous avons décidé de vérifier la régularité des répartitions sur deux (2) ensembles géographiques : L'Amérique Centrale et les Antilles, et sur la période comprise entre 1980 et 2010. Le choix de ces deux zones est dû à leur présence sur le passage des ouragans de l'Océan Atlantique, et de l'attention régulière qu'elles reçoivent sur un plan humanitaire. De plus, la taille de ces pays permet de considérer chaque pays comme un point logistique, l'ensemble du pays pouvant être atteint en une journée de transport.

Le choix de la période est dû au problème de fiabilité des données. Plus on remonte dans le temps, plus les données sont sujettes à caution. De plus, le problème de l'évolution démographique des pays concernés imposent de ne pas revenir trop loin en arrière. Une

période de 30 ans apparaît suffisante pour tenir compte des différences annuelles et pouvoir vérifier la régularité des catastrophes naturelles dans les deux (2) zones.

Nous avons donc demandé au CRED de fournir une extraction de leur base de données concernant l'Amérique Centrale et les Antilles entre 1980 et 2010, comprenant la date, le lieu, la nature des catastrophes survenues, ainsi que le nombre de morts, blessés, sans-abris, personnes concernées et le montant des dégâts subis. Le séisme qui a touché Haïti le 12 Janvier 2010 a été supprimé de certaines statistiques pour des raisons de visibilité dans les graphiques.

Nous cherchons donc à vérifier l'absence de tendance évolutive dans la répartition des catastrophes naturelles, de façon à ce que le modèle de la phase 1 soit valide sans nécessiter une prédition de la future répartition des catastrophe, qui rendrait caduque l'installation d'un Centre de Distribution Régional.

## **2.5        Données pour la phase 1**

Pour la phase 1, nous avons utilisé les mêmes données du CRED que pour la partie précédente, en nous basant sur les hypothèses vérifiées précédemment.

On doit ensuite quantifier les besoins logistiques de chaque catégorie de personnes, de façon à pondérer l'importance de chaque pays dans le réseau de transport.

## **2.6        Données pour la phase 2**

Étant donné qu'il n'a pas été développé de modèle mathématique pour la phase 2, étant donné le grand nombre de travaux déjà existants sur le sujet, la collecte de données de façon à vérifier son fonctionnement n'est pas nécessaire.

## **2.7        Données pour la phase 3**

Les données utilisées pour la phase 3 sont issues des premiers rapports publiés sur [www.reliefweb.int](http://www.reliefweb.int) après la date de la catastrophe, de façon à se conformer aux conditions prévues d'utilisation du modèle.

ReliefWeb est un site Web permettant de centraliser les informations recueillies par les différents intervenants dans un contexte de crise humanitaire, qu'il s'agisse des organismes internationaux, des agences gouvernementales ou des organisations non gouvernementales.

Pour le séisme en Haïti, il s'agit d'une carte des zones affectées publiée par le Global Disaster Alert and Coordination System le 12 Janvier 2010 Reliefweb (2010a).

Pour les inondations du Pakistan, il s'agit d'une carte des districts du Khyber Pakhtunkhwa affectés par les inondations publiée par l'OCHA le 30 Juillet Reliefweb (2010b).

## **2.8        Données pour la phase 4**

Les données de la phase 4 ont été trouvées sur différents sites Web, notamment de fournisseurs de matériel pour les ONG de secours lorsqu'il a été impossible d'obtenir une source unique. Les données concernant les kits médicaux et traumatologiques sont par contre issus des fiches descriptives du site de l'Organisation Mondiale de la Santé.

## **2.9        Comparaison des résultats**

Nous utilisons alors le modèle pour calculer une solution. Pour des raisons de simplicité de manipulation des données, les calculs ont en réalité été effectués dans un tableur et non avec LINGO, donc ils n'utilisent pas exactement le programme décrit en annexe. Toutefois, le programme LINGO présenté est fonctionnel, et la façon de fonctionner du modèle décrit a été respecté. Le modèle mathématique préconise de considérer la distance parcourue pour chaque centre de distribution, et de choisir l'emplacement optimal du ou des centres de distribution pour la minimiser. Ce calcul nécessite de recenser tous les entrepôts potentiels, toutes les zones touchées, puis d'établir une matrice de distance entre tous ces points.

Dans l'application pratique, nous avons calculé le centre de gravité de toutes les zones potentiellement affectées de la région considérée dans la phase 1, puis considérer que le dépôt potentiel le plus proche serait forcément le dépôt minimisant la distance parcourue. Dans la phase 2, nous avons procédé de la même façon avec les zones effectivement affectées. Cette méthode est nettement plus rapide puisqu'elle ne nécessite pas le recensement des entrepôts potentiels ou l'établissement d'une matrice de distance des zones touchées.

Cette présentation de la structure du modèle et de son fonctionnement, ainsi que de la façon dont nous allons procéder permet de mieux comprendre le reste du travail effectué.

Cette méthodologie a été inspirée par la constatation qu'il existe un grand nombre de travaux décrivant chaque partie de la gestion de l'urgence, mais très peu décrivant la continuité du processus. Cela ayant pour conséquence que la fin d'une étape ne prépare absolument pas le début de l'étape suivante, et peut même faire que certains processus peuvent se gêner, diminuant l'efficacité globale de l'aide apportée. On a donc cherché à lier la prévention et la réponse aux catastrophes naturelles et le rétablissement de la situation normale, de façon à préparer une coopération entre les différents processus. Les différents modèles sont présentés dans la partie suivante puis les résultats trouvés, premièrement concernant la vérification des hypothèses de travail, puis l'utilisation du modèle lui-même.

## CHAPITRE 3

### MODÈLES MATHÉMATIQUES

#### 3.1 Phase 1 : Choix de l'emplacement du Centre de Distribution Régional

La phase 1 calcule le positionnement du Centre de Distribution Régional (CDR), de façon à pouvoir porter des secours dans toute la région concernée. On souhaite pour cela disposer de ressources stockées de façon permanente au plus près de la zone potentiellement touchée. On doit donc évaluer les probabilités de réalisation d'une catastrophe dans une région du monde, et déterminer où est l'endroit le plus adapté à recevoir un CDR. Les paramètres considérés pour ce modèle sont :

- Localisation géographique.
- Nombre d'habitants.
- Degré de vulnérabilité de la zone à une catastrophe (solidité des constructions, redondances des infrastructures, relief, etc...).
- Fréquence des différentes catastrophes.

On identifie ensuite l'emplacement du centre de secours en déterminant le barycentre des zones potentiellement affectée, pondérés par le degré de gravité d'une catastrophe survenant dans cette zone.

Les contraintes présentes dans ce cas sont les suivantes :

- Le nombre de CDR est limité, faute de quoi le concept perd son intérêt propre.
- Une zone n'est servie que par un seul CDR.
- Un CDR ne peut être affecté à une zone que s'il est ouvert.

### 3.1.1 Modèle mathématique

*Ensembles :*

$A$  : Ensemble des zones affectées potentielles

$C$  : Ensemble des types de catastrophes possibles

$P$  : Ensemble des localisations possibles pour le Centre de Distribution Régional

*Indices :*

$a$  : Zone affectée

$c$  : Type de catastrophe

$p$  : Localisation possible

*Paramètres :*

$d_{ap}$  : Distance entre la zone  $a \in A$  et la localisation  $p \in P$

$h_a$  : Nombre d'habitants de la zone  $a \in A$

$v_{ac}$  : Vulnérabilité de la zone  $a \in A$  au type de catastrophe  $c \in C$

$f_{ac}$  : Fréquence de la catastrophe  $c \in C$  sur la zone  $a \in A$

$n$  : Nombre de CDR ouverts

*Variables de décision :*

$Y_p$  : Ouverture d'un CDR à la localisation  $p \in P$

$X_{ap}$  : Affectation du CDR de la localisation  $p \in P$  à la zone  $a \in A$

*Fonction-objectif :*

$$\text{Minimise } Z^1 = \sum_{a \in A} \sum_{p \in P} d_{ap} h_a X_{ap} \sum_{c \in C} (f_{ac} v_{ac}) \quad (1)$$

*Contraintes :*

$$\sum_{p \in P} X_{ap} = 1 \quad \forall a \in A \quad (2)$$

$$X_{ap} \leq Y_p \quad \forall a \in A, \forall p \in P \quad (3)$$

$$\sum_{p \in P} Y_p \leq n \quad (4)$$

$$Y_p \geq 0; \text{entiers} \quad \forall p \in P \quad (5)$$

$$X_{ap} \in \{0;1\} \quad \forall a \in A, \forall p \in P \quad (6)$$

La fonction-objectif (1) minimise la distance  $Z^1$  de la zone affectée potentielle au CDR auquel elle est affectée, pondérée par le nombre d'habitants, ainsi que par la fréquence et la vulnérabilité de la zone aux catastrophes.

La contrainte (2) assure que chaque zone ne soit affectée qu'à un seul CDR. La contrainte (3) stipule qu'un CDR ne peut être affecté à une zone que s'il est ouvert. La contrainte (4) limite le nombre de CDR à  $n$ . Les contraintes (5) et (6) sont les contraintes de non-négativité et d'intégrité du modèle.

Le programme LINGO de la phase 1 est disponible en Annexe I.

### 3.1.2 Vulnérabilité d'une zone

Le calcul d'un barycentre géométrique n'est pas la difficulté principale de ce modèle.

Il est plus intéressant de se pencher sur la façon de déterminer le paramètre  $v_{ac}$ .

Le degré de vulnérabilité à une catastrophe doit être défini en fonction de différents critères, et est propre à chaque catastrophe (voir la section 2.2, Définition de la catastrophe naturelle, à la page 33).

### 3.1.3 Proposition de calcul de la vulnérabilité

Nous proposons une façon de calculer la vulnérabilité qui pourrait convenir.

Les critères de vulnérabilité aux catastrophes sont, d'après Pielke, Rubiera *et al.* (2003), Okada et Takai (1999), Chang, Tseng *et al.* (2007) et Ukkusuri et Yushimoto (2008), les suivants :

- Population
- Solidité des structures
- Relief du terrain
- Taille du réseau de transport
- Résilience du réseau de transport
- Réserves de ressources

Nous noterons chaque critère par une note de 0 à 5 (par exemple : 0 ⇒ une tempête n'a aucun effet sur les structures ; 5 ⇒ une tempête rasera toutes les structures) et la vulnérabilité globale à une tempête sera notée sur un total de points en consolidant les notes aux différents critères en additionnant, pour chaque catastrophe, tous les critères.

Un tel critère nécessite une étude détaillée de la situation réelle dans chaque région, qui doit également être récente. La population peut se déplacer rapidement, et le développement économique d'une zone peut entraîner un changement du type de construction présent.

Pour respecter le fait réel que toutes les catastrophes ne sont pas de la même amplitude, on considérera pour les critères la gravité moyenne de chaque type de catastrophe, lorsqu'elle survient dans la région concernée. De même, pour réduire la subjectivité de telles mesures, l'appréciation des différents critères pourrait faire l'objet d'une norme fixée par un organisme centralisateur, tel que l'Organisation Mondiale de la Santé.

### **3.2 Phase 2 : Transport direct depuis le Centre de Distribution Régional**

Pour la phase 2, il est nécessaire d'agir vite, et avec les moyens disponibles. Un grand nombre d'auteurs ont déjà écrits sur le sujet. Un des modèles les mieux adaptés à cette phase est proposé par Yi et Özdamar (2007a).

Ce modèle est défini comme un modèle de réseau à multi-commodités (modèle linéaire en nombres mixtes) utilisant les véhicules comme des flux de commodités plutôt que des variables binaires. Les véhicules ne sont alors plus considérés individuellement mais comme une capacité de transport globale. Ce fonctionnement permet d'économiser beaucoup de calcul par comparaison aux programmes de routage de véhicules qui doivent prendre en compte le trajet de chaque véhicule. Il est composé de deux (2) parties. La première partie permet de répartir les ressources de transport en fonction des différents besoins, en visant à minimiser la demande insatisfaite aux points de demandes, tant en matériel médical qu'en blessés non secourus. La deuxième partie est un algorithme calculant le trajet de chaque véhicule et les instructions de chargement/déchargement à chaque nœud en fonction des résultats de la première partie. C'est ici que les flux de transports sont traduits en trajets individuels pour chaque véhicule.

Les différentes catégories de ressources et les différents blessés appartiennent à des classes de priorité, ce qui permet d'optimiser encore l'utilité des ressources transportées.

Ce modèle est destiné à être utilisé dans la première phase de la catastrophe, donc avant que des postes de secours avancés ne soient installés, et il a été programmé pour répondre aux besoins les plus urgents que sont les urgences médicales. Il nous semble donc convenir particulièrement bien au but recherché dans la phase 2, qui est de combler les besoins les plus urgents, durant l'installation du Centre de Distribution Local et du début de l'acheminement des commodités. Nous pourrons supprimer la partie du modèle concernant l'évacuation des blessés, thème qui n'est pas approché ici.

### 3.3        **Phase 3 : Choix de l'emplacement du Centre de Distribution Local**

La phase 3 se situe après la catastrophe, dans les heures suivant l'évènement. Elle consiste à déterminer la localisation optimale du Centre de Distribution Local (CDL), de façon à stocker les ressources au plus près de la zone touchée, et à disposer d'un bon emplacement pour un centre de traitement logistique avancé.

Il s'agit du même type de modèle que pour la phase 1, mais sans faire intervenir de probabilité de catastrophe ou de critère de vulnérabilité sur la zone concernée car il tient compte d'une situation réelle, lorsque l'évènement est survenu.

Les paramètres considérés pour ce modèle sont :

- Localisation géographique
- Nombres de sinistrés
- Nombre de Centres de distributions

Les contraintes présentes dans ce cas sont les suivantes :

- Le nombre de CDL est limité, faute de quoi le concept perd son intérêt propre.
- Une zone n'est servie que par un seul CDL.
- Un CDL ne peut être affecté à une zone que s'il est ouvert.

On identifie ensuite l'emplacement du centre de secours en déterminant le barycentre des zones touchées par la catastrophe, pondérés par le nombre de victimes dans chaque zone.

#### 3.3.1      **Modèle mathématique**

*Ensembles :*

$A$  : Ensemble des zones affectées

$P$  : Ensemble des localisations possibles pour le Centre de Distribution Local

*Indices :*

$a$  : Zone affectée

$p$  : Localisation possible

*Paramètres :*

$d_{ap}$  : Distance entre la zone  $a \in A$  et la localisation  $p \in P$

$h_a$  : Nombre de sinistrés de la zone  $a \in A$

$n$  : nombre de CDL ouverts

*Variables de décision :*

$Y_p$  : Ouverture d'un CDL à la localisation  $p \in P$

$X_{ap}$  : Affectation du CDL de la localisation  $p \in P$  à la zone  $a \in A$

*Fonction-objectif :*

$$\text{Minimiser } Z^3 = \sum_{a \in A} \sum_{p \in P} d_{ap} h_a X_{ap} \quad (7)$$

*Contraintes :*

$$\sum_{p \in P} X_{ap} = 1 \quad \forall a \in A \quad (8)$$

$$X_{ap} \leq Y_p \quad \forall a \in A, \forall p \in P \quad (9)$$

$$\sum_{p \in P} Y_p \leq n \quad (10)$$

$$Y_p \geq 0; \text{entiers} \quad \forall p \in P \quad (11)$$

$$X_{ap} \in \{0;1\} \quad \forall a \in A, \forall p \in P \quad (12)$$

La fonction-objectif (7) minimise la distance  $Z^3$  de la zone affectée au CDL auquel elle est affectée, pondérée par le nombre d'habitants.

La contrainte (8) assure que chaque zone ne soit affectée qu'à un seul CDL. La contrainte (9) stipule qu'un CDL ne peut être affecté à une zone que s'il est ouvert. La contrainte (10) limite le nombre de CDL à  $n$ . Les contraintes (11) et (12) sont les contraintes d'intégrité et de non-négativité du modèle.

Le programme LINGO de cette phase est disponible en Annexe II.

Un deuxième modèle possible est de minimiser le nombre de CDL installés, tout en imposant une distance maximale entre les zones affectées et les CDL. Cette option peut être utile pour les catastrophes touchant une étendue importante.

Un nouveau paramètre doit être introduit dans ce cas, soit  $r$  la distance maximale autorisée

*Fonction-objectif :*

$$\text{Minimiser } Z^3 = \sum_{p \in P} Y_p \quad (13)$$

*Contraintes :*

$$\sum_{p \in P} X_{ap} = 1 \quad \forall a \in A \quad (14)$$

$$X_{ap} \leq Y_p \quad \forall a \in A, \forall p \in P \quad (15)$$

$$d_{ap} \cdot X_{ap} \leq r \quad \forall a \in A, \forall p \in P \quad (16)$$

$$Y_p \geq 0; \text{entiers} \quad \forall p \in P \quad (17)$$

$$X_{ap} \in \{0;1\} \quad \forall a \in A, \forall p \in P \quad (18)$$

La fonction-objectif (13) minimise  $Z^3$ , le nombre de CDL ouverts

La contrainte (14) assure que chaque zone ne soit affectée qu'à un seul CDL. La contrainte (15) stipule qu'un CDL ne peut être affecté à une zone que s'il est ouvert. La contrainte (16)

assure qu'aucune zone n'est à une distance supérieure à  $r$  d'un CDR. Les contraintes (17) et (18) sont les contraintes d'intégrité et de non-négativité du modèle.

### **3.3.2 Adaptation à la situation réelle**

En choisissant l'emplacement, on doit aussi prendre en compte les possibilités d'accès au CDL, car ci celui-ci est situé dans un endroit inatteignable, il ne présente aucun intérêt. Pour cela, on ne considérera comme emplacements potentiels que les endroits permettant d'établir rapidement une base logistique, par exemple, les aéroports, ports, ou les nœuds ferroviaires ou routiers.

## **3.4 Phase 4 : Évaluation des besoins**

Cette phase consiste à faire un état des lieux des ressources disponibles sur place, des besoins des sinistrés, de façon à pouvoir planifier les besoins de livraisons pour le CDL. Il ne s'agit pas d'une phase d'optimisation mais de formules permettant d'établir les besoins journaliers de la zone sinistrée. Les ressources disponibles sur place doivent être connues ou estimées, ainsi que le nombre de personnes nécessitant ces ressources. Ces besoins de livraison seront utilisés dans la phase 5 pour planifier les transports du CDR vers le CDL.

### **3.4.1 Paramètres**

Les paramètres pour les deux (2) catégories sont le nombre de sinistrés et le stock disponible. Les paramètres spécifiques sont le taux de remplacement par jour pour les équipements, ainsi que la quantité consommée par jour pour les ressources.

Ressource :

- Plasma sanguin et équipement traumatologique
- Eau potable

- Nourriture
- Antibiotiques

Équipement :

- Abri, couvertures
- Reconstruction
- Eau potable (unité de traitement)

### 3.4.2 Formulation mathématique

La formulation est différente pour les ressources consommables et les équipements.

#### 3.4.2.1 Consommation

*Ensembles :*

$P$  : Ensemble des ressources

$J$  : Ensemble des jours

*Paramètres :*

$x$  : Nombre de sinistrés

$q$  : Quantité consommée par jour et par personne

$s$  : Stock disponible au CDL

$d$  : Quantité demandée par jour

$q_p$  : Quantité consommée par jour et par personne de la ressource  $p \in P$

$s_{pj}$  : Stock disponible au CDL de la ressource  $p \in P$  au jour  $j \in J$

*Variables de décision :*

$D_{pj}$  : Quantité demandée de la ressource  $p \in P$  au jour  $j \in J$

La fonction de calcul de la demande est :

$$D_{pj} = x \cdot q_p \quad \forall p \in P, \forall j \in J \quad (19)$$

On obtient ainsi la quantité journalière nécessaire de chaque ressource.

On soustrait alors la quantité présente dans les stocks de la demande du premier jour, du deuxième, etc.

$$D_{pj} = x \cdot q_p - s_{pj} \quad \forall p \in P, \forall j \in J \quad (20)$$

### 3.4.2.2      Equipment

*Ensembles :*

$E$  : Ensemble des équipements

$J$  : Ensemble des jours

*Paramètres :*

$x$  : Nombre de sinistrés

$r$  : Taux de remplacement d'un équipement

$s$  : Stock disponible au CDL

$d$  : Quantité demandée par jour

$r_e$  : Taux de remplacement de l'équipement  $e \in E$

$s_{ej}$  : Stock disponible au CDL de l'équipement  $e \in E$  au jour  $j \in J$

*Variables de décision :*

$D_{ej}$  : Quantité demandée de l'équipement  $e \in E$  au jour  $j \in J$

La fonction de calcul est :

$$D_{ej} = x \cdot (1 + r_e) - s_{ej} \quad \forall p \in P, \forall j \in J \quad (21)$$

On obtient ainsi la quantité journalière nécessaire de chaque équipement.

Le taux de remplacement est bien sur nettement inférieur à la consommation d'une ressource.

### **3.5        Phase 5 : Approvisionnement entre le Centre de Distribution Régional et le Centre de Distribution Local**

Cette phase consiste à planifier l'approvisionnement régulier du CDL à partir du CDR au cours des secours et de la phase de retour à la normale.

On s'oriente vers la programmation en réseau, en utilisant les périodes et moyens de transport pour déterminer les capacités d'offre, et les périodes et les ressources pour définir les demandes.

On construit un réseau du type « entrepôts – clients », où les deux (2) séries de nœuds correspondent chacune à deux (2) données : (période , moyen de transport) et (période , type de ressource).

La livraison à une période antérieure au départ est interdite par un coût important dans la matrice des coûts de transports.

#### **3.5.1      Modèle mathématique**

*Ensembles :*

$T$  : Ensemble des périodes concernées

$P$  : Ensemble des moyens de transports disponibles

$R$  : Ensemble des types de ressources

*Indices :*

$t$  : Période

$p$  : Moyen de transport

$r$  : Ressource

*Paramètres :*

$c_{pt}$  : Capacité d'un moyen de transport  $p \in P$  durant une période  $t \in T$

$b_{tr}$  : Besoin d'une ressource  $r \in R$  durant une période  $t \in T$

$a_{tt'pr}$  : Cout de transport de la ressource  $r \in R$  par le moyen de transport  $p \in P$  entre les périodes  $t \in T$  et  $t' \in T$

$g_{pt}$  : Taille des lots d'un moyen de transport  $p \in P$  durant une période  $t \in T$

$ne_{pt}$  : Nombre de lots entiers d'un moyen de transport  $p \in P$  durant une période  $t \in T$

$d_{pt}$  : Présence d'un lot partiel d'un moyen de transport  $p \in P$  durant une période  $t \in T$

$dk_{pt}$  : Nombre d'unités d'un lot partiel d'un moyen de transport  $p \in P$  durant une période  $t \in T$

$k_{pt}$  : Nombre d'unités expédiées d'un moyen de transport  $p \in P$  durant une période  $t \in T$

$al_{pt}$  : Coût d'expédition d'un lot par moyen de transport  $p \in P$  durant une période  $t \in T$

*Variables de décision :*

$S_{tr}$  : Stock d'une ressource  $r \in R$  durant une période  $t \in T$

$Q_{tt'pr}$  : Quantité de la ressource  $r \in R$  transportée par le moyen de transport  $p \in P$  entre les périodes  $t \in T$  et  $t' \in T$

$Nt_{pt}$  : Nombre de lots total d'un moyen de transport  $p \in P$  durant une période  $t \in T$

*Fonction-objectif :*

$$\text{Minimiser } Z^5 = \sum_{t \in T} \sum_{t' \in T} \sum_{p \in P} \sum_{r \in R} Q_{tt'pr} \cdot a_{tt'pr} + \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} Nt_{pt} \cdot al_{pt} \quad (22)$$

*Contraintes :*

Calcul du stock :

$$\sum_{p \in P} \sum_{t \in T} Q_{tt'pr} - b_{t'r} = S_{t'r} \quad \forall t' \in T, \forall r \in R \quad (23)$$

Respect des capacités :

$$\sum_{p \in P} \sum_{r \in R} Q_{tt'pr} \leq c_{pt} \quad \forall t, t' \in T \quad (24)$$

Interdiction du stock négatif :

$$S_{tr} \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall r \in R \quad (25)$$

$$Q_{tt'pr} \geq 0 \quad \forall t \in T, \forall t' \in T, \forall p \in P, \forall r \in R \quad (26)$$

Définition du nombre d'unités transportées :

$$\sum_{t' \in T} \sum_{r \in R} Q_{tt'pr} = k_{pt} \quad \forall t \in T, \forall p \in P \quad (27)$$

Définition du nombre de lots :

$$k_{pt} = (g_{pt} \cdot ne_{pt}) + d_{pt} \quad \forall t \in T, \forall p \in P \quad (28)$$

Définition de la présence d'un lot partiel :

$$de_{pt} \leq g_{pt} \cdot d_{pt} \quad \forall t \in T, \forall p \in P \quad (29)$$

Calcul du nombre total de lots :

$$Nt_{pt} = ne_{pt} + d_{pt} \quad \forall t \in T, \forall p \in P \quad (30)$$

Contraintes d'intégrité et de non-négativité :

$$S_{tr}, Q_{tt'pr}, Nt_{pt} \geq 0 \quad \forall p \in P, \forall t \in T, \forall t' \in T, \forall r \in R \quad (31)$$

La fonction-objectif (22) minimise  $Z^5$ , le coût de transport des provisions entre le CDR et le CDL ainsi que le coût des lots envoyés.

La contrainte (23) explicite le stock de chaque ressource. La contrainte (24) limite la capacité de transport à la capacité des navires disponibles. La contrainte (25) interdit que le stock soit négatif et la contrainte (26) interdit le transport d'une quantité négative.

La contrainte (27) définit le nombre d'unités envoyées par période de départ et par moyen de transport. La contrainte (28) groupe ces unités en lots entiers, et définit un reste éventuel. La

contrainte (29) définit la variable binaire de présence d'un lot partiel. La contrainte (30) calcule le nombre total de lots et la contrainte (31) définit  $S_{tr}, Q_{tt'pr}, Nt_{pt}$  comme étant positifs et entiers.

Le programme LINGO de ce modèle est disponible en Annexe III.

Ces modèles sont simples et pourront être mis en œuvre par une organisation humanitaire sans l'aide d'un expert en programmation mathématique, ce qui facilite leur utilisation future. En cas de besoins plus spécifiques, il est possible de les améliorer en ajoutant des options supplémentaires, qui sont détaillés dans la partie « développements possibles » de la conclusion. Certaines de ces améliorations sont issues des articles présentés dans la revue de littérature, et fournissent d'excellentes réponses à des problèmes possibles. L'utilisation de données simples pour tester ces modèles est décrite dans la partie 5, et les résultats détaillés.



## **CHAPITRE 4**

### **VÉRIFICATION DES HYPOTHÈSES**

La phase 1 a pour objectif de déterminer l'emplacement idéal d'un Centre de Distribution Régional (CDR), installé de façon permanente, et destiné à fournir une région du monde.

Devant l'impossibilité d'utiliser les données de vulnérabilité, expliquée dans la partie précédente, on utilise les données de la base de données EM-DAT du CRED.

Ces données ont été utilisées pour vérifier s'il était possible de remplacer les statistiques de vulnérabilité inexistantes par une moyenne des dégâts des années précédentes.

On pourrait ainsi utiliser cette moyenne dans le modèle proposé pour la première phase, comme pondération des différents pays. Si on observe une tendance forte dans ces données, comme la prépondérance ou la relative absence d'un pays par rapport aux autres, il serait important de le prendre en compte. De même, une évolution dans le temps, par exemple un pays prenant de plus en plus d'importance, est à prendre en compte, en donnant un poids plus élevé au pays dont la proportion de dommages augmente.

Nous prenons comme hypothèse que toute tendance passée que l'on pourrait discerner dans les données des 30 dernières années se prolongerait dans l'avenir. Si cela était le cas, la méthodologie de localisation du CDR serait changée, en obligeant le modèle à prendre en compte une tendance évolutive. Il faudrait identifier et mesurer cette tendance avant de l'incorporer dans le modèle. De plus, si cette tendance était continue sur une longue période, la localisation du CDR ne serait valable que sur un intervalle de temps limité.

Le but est ici d'observer l'évolution dans le temps et la répartition géographique des dégâts dus aux catastrophes naturelles. On souhaite savoir si l'importance des dégâts a tendance à être plus importante dans certaines zones que dans d'autres, et si cette répartition est stable dans le temps étudié. Les dégâts seront mesurés par le nombre de morts, de blessés, de sans-abris, de personnes affectées, ainsi que par le montant des dommages économiques.

#### 4.1.1 Évolution dans le temps

On commence par observer l'évolution du total de toutes les zones pour les deux (2) régions concernées. Pour cela, on calcule le total annuel de chaque catégorie, puis la moyenne mobile sur 10 ans.

##### 4.1.1.1 Antilles

On constate pour les Antilles que la tendance du nombre de morts et de blessés est stable, malgré deux (2) événements majeurs en 2004 (une inondation et un ouragan à Haïti). Le nombre de sans-abri augmente puis diminue sur la période étudiée, on ne peut donc pas confirmer une tendance.

Par contre, le nombre de personnes affectées et le montant des dommages économiques sont en nettes augmentation, puisque le premier chiffre triple en trente ans, tandis que le second est multiplié par 7 sur la même période. Un document est présenté ici (Figure 11), et le reste est disponible en ANNEXE IV.

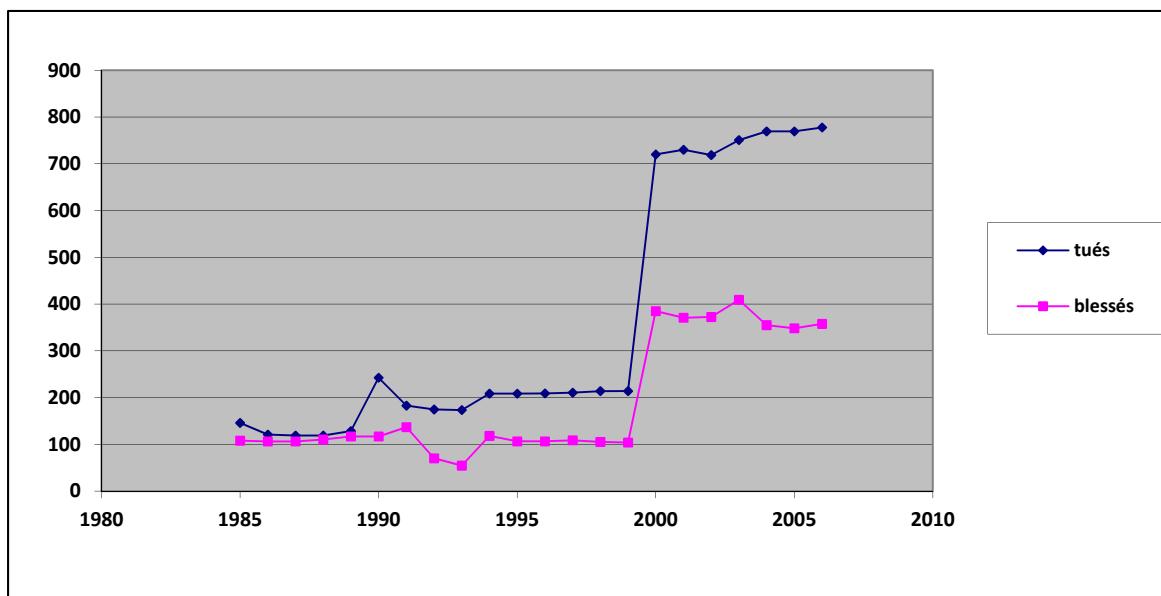


Figure 4-1 : Évolution du nombre de morts et de blessés aux Antilles

#### 4.1.1.2 Amérique Centrale

On constate pour l'Amérique Centrale une stabilité du nombre de morts et une forte diminution du nombre de blessés. Le nombre de sans-abri est stable lui aussi. Dans cette région aussi, le nombre de personnes affectées ainsi que la somme des dégâts économiques connaît une forte augmentation, le premier étant multiplié par 4 et le second par 3. Un document est présenté ici (Figure 12), et le reste est disponible en ANNEXE V.

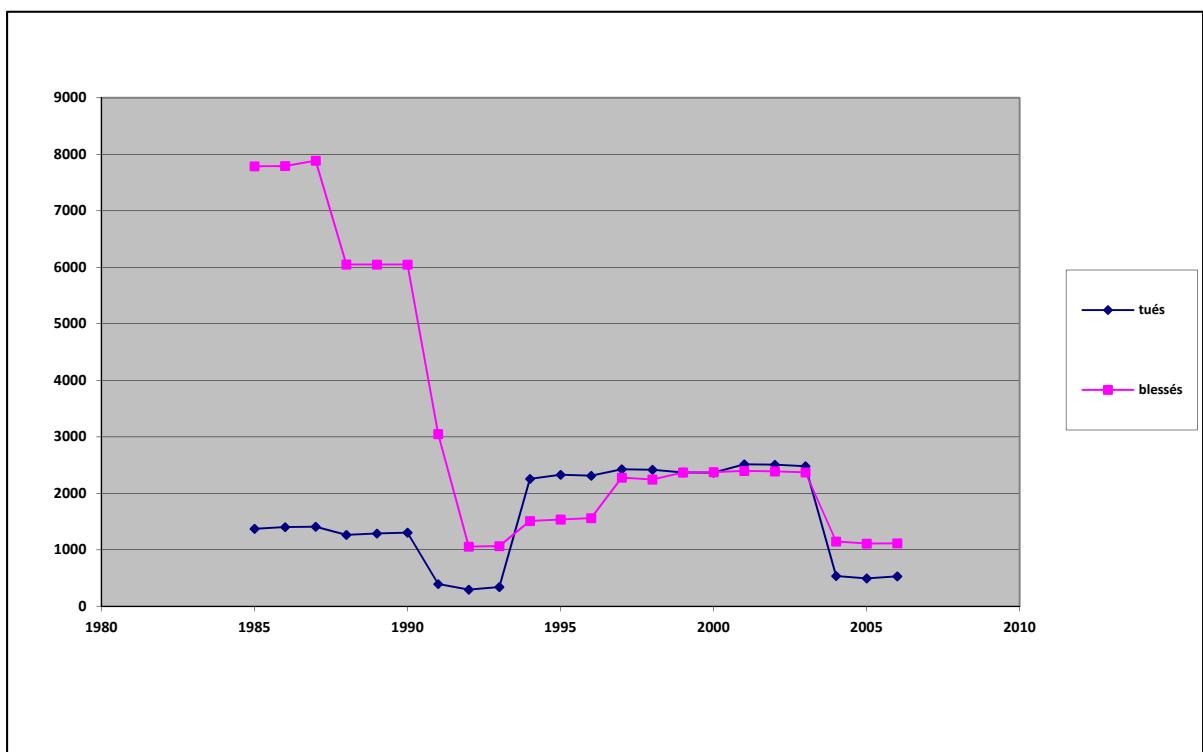


Figure 4-2 : Évolution du nombre de morts et de blessés en Amériques Centrale

Une fois cela vérifié, on cherche à connaître la répartition des ces dégâts entre les différents pays des régions concernées.

#### 4.1.2 Répartition géographique

On étudie en deuxième lieu la répartition géographique des dommages en observant la proportion représentée par chaque pays dans le total des dégâts de l'année. Pour plus de lisibilité, on utilise là aussi une moyenne mobile sur 10 ans. On comparera ces résultats avec la proportion de chaque pays dans la population totale de la région.

##### 4.1.2.1 Antilles

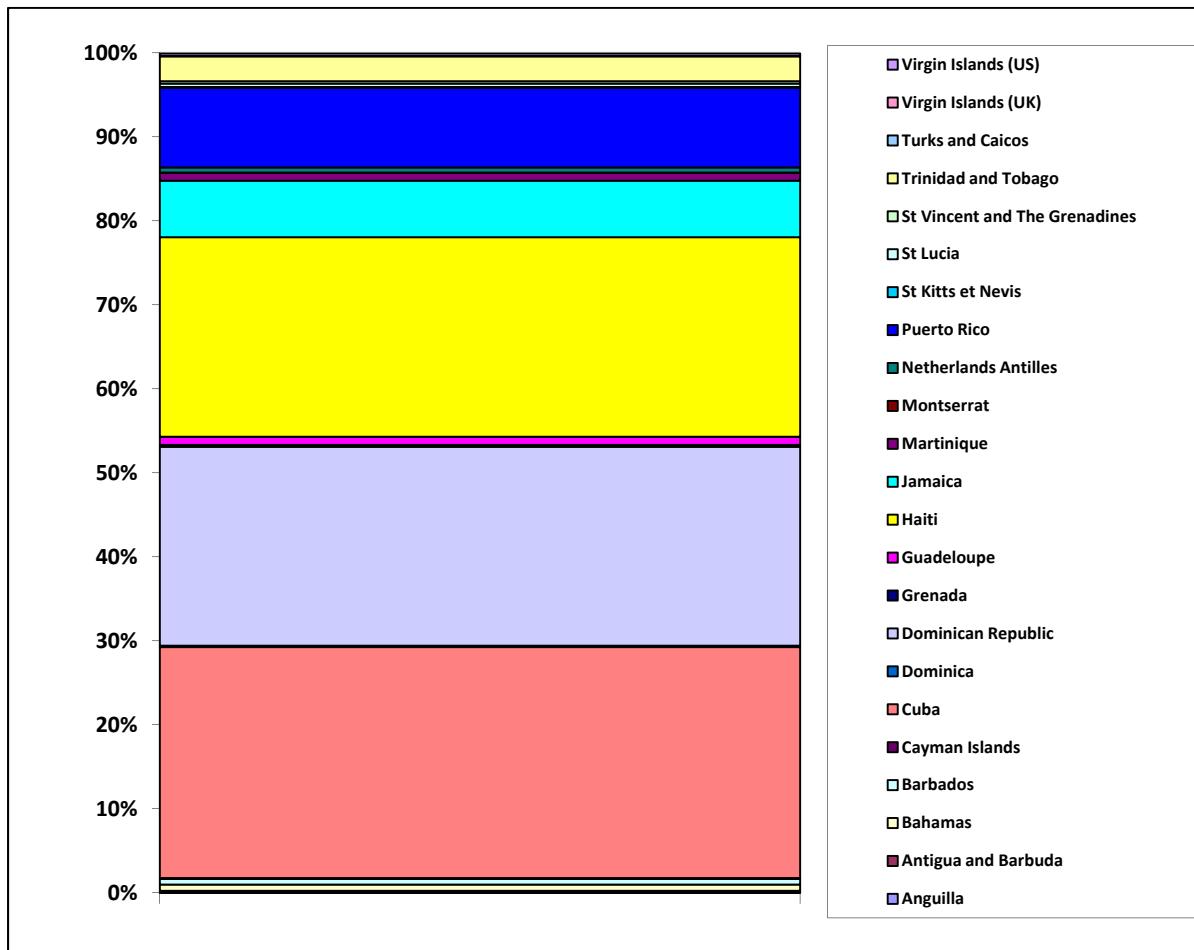


Figure 4-3 : Proportion de chaque pays dans la population totale des Antilles

Dans les Antilles, la répartition est très différente pour les différents types de dégâts. Les morts sont beaucoup plus nombreux à Haïti que dans le reste de la région comme on le voit à la Figure 14, les blessés également, malgré un événement en République Dominicaine en 1998. Les sans-abri ainsi que les personnes affectées sont quant à elles réparties entre Haïti, Cuba et la République Dominicaine. On constate enfin que la répartition des dommages économiques semblent relativement équitable entre les différents pays, et totalement indépendante de la taille du pays. La population relative de chaque pays (Figure 13) et le premier document sont présentés ici (Figure 14), et le reste est disponible en ANNEXE VI.

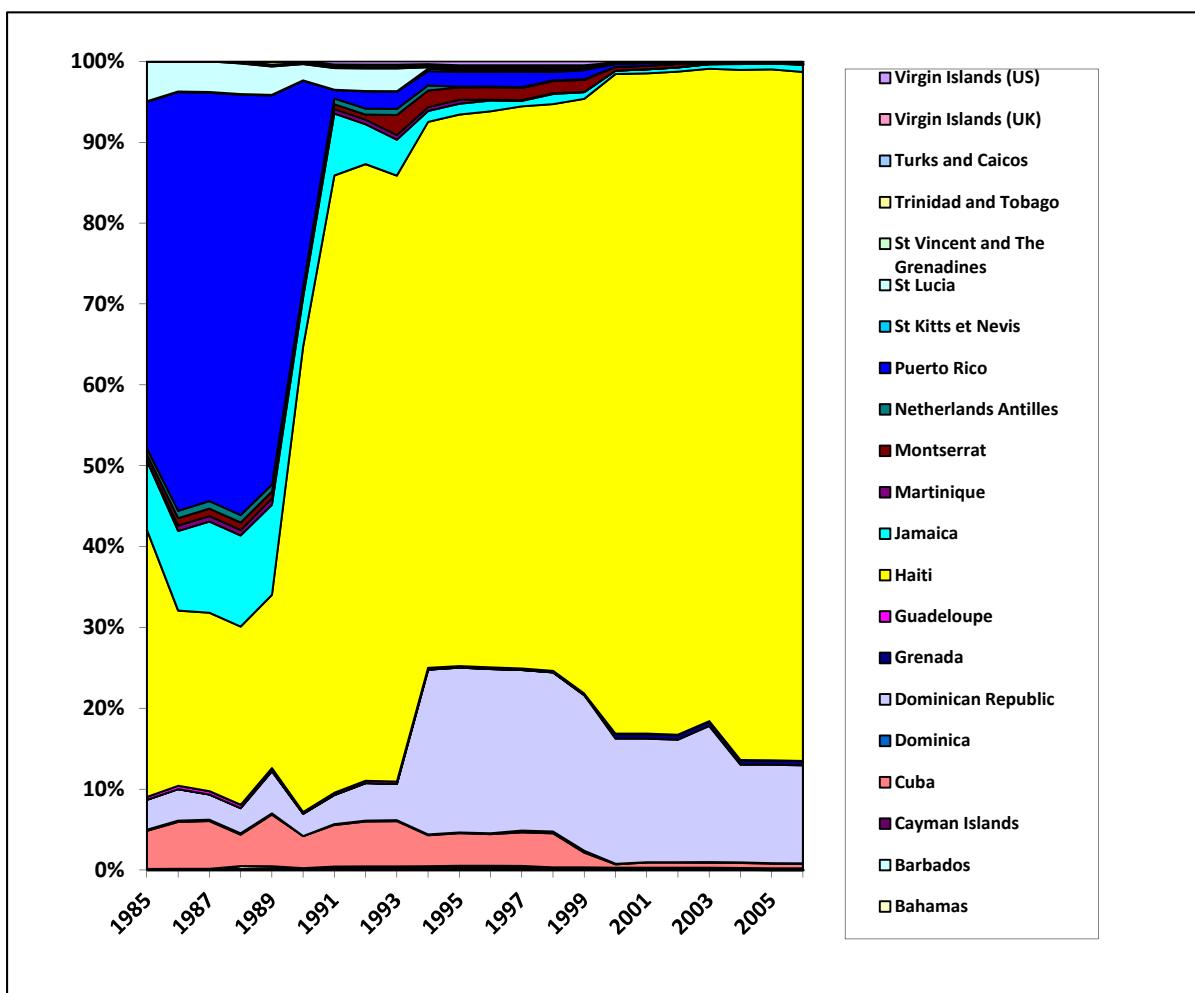


Figure 4-4 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des morts

#### 4.1.2.2 Amérique Centrale

En Amérique Centrale, on comparera également la répartition des dégâts constatés avec la proportion de chaque pays dans la population totale de la région. Les répartitions sont beaucoup plus irrégulières dans le temps, notamment pour le nombre de morts et de blessés. Les répartitions du nombre de personnes affectées et des dommages économiques semblent plus régulières. On peut constater que les différentes catégories semblent se corréler de façon plus prononcée entre elles, et que l'ensemble de ces dommages semblent proportionnels à la population du pays, à l'exception notable du Guatemala, qui semble beaucoup moins touché par les catastrophes naturelles que les autres pays. La population relative de chaque pays (Figure 15) et le premier document sont présentés ici (Figure 16), et le reste est disponible en ANNEXE VII.

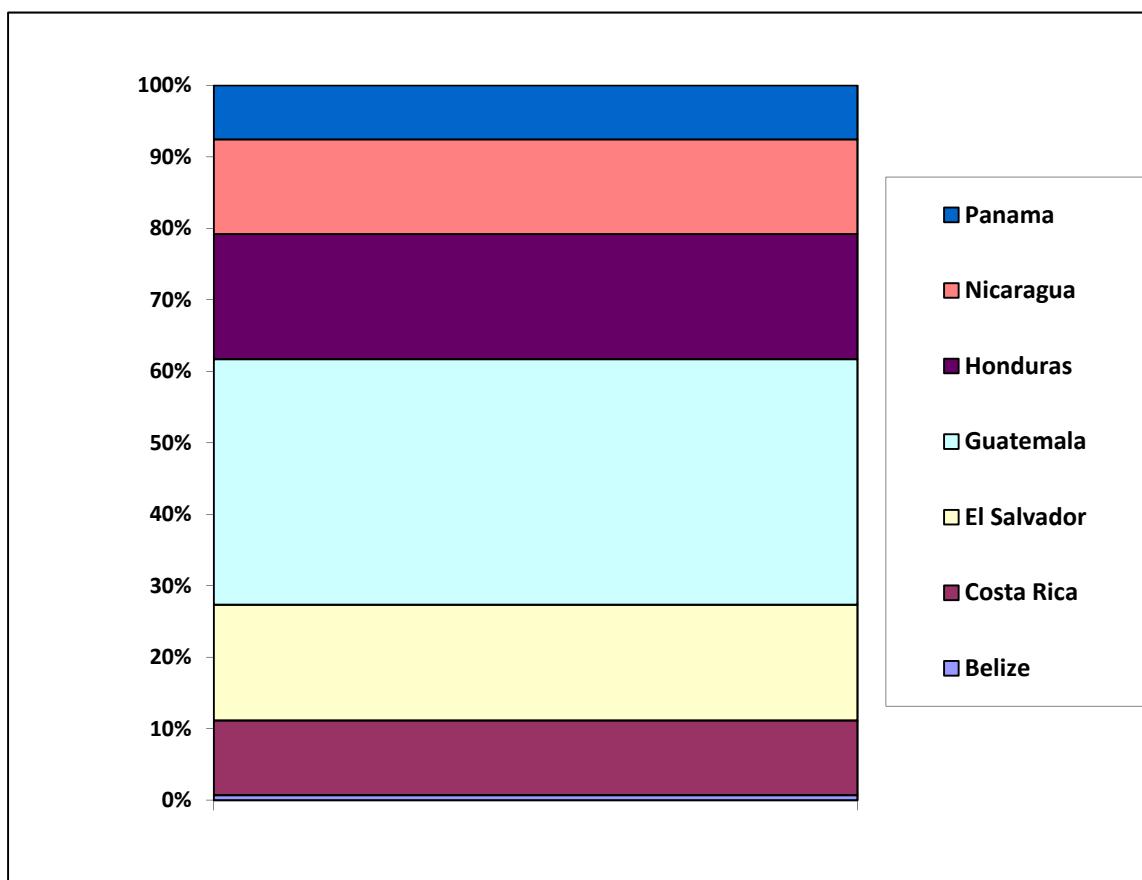


Figure 4-5 : Proportion de chaque pays dans la population totale de l'Amérique Centrale

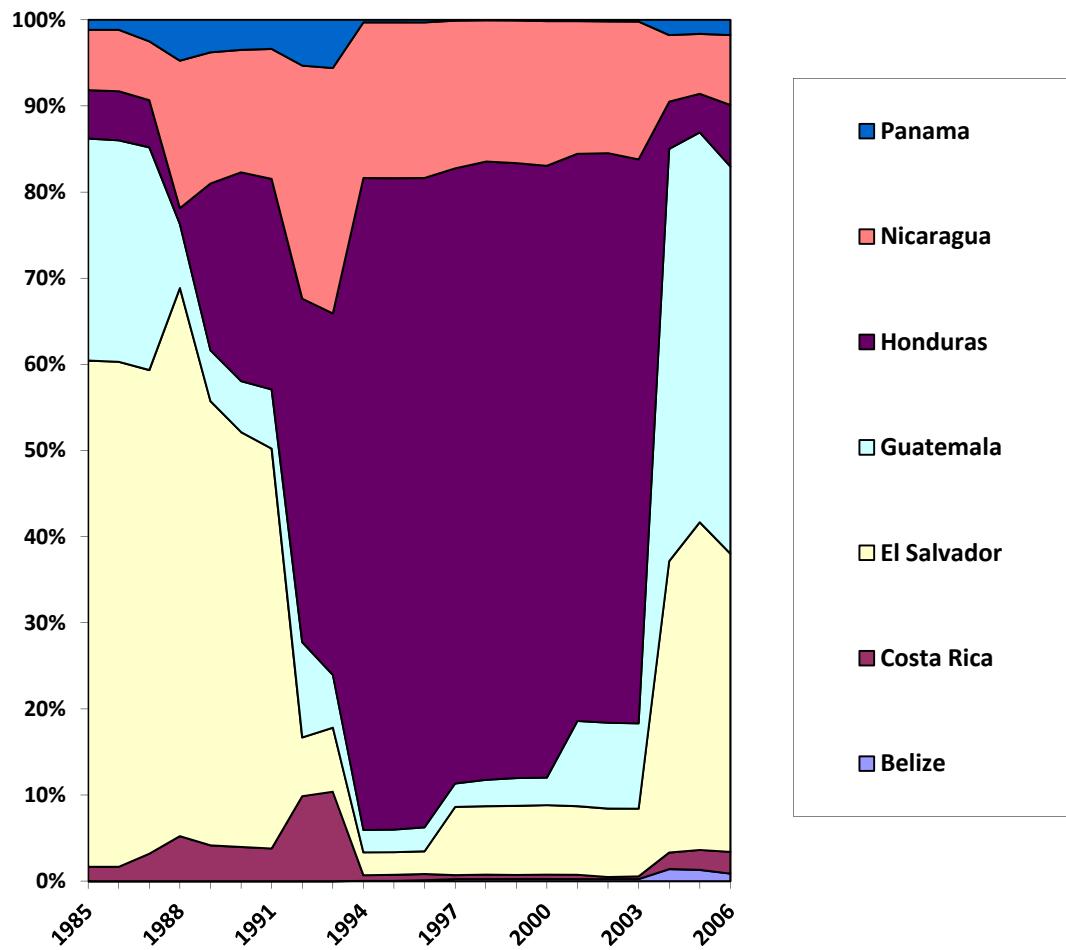


Figure 4-6 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des morts

Ces résultats montrent une différence entre les deux (2) régions étudiées. On ne peut donc pas déduire de cette étude des résultats applicables tels quels à toutes les régions du monde. Une telle étude des spécificités pour les différentes régions du monde est nécessaire avant d'appliquer le modèle logistique proposé, et pourrait révéler encore d'autres spécificités intéressantes.

De plus, on constate une différence entre les répartitions des catégories étudiées, ce qui interdit également de calculer directement un centre de gravité des victimes potentielles pour installer le CDR. L'établissement du centre de gravité recherché requiert la connaissance de coefficients permettant d'équilibrer les différentes catégories.

En effet, si les seules statistiques utilisées sont celles des morts ou des blessés, on risque d'installer le CDR à un endroit qui pourrait être éloigné de la plus grande partie des victimes, qui ont tout de même besoin de matériel de secours.

Cette étude préliminaire a donc permis de répondre à deux (2) questions essentielles pour la suite du travail. La première question concerne la possibilité d'utiliser les données des événements passés pour prévoir la distribution des catastrophes futures. L'absence de tendance d'évolution nous permet de répondre positivement. La deuxième question concerne la possibilité d'extrapoler la répartition des victimes et de leurs besoins à partir du nombre de morts ou du nombre de blessés. Nous constatons ici qu'il ne semble y avoir aucun lien entre les différentes catégories de victimes provoquées par une catastrophe naturelle, on ne peut donc aucunement connaître la répartition des victimes en se fiant aux données concernant une seule catégorie de victimes. Il sera donc nécessaire d'intégrer toutes les catégories de victimes dans les calculs.

Dans la partie suivante, on prendra en compte ces différents coefficients en calculant un centre de gravité pour chaque catégorie de dégâts, puis en pondérant ceux-ci par le poids des ressources nécessaires pour venir en aide à chaque catégorie de personnes affectées. Les dégâts économiques seront donc exclus de cette étape, car ils n'indiquent pas des gens ayant besoins de secours.

## CHAPITRE 5

### ESSAIS ET RÉSULTATS

#### 5.1.1 Phase 1 : Localisation du centre de gravité des besoins

On cherchera tout d'abord à déterminer les besoins logistiques occasionnés par chaque catégorie de personnes (morts, blessés, sans-abris, affectés), de façon à déterminer la localisation idéale d'un Centre de Distribution Régional (CDR). Des données comme le poids des médicaments nécessaires, des différents équipements standards (lits de camps, couvertures, *etc.*) permettront un calcul plus précis.

Ces calculs sont détaillés dans la phase 4, l'évaluation des besoins.

On calcule la moyenne annuelle de chaque catégorie de dommages dans chaque pays (Tableaux 1 et 2).

Tableau 5-1 : Moyenne annuelle des dégâts en Amérique Centrale

	Belize	Costa Rica	El Salvador	Guatemala	Honduras	Nicaragua	Panama	Total
Morts	2	10	123	109	507	136	5	894
Blessés	18	268	1487	27	394	36	35	2268
Sans-abris	0,00	1792	8783	348,58	1983	2630	606	16144
Affectés	6858	50944	93120	133573	127189	94389	8241	514316
Somme	6876	53005	103392	133959	129567	97055	8882	532739
Dommage (milliers de dollars US 2011)	17967	35222	178490	108033	145547	60679	3103	549045

Tableau 5-2 : Moyenne annuelle des dégâts aux Antilles

	Anguilla	Antigua and Barbuda	Bahamas	Barbados	Cayman Islands	Cuba	Dominica	Dominican Republic	Grenada	Guadeloupe	Haiti	Jamaica	Martinique
<b>Morts</b>	0,00	0,26	0,61	0,03	0,06	6,35	0,29	45,90	1,29	0,32	275,74	7,19	0,39
<b>blessés</b>	0,00	6,71	0,00	0,26	0,00	7,52	1,00	21,10	0,00	4,71	136,10	1,32	3,74
<b>Sans abris</b>	0,00	242,13	54,84	264,84	0,00	10142,71	171,45	4051,35	0,00	16,13	32032,81	126,13	103,23
<b>Affectés</b>	4,84	3800,00	661,29	80,65	9,68	421446,84	609,19	83538,48	2027,74	16,13	167240,81	60993,10	61,29
<b>Somme</b>	4,84	4048,84	716,13	345,74	9,68	431597,06	781,65	87610,94	2027,74	370,65	320116,21	61120,55	168,26
<b>Dommages (milliers de dollars US 2011)</b>	75,00	17503,23	82270,97	3441,94	112792,90	358248,29	7645,16	84178,48	29025,81	391,48	26577,61	88705,00	17032,58

	Montserrat	Netherlands Antilles	Puerto Rico	St Kitts et Nevis	St Lucia	St Vincent and The Grenadines	Trinidad and Tobago	Turks and Caicos	Virgin Islands (UK)	Virgin Islands (US)	Virgin Islands (US)	Total
<b>Morts</b>	1,39	0,42	21,65	0,19	2,81	0,23	0,26	0,13	0,00	0,32		365,84
<b>blessés</b>	1,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,71	0,06	0,00	0,10	0,00		184,61
<b>Sans abris</b>	387,10	0,00	9,03	45,16	333,87	25,81	7,26	0,00	0,00	580,65		48594,48
<b>Affectés</b>	425,81	1290,32	5584,52	415,48	2476,61	934,58	95,48	79,68	0,00	64,52		751857,03
<b>Somme</b>	814,19	1290,32	5593,55	460,65	2810,48	961,10	102,81	79,68	0,10	645,16		921676,31
<b>Dommages (milliers de dollars US 2011)</b>	8645,16	33870,97	101548,39	22093,55	36460,65	1374,19	842,81	16129,19	387,10	39929,03		1089169,48

Pour cela, en utilisant les données récoltées, on construit les centres de gravité constaté des différentes catégories de dommages : morts, blessés, sans-abris, personnes affectées, et dommages économiques. On a ainsi les deux (2) cartes suivantes pour les Antilles (Figures 17 et 18) et pour l'Amérique Centrale (Figures 19 et 20).



Figure 5-1 : Situation générale des centres de gravité des différentes catégories de dommages aux Antilles

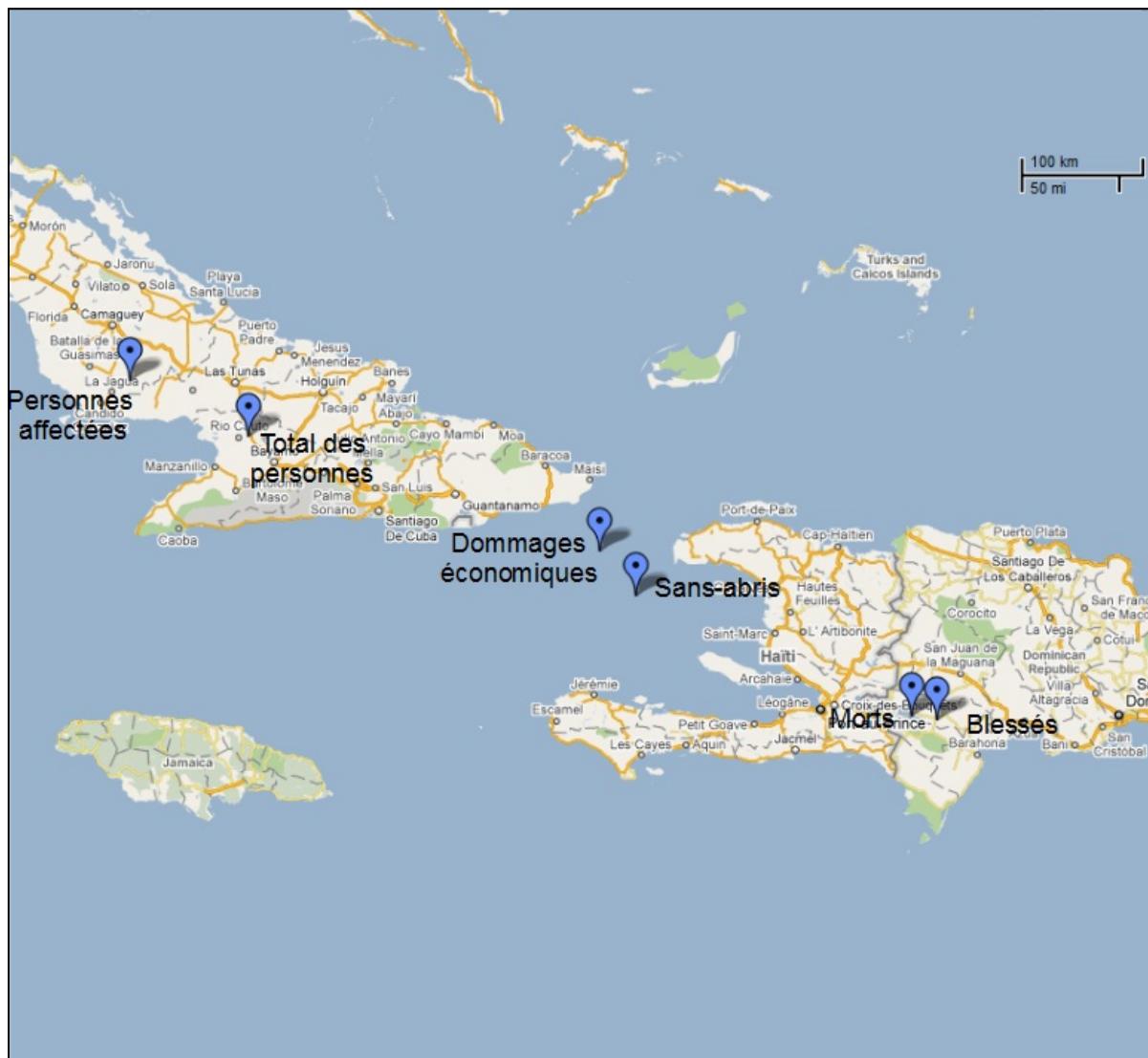


Figure 5-2 : Détail des centres de gravité des différentes catégories de dommages

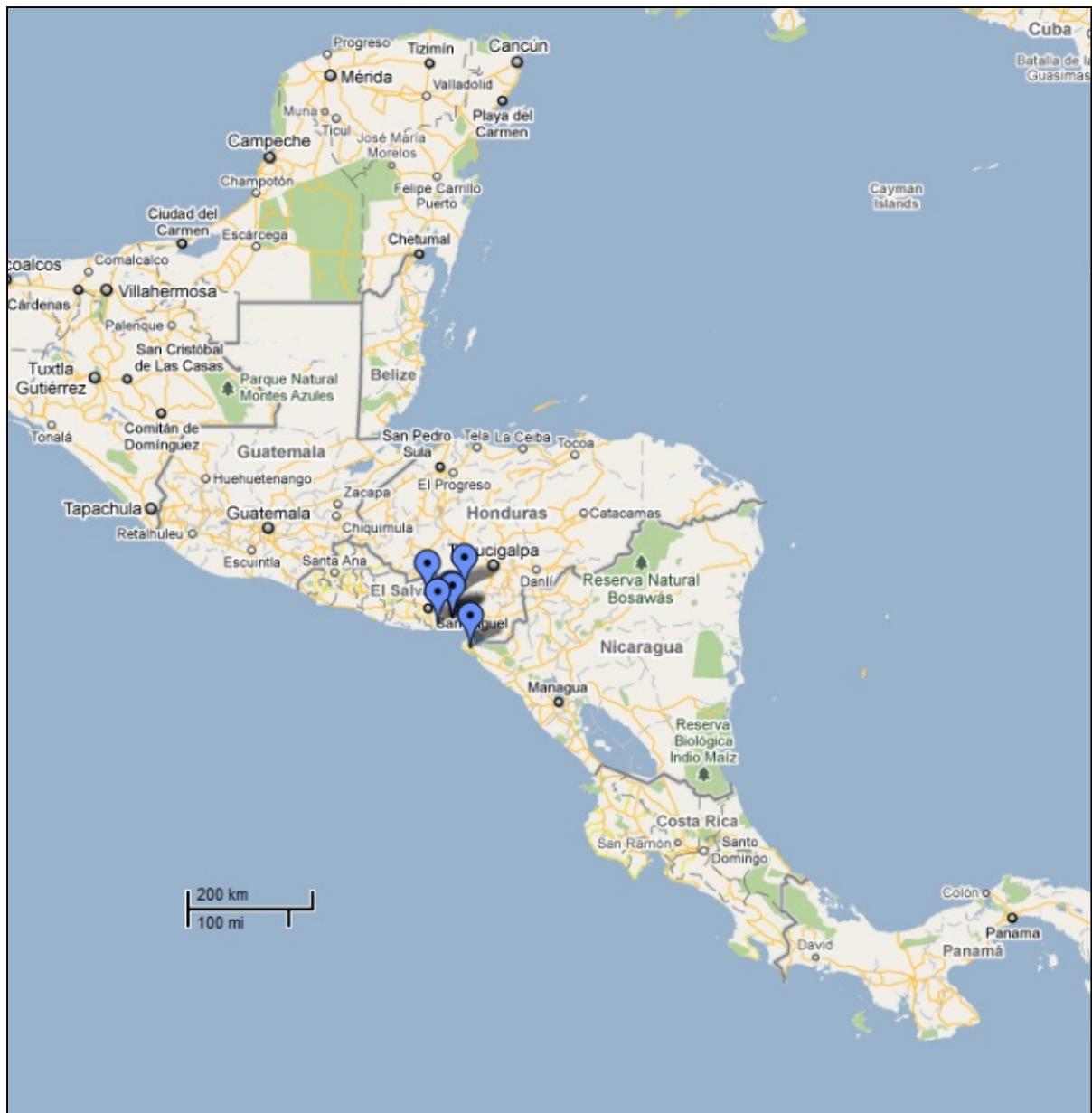


Figure 5-3 : Situation générale des centres de gravité des différentes catégories de dommages en Amérique Centrale

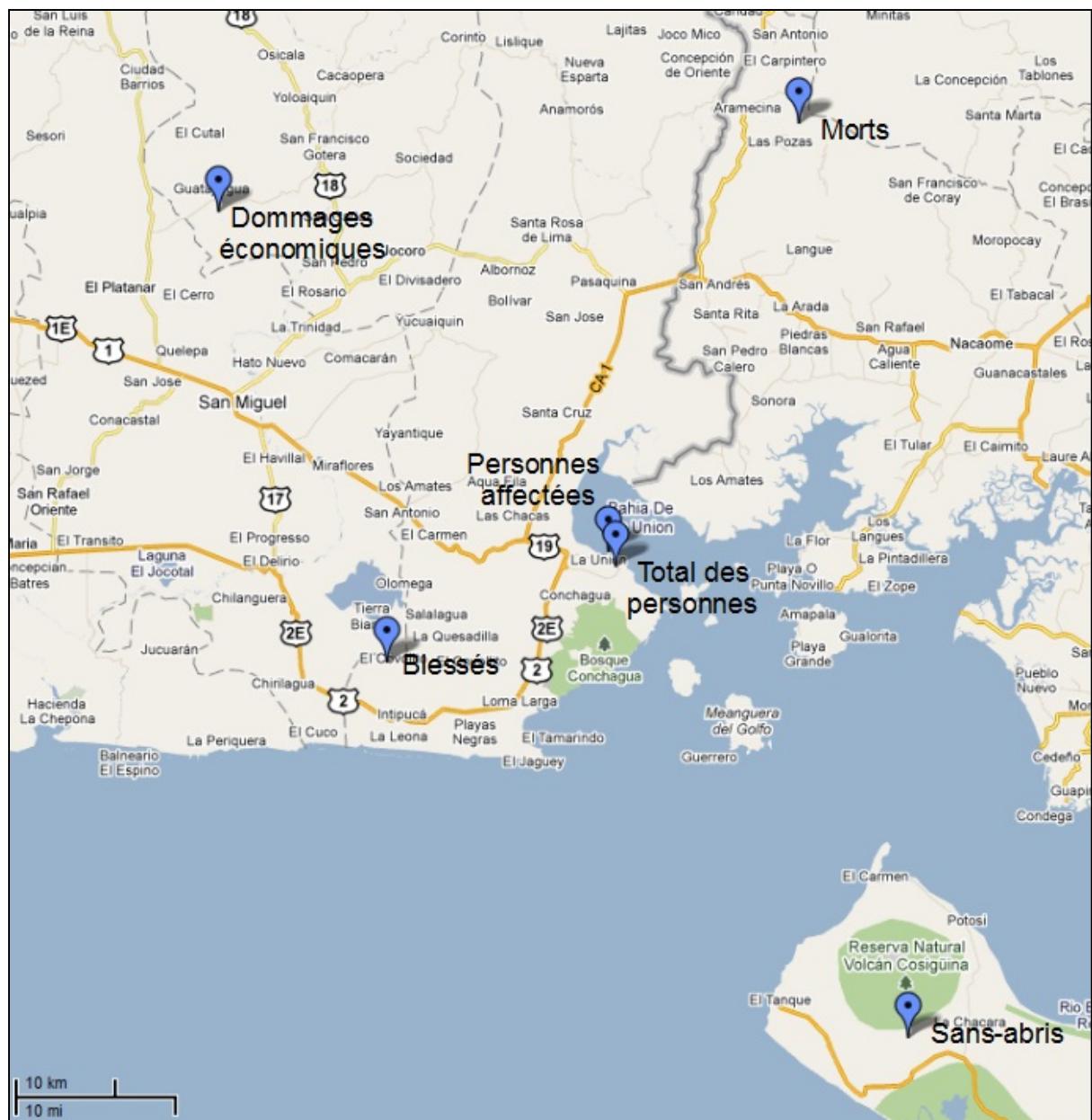


Figure 5-4 : Détail des centres de gravité des différentes catégories de dommages

A partir de ces cartes et en pondérant les différentes catégories de dommages ainsi que leur besoin logistique particulier, on peut calculer le centre de gravité des besoins logistiques liés aux catastrophes naturelles.

Pour calculer ce centre de gravité, on calcule le total des personnes blessées, sans abris, et affectées, dans le total de ces trois (3) catégories. Le nombre de morts, le nombre total de

personnes affectées fourni par le CRED et les dommages économiques ne sont donc pas utilisés. On multiplie ces totaux par le besoin journalier de chaque catégorie de personnes, pour obtenir un besoin logistique total pour chaque catégorie. On calcule alors le besoin logistique total et la proportion de chaque catégorie dans le besoin logistique total.

On obtient alors le centre de gravité des besoins logistiques liés aux catastrophes naturelles aux Antilles (Figure 21) et en Amérique Centrale (Figure 22).

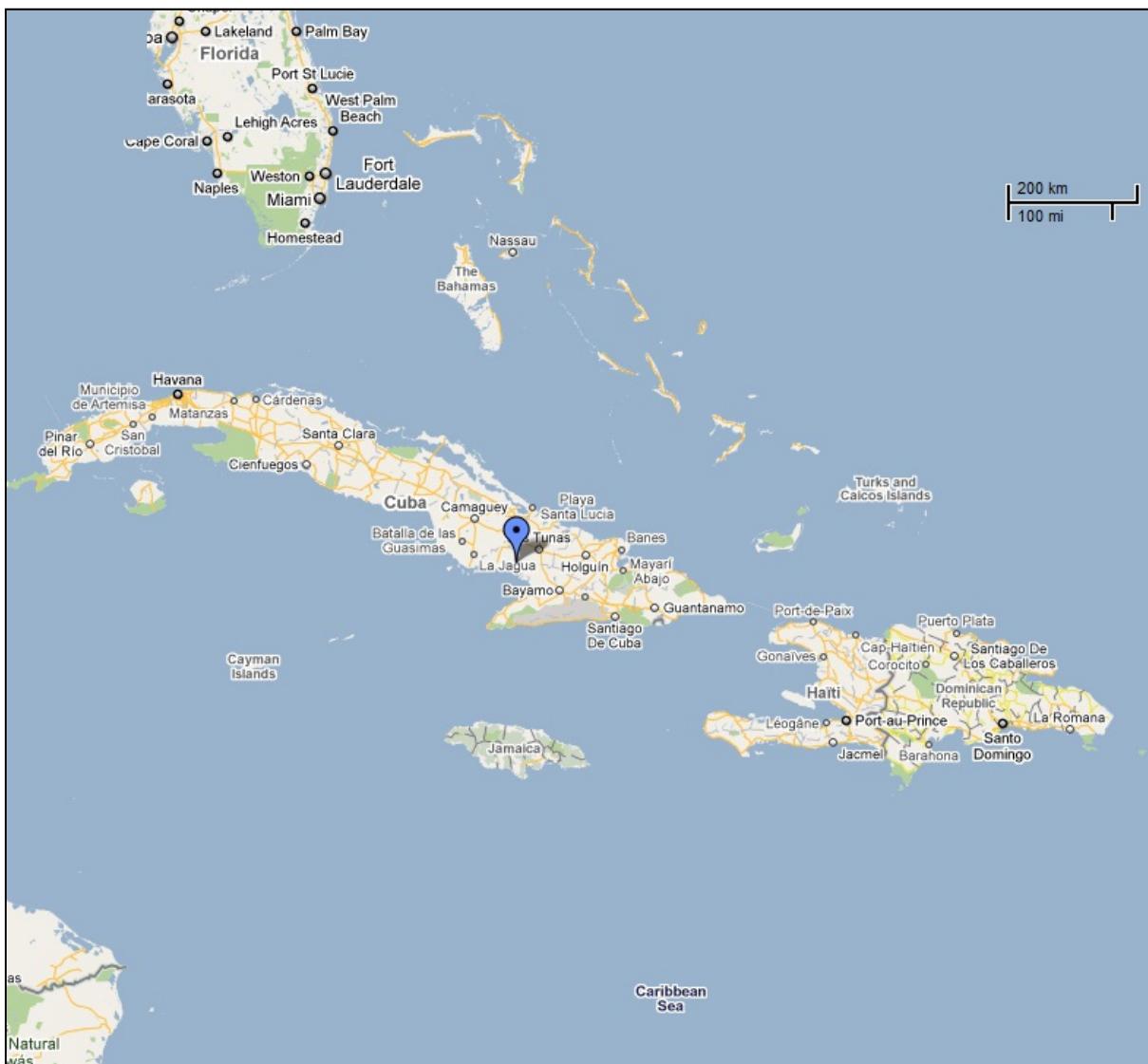


Figure 5-5 : Centre de gravité des besoins logistiques aux Antilles

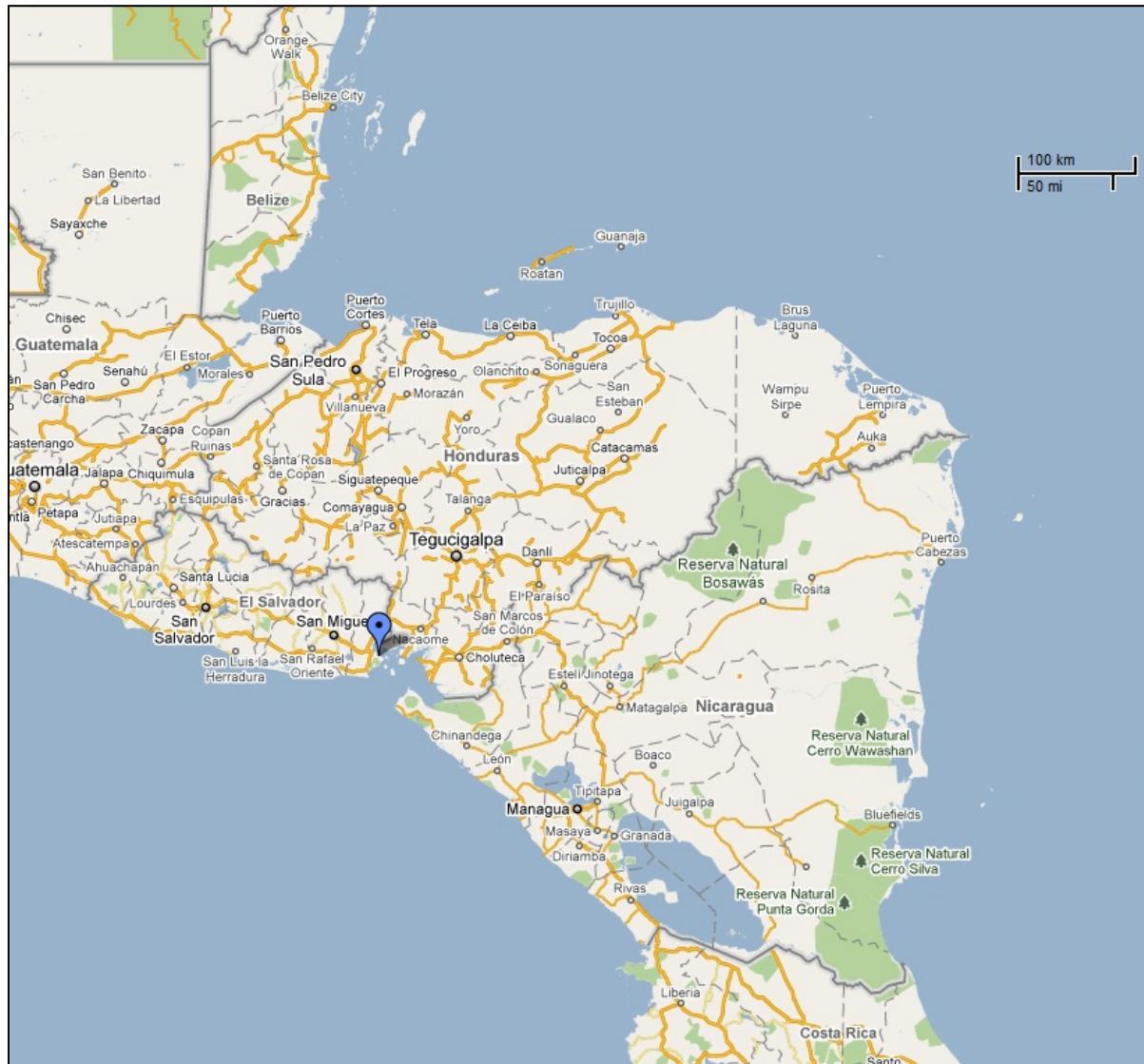


Figure 5-6 : Centre de gravité des besoins logistiques en Amérique Centrale

On peut constater que ces centres de gravité finaux sont très proches des centres de gravité des personnes affectées, en effet, cette catégorie nécessite 92,1 % et 87,8 % des besoins logistiques en Amérique Centrale et aux Antilles, comparés aux 6,2 % et 12,2 % des sans-abris et aux 1,7 % et 0,1 % des blessés.

Il est donc raisonnable de prépositionner un dépôt de matériel d'urgence dans un endroit proche de ce centre de gravité, qui comprend les installations logistiques essentielles, telles qu'un aéroport, une zone de stockage et éventuellement un port. Cet entrepôt couvrant une région du monde entière, l'état des routes environnantes n'est pas primordial. On ne cherchera pas à installer le Centre de Distribution Régional (CDR) exactement au centre de gravité. Dans le modèle mathématique, le choix est effectué entre plusieurs localisations potentielles satisfaisant les conditions nécessaires pour accueillir un CDR, et nous avons ici voulu déterminer son emplacement théorique. Dans la liste des localisations potentielles choisies par l'organisation concernée (probablement l'Organisation Mondiale de la Santé), la plus proche de ce centre de gravité sera sélectionnée, même si la distance paraît élevée. Par exemple, le centre de gravité de la région des Antilles aurait très bien pu se situer dans l'Océan, et le CDR aurait alors été très éloigné sans que cela ne remette en question l'optimalité du choix.

## 5.2 Phase 2 : Transport direct depuis le CDR

La partie 2 ayant déjà fait l'objet d'études, il n'apparaît pas nécessaire de refaire les essais ici, on se contentera de supposer que cette partie est raisonnablement prise en charge par les modèles actuels. En effet, de nombreux articles ont étudié ce domaine de la logistique d'urgence. Le modèle que nous avons sélectionné dans le chapitre précédent est présenté dans l'article de Yi et Özdamar (2007a). La décomposition en deux (2) étapes du problème permet de résoudre le problème de façon beaucoup plus rapide qu'un modèle de routage de véhicule en une seule étape. Le modèle est ensuite testé sur des scénarios plus larges, jusqu'à 60 nœuds et 170 véhicules, et le temps de calcul est toujours inférieur à trois (3) minutes, ce qui est suffisamment rapide pour une application en situation d'urgence réelle.

### **5.3 Phase 3 : Localisation du Centre de Distribution Local**

La phase 3 se déclenche après la catastrophe, avec les données disponibles lors des premières évaluations des dégâts. Pour simuler cela, on extrait les données des premiers rapports disponibles sur le site internet ReliefWeb, qui rassemble les rapports des différentes ONG qui agissent dans le cadre d'une catastrophe naturelle. On utilise les données issues de 2 catastrophes, le tremblement de terre en Haïti le 12 Janvier 2010, et les inondations au Pakistan en Juillet 2010. L'évaluation des différentes catégories de personnes affectées n'est souvent pas disponible, de plus, la quantité d'eau potable nécessaires pour toutes les personnes touchées rend leur besoins très semblables en terme de poids, on peut donc envisager de ne considérer qu'une seule catégorie de personnes affectées.

#### **5.3.1 Haïti – Tremblement de terre du 12 Janvier 2010**

Le rapport utilisé est une carte des zones affectées publiée par le Global Disaster Alert and Coordination System le 12 Janvier 2010. On confronte ces cartes avec la population des différentes agglomérations concernées extraite de Wikipédia.

On cherche ensuite à déterminer le centre de gravité des personnes affectées à partir de ces données. On n'a pas tenu compte ici de l'importance des dégâts, en attribuant à chaque zone la même pondération. Étant donné que l'épicentre du séisme est situé à environ 20 km de Port-au-Prince, capitale du pays et ville de 1,2 million d'habitants, le centre de gravité est nécessairement très proche de Port-au-Prince. Il se situe à mi-distance entre l'épicentre et Port au Prince.

#### **5.3.2 Pakistan - Inondations de Juillet 2010**

Le rapport utilisé est une carte des districts du Khyber Pakhtunkhwa affectés par les inondations publiée par l'OCHA le 30 Juillet. Cette carte fait la liste des districts

« sévèrement affectés », et des districts « modérément affectés ». On pondère différemment les deux (2) catégories en attribuant un poids de 0,2 aux districts légèrement affectés, et 0,8 pour les districts sévèrement affectés. Ces coefficients ont été choisis arbitrairement de façon à s'approcher des conditions réelles, où la décision doit être prise rapidement à partir de données parfois fragmentaires, d'où l'absence d'analyse de sensibilité. Les localisations utilisées sont celles des capitales des districts. Étant données les distances à parcourir, la zone affectée étant longue de plus de 600 km, et sachant que des dommages aux infrastructures routières sont signalés, on peut se poser la question de la nécessité d'installer plusieurs Centres de Distribution Locaux (CDL).

On calcule d'abord la solution avec un (1) CDL, qui le situe à Charsadda (voir Figure 23).

Les cartes représentant les autres solutions trouvées sont disponibles en ANNEXE VIII.

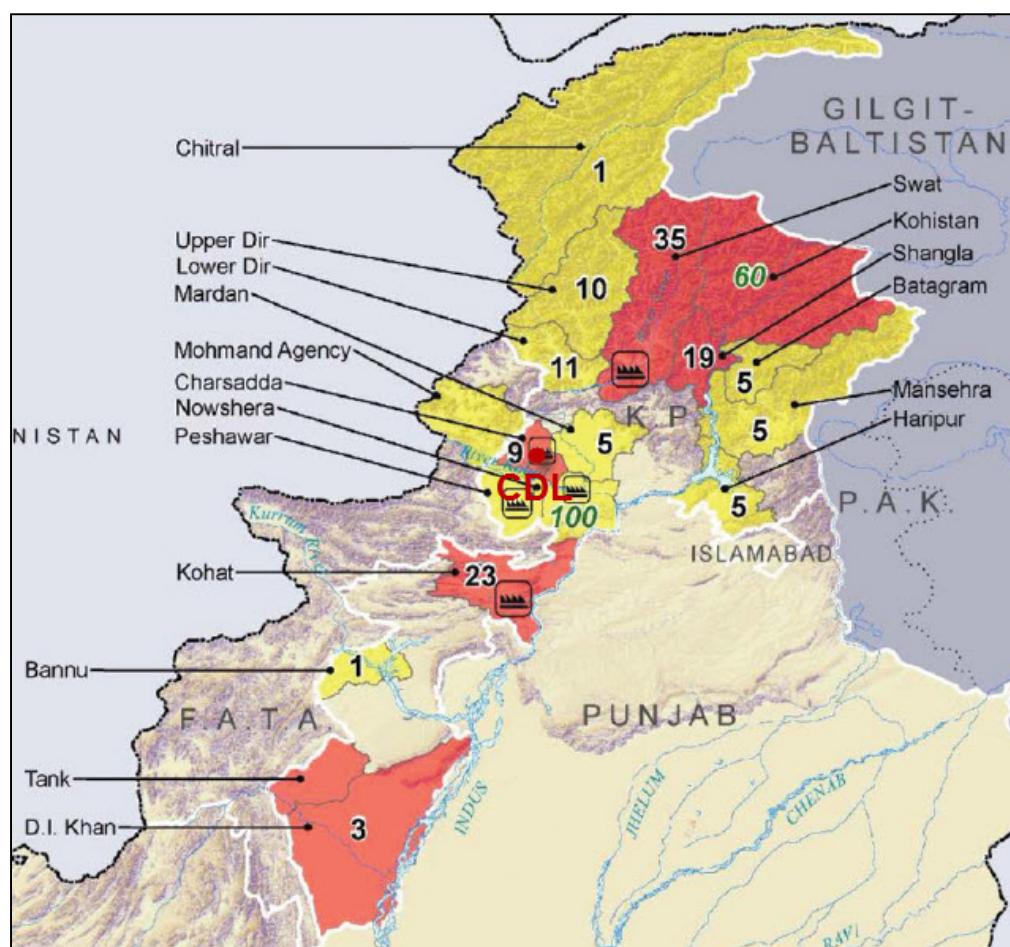


Figure 5-7 : Centre de Distribution Local situé à Charsadda

Puis en autorisant deux (2) CDL qui sont placés à D.I. Khan et Mardan et trois CDL, qui sont placés à Swat, Charsadda, et D.I. Khan.

En utilisant le deuxième modèle, qui minimise le nombre de CDL en garantissant une distance maximale au CDL. On définit d'abord la limite de distance à 300 km. Dans ce cas, un seul CDL est suffisant, il est situé à Charsadda.

En réglant la distance maximale à 200 km, on a deux CDL, Charsadda et Tank.

En réglant la distance maximale à 100 km, on obtient 4 CDL à Kohat, Tank Upper Dir et Batagram.

Cette approche est probablement plus adaptée pour les catastrophes s'étendant sur des grandes surfaces comme ici, notamment quand les transports sont rendus difficiles par le relief accidenté ou l'état des routes (dans cet exemple, certaines routes ont été emportées par les crues).

Le programme donnant la localisation en fonction du nombre de CDL ouverts donne ici un problème à 342 variables, toutes entières, et 345 contraintes. Il est résolu en 1 seconde par un processeur de 2.20 GHz. Le programme donnant la localisation en fonction de la distance maximale autorisée donne un problème à 342 variables, toutes entières, et 667 contraintes, résolu en 2 secondes par un processeur de 2.20 GHz.

#### **5.4 Phase 4 : Évaluation des besoins**

On établit différents besoins pour les personnes affectées par une catastrophe :

- Eau potable
- Nourriture
- Soins basiques
- Abris
- Installations sanitaires
- Soins traumatologiques

Pour cela, on établit les quantités suivantes :

#### **5.4.1 Eau potable**

L'eau potable est produite par des unités de purification mobiles. Ces dernières seront stockées au centre de distribution régional, puis transportées au centre de distribution local lors d'une catastrophe. Le poids compté lors de la phase 1 est donc une fraction du poids de l'unité, tandis que le poids envisagé lors de la phase 3 est le poids réel de l'eau, transportée par bidons ou autre contenant de l'unité de purification au lieu de consommation.

Nous avons cherché les poids et capacités de traitement de différents systèmes de traitement de l'eau, puis calculé le ratio entre leur poids et le débit journalier (Tableau 3).

Tableau 5-3 : Ratio Poids/Débit des unités de purification d'eau

Modèle	Poids (kg)	Débit (l/jr)	Ratio Poids/Débit
International Water Company, LLC	1727	113562	0,01521
Noah Water Systems – Nomad Series	272	135800	0,02
Rodi systems	13607	189270	0,07189
Lenntech Emergency potabilisation unit	300	48000	0,00625
Moyenne			0,02384

Les données relatives aux différents modèles sont disponibles sur :

- [http://internationalwatercompany.com/pdfs/IWC\\_Product\\_Sheet.pdf](http://internationalwatercompany.com/pdfs/IWC_Product_Sheet.pdf)
- [http://noahwater.com/site\\_flash/index-1.html#](http://noahwater.com/site_flash/index-1.html#)
- <http://www.rodisystems.com/products/show/portsys>
- <http://www.lenntech.com/applications/emergency-potabilisation-units.htm>

On multiplie alors ce nombre par 15, qui est le nombre de litres dont une personne a besoin quotidiennement, pour la boisson, la cuisine et l'hygiène. On obtient la fraction du poids du

système de purification d'eau nécessaire pour produire 15 litres d'eau par jour et par personne.

On a ainsi un besoin de  $0,02384 * 15 = 0,357$  kg par personne et par jour.

#### **5.4.2 Nourriture**

La ration de nourriture est extrêmement variable dans une situation de catastrophe naturelle. Il existe des « Humanitarian Daily Rations », distribuées par l'armée américaine dont le poids est compris entre 1 et 2 livres. On compte donc 750 g en moyenne par personne et par jour.

#### **5.4.3 Soins basiques**

Il existe un kit médical distribué par l'OMS, l'Interagency Emergency Health Kit (IEHK), dont la composition a été révisée pour la dernière fois en 2006. Il contient par exemple des antipyrétiques, des anti diarrhéiques, des antibiotiques et antiseptiques, permettant le traitement des maladies légères ne nécessitant pas d'hospitalisation.

Pesant approximativement 1000 kg et pouvant subvenir aux besoins de 10 000 personnes pendant 3 mois. Les principes de base de ce Kit, comme expliqué dans le document d'accompagnement, est :

« Le Kit 2006 est principalement conçu pour répondre aux besoins immédiats en matière de soins de santé primaires d'une population déplacée n'ayant pas accès à des services médicaux. Sa composition représente un compromis et il y aura toujours des articles qui ne répondront pas exactement aux besoins. Il ne serait possible de concevoir un kit idéal qu'en connaissant exactement les caractéristiques de la population, la prévalence des maladies, les schémas de morbidité et le niveau de formation des utilisateurs du kit. » ( la composition complète du kit ainsi que les conseils d'utilisation sont disponibles sur le site <http://www.who.int/hac/techguidance/tools/IEHK2006.pdf>)

On en déduit un besoin en soins basique de  $1\ 000 / (10\ 000 * 90)$ , soit 1,1g par personne et par jour. Ce chiffre est donc négligeable par rapport aux autres besoins.

#### **5.4.4 Abris**

L'abri est en général fourni sous forme de tente. Le poids d'une tente dépend de la marque et du modèle, nous avons donc cherché les poids et capacité de différents modèles, afin d'avoir un poids moyen (Tableau 4)

Tableau 5-4 : Poids et capacité des différents modèles de tente

Marque/Modèle	Capacité	Poids (kg)
Nizam – Relief Tent Single Fly	5	38
Nizam – Relief Tent Double Fly	5	75
Sheltersystems 14' Dome	5	20

On a un poids moyen de 44 kgs environ pour une tente.

La tente étant un équipement, et non une provision consommable, on décide d'étaler son besoin sur une semaine, ce qui donne un besoin de 1,27 kg par personne et par jour.

#### **5.4.5 Installations sanitaires**

Un grand nombre de maladies peuvent se développer suite à un mauvais aménagement sanitaire, résultant en une contamination de l'eau potable par les matières fécales. Néanmoins, ce mauvais aménagement tient plutôt d'un manque d'organisation que d'un manque d'équipement, la simple désignation d'un endroit éloigné des habitations et réserves d'eau et un simple trou creusé au sol suffit à constituer des installations sanitaires primitives. Ce besoin n'est donc pas comptabilisé ici.

#### **5.4.6 Soins traumatologiques**

Les personnes souffrant de blessures ou d'affections sévères ne peuvent être soignés avec les médicaments issus de l'IEHK. Elles nécessitent du matériel spécifique.

Des kits fournis par l'Italie à l'Organisation Mondiale de la Santé sont conçus spécialement pour ce cas. Le premier est désigné Italian Trauma Kit A et contient tous les médicaments nécessaires pour le traitement de 100 personnes pendant une semaine. Le deuxième kit, Italian Trauma Kit B, contient tous les équipements nécessaires pour ces 100 personnes (seringues, bandages, gants, etc). Ils pèsent respectivement 1335 kg et 407 kg.

On calcule un besoin en matériel de soins spécialisé de 2,18 kg par personne et par jour.

On établit les besoins suivants pour chaque catégorie :

Les personnes affectées ont souffert d'une rupture d'approvisionnement et d'une destruction du tissu social habituel, elles ont besoin d'eau potable, de nourriture et de soins basiques.

Les personnes sans-abris ont les mêmes besoins que les personnes affectées, auxquels s'ajoute le besoin d'une tente.

Les blessés ont besoin d'eau, de nourriture et de soins traumatologique, mais aussi d'un lit dans un hôpital de campagne, on considère donc qu'ils ont besoin d'une place dans une tente (Tableaux 5 et 6).

Tableau 5-5 : Besoins de chaque catégorie de personnes affectées pour la phase 1

Provisions	Poids (kg)	Catégories de personnes affectées		
		Blessés	Sans-abris	Personnes affectées
Eau potable	0,357	X	X	X
Nourriture	0,750	X	X	X
Abri	1,27	X	X	
Soins traumatologiques	2,18	X		
Besoin total		4,557	2,337	1,107

Tableau 5-6 : Besoins de chaque catégorie de personnes affectées pour la phase 3

Provisions	Poids (kg)	Catégories de personnes affectées		
		Blessés	Sans-abris	Personnes affectées
Eau potable	15	X	X	X
Nourriture	0,750	X	X	X
Abri	1,27	X	X	
Soins traumatologiques	2,18	X		
Besoin total		19,20	17,02	15,750

On détermine ensuite le nombre de personnes dans chaque catégorie, nombre qui doit être actualisé régulièrement, par exemple lorsque les blessés sont rétablis.

## 5.5 Phase 5 : Approvisionnements entre le CDR et le CDL

La partie 5 consiste à établir un programme de livraisons entre le centre de distribution régional et le centre de distribution local.

Le programme a été réalisé sous LINGO 12.0, et a été utilisé pour vérifier la faisabilité des équations utilisées. Les essais préliminaires ont donné des résultats satisfaisants, et le principe du modèle apparaît approprié à la tâche demandée. Les résultats demandent à être confirmés pour des fichiers plus importants, tant en matière d'horizon de planification que de type de ressource ou de moyens de transport.

Le modèle a été testé pour deux (2) types de ressources et deux (2) moyens de transport, et pour cinq (5) périodes de planification. Cela donne un problème à 170 variables dont 20 variables entières, et 91 contraintes. La résolution de ce problème prend moins d'une seconde pour un processeur à 2.20 GHz. La résolution donne un tableau présentant la quantité de chaque ressource transportée à chaque période pour chaque moyen de transport.

Nous pouvons constater que le programme de la phase 1 permet de choisir l'endroit le plus à même de recevoir un CDR, ce qui pourra permettre d'optimiser l'envoi des secours en cas de catastrophe dans la région. Cette application n'a pas exactement suivi le programme, car nous n'avons pas utilisé de liste de localisations potentielles, toutefois, la détermination d'un

centre de gravité permettra, dès l'obtention d'une telle liste, de choisir la localisation optimale.

La phase 2 se reporte un modèle qui a déjà été testé par son auteur, et a réagi de façon concluante.

Le programme de la phase 3 permet de décider rapidement la position optimale du ou des CDL, en fonction des informations disponibles immédiatement après la catastrophe. Il est parfaitement adapté à son but, et les essais réalisés avec les deux situations réelles proposées sont concluants.

Les équations de la phase 4 permet, après estimation du nombre de personnes affectées, blessés et sans abris, de connaître les besoins de chaque zone, et de connaître le poids nécessaire à transporter.

Le modèle de la phase 5 permet de calculer un planning de livraison en groupant les lots de façon à optimiser le transport. On peut ainsi subvenir aux besoins définis à la phase 4 de manière continue. Le programme LINGO de cette phase permet d'indiquer , il est donc utilisable.

Ces résultats montrent que les programmes utilisés fonctionnent, donc que leur principes sont corrects. Les données utilisées proviennent de cas réels pour les phases 1 et 3, donc leur résultats sont utilisables par une organisation humanitaire. La rapidité de ces calculs est aussi remarquable, ce qui permet de tester plusieurs scénarios ou de déployer le modèle rapidement. Le programme de la phase 3 a donné un problème de 342 variables entières et 345 contraintes résolu en une (1) seconde, et le programme de la phase 5 a donné un problème de 170 variables dont 20 entières, résolu en une (1) seconde aussi. Les développements futurs répondent à beaucoup de besoins annexes permettant d'adapter les modèles à des situations différentes.

## CONCLUSION

Dans cette recherche, nous avons proposé une nouvelle façon d'envisager l'organisation des secours dans le cadre de la logistique humanitaire. Une organisation plus axée sur la gestion du risque à long terme et sur l'articulation entre les différentes phases, qui correspondent aux différentes étapes de développement d'une catastrophe naturelle. La phase 1, qui concerne la prévision des catastrophes par des études de vulnérabilité, peut permettre une grande efficacité et est peu développée actuellement. La phase 3, qui correspond à la localisation de l'entrepôt avancé, ne semble pas faire l'objet d'un choix réfléchi pour le moment.

Nous avons également vérifié les hypothèses utilisées dans le modèle sur la localisation du dépôt permanent en utilisant les données passées pour étudier l'évolution dans le temps et la répartition des diverses catégories de dégâts causés par les catastrophes naturelles aux Antilles et en Amérique Centrale. Nous avons ensuite vérifié le fonctionnement du modèle des phases 1, 3 et 5, et rassemblé les données nécessaires à l'utilisation du modèle, notamment pour la phase 4.

La notion de vulnérabilité utilisée dans la phase 1 serait extrêmement utile pour permettre de prévoir les zones où les secours doivent pouvoir intervenir rapidement. La prévision stratégique est en effet un concept qui n'est pas souvent appliquée aux situations d'urgences, alors qu'il pourrait très bien y jouer un rôle.

Nous avons néanmoins constaté que le Bureau Régional de la Méditerranée Orientale de l'Organisation Mondiale de la Santé a commencé à publier un « e-atlas » des risques liés aux catastrophes naturelles. « Le Volume 1 du e-Atlas contient une série de cartes et de documents de support expliquant la méthodologie et fournissant des métadonnées qui illustrent la distribution des catastrophes naturelles (séismes, inondations, canicules, tempêtes et glissements de terrains) survenant dans la région de la Méditerranée orientale, ainsi qu'une estimation de la taille des populations exposées à de tels risques.

Ce volume et les suivants, toujours en préparation, peuvent être utilisés pour améliorer la préparation aux catastrophes dans le secteur de la santé; les mesures d'aide d'urgence au travers d'une meilleure information de la situation de départ; assister à l'identification, à la planification et à la priorisation des zones pour les activités d'atténuation des effets des catastrophes; et fournir une base pour les activités de transition et de normalisation suivant une catastrophe. » (<http://www.emro.who.int/eha/e-atlas.htm>) World Health Organization Regional Office for the Eastern Mediterranean (2011).

Le développement de ce type de bases de données sur des critères standardisés à travers le monde pourrait être utilisé très efficacement avec le modèle de la phase 1, pour permettre le placement des Centres de Distributions Régionaux de manière prédictive, et non en fonction des données passées comme nous l'avons fait ici.

Ce modèle considère l'intervention humanitaire comme le fait d'une seule agence, ce qui est une situation idéale assez éloignée de la réalité, toutefois, l'augmentation de la coordination des agences permettrait de s'approcher de cet idéal. Reliefweb, un site créé par l'OCHA (*Office of Coordination for Humanitarian Affairs*) en 1996 travaille à augmenter cette coordination. « Son but est d'aider les associations humanitaires à trouver les informations utiles sur les crises humanitaires dans le monde. Pour cela, les responsables surveillent les sites Web des organisations internationales et non-gouvernementales, des gouvernements, des institutions de recherche et des médias pour regrouper des informations, rapports, coupures de presse, appels de fonds, documents d'orientation analyses et cartes liées aux urgences humanitaires dans le monde. Ils s'assurent ensuite que le contenu le plus pertinent est disponible sur le site de ReliefWeb. » (<http://reliefweb.int/about>). Une plus grande intégration, et la capacité à donner des consignes d'action permettrait de coordonner beaucoup plus efficacement les différents intervenants. On pense notamment à une gestion globale des stocks et des approvisionnements.

Il faudrait désormais tester ce modèle dans le cadre d'une urgence réelle, ce qui pourra être fait par une agence telle que l'OMS ou l'OCHA, qui disposent du rôle centralisateur nécessaire pour mettre en place efficacement les recommandations de ce rapport.

L'implication des agences internationales dans la planification des réponses aux catastrophes et dans l'intégration des moyens permet de supposer un progrès dans ce domaine, et sa mise en pratique prochaine.

Au niveau des développements futurs, pour la phase 1, il serait intéressant de savoir, si, pour chaque type de catastrophe, le nombre de personnes affectées, les nombre de blessés, et le nombre de personnes sans-abris sont proportionnels entre eux.

On souhaiterait pour les types de catastrophes reconnus, connaître la répartition statistique du nombre de personnes affectées, blessées, et sans-abri sur le nombre total de catastrophes.

Par exemple, pour les séismes, Okada et Takai (1999) ont étudié la répartition statistique des blessés légers, des blessés graves et des morts suivant les dégâts infligés au bâtiment.

Une étude de la part de population qui est blessée, tuée, ou la proportion de bâtiments détruits pourrait s'avérer très utile pour la prédiction des situations futures. Les prochaines recherches pourraient identifier et quantifier l'influence de la gravité de la catastrophe (force du séisme sur l'échelle de Richter ou vitesse des vents pour un ouragan), de la solidité des bâtiments ainsi que les paramètres géographiques (relief, couverture forestière, *etc.*) sur la proportion de morts et de blessés parmi la population.

Pour la phase 3, l'état des réseaux de transport est un critère important pour le choix de l'emplacement. Il est donc envisageable d'intégrer les idées d'Ukkusuri et Yushimoto (2008) sur le calcul du positionnement d'un dépôt en fonction de la fiabilité du réseau de transport dans ce modèle.

Pour la phase 4, il serait intéressant de savoir si l'on doit considérer une proportion constante de blessés et de sans-abris parmi les sinistrés ou si la guérison et la reconstruction a pour effet de faire varier le nombre de sinistrés ou de blessés.

Pour la phase 5, on pourrait ajouter dans le modèle un critère d'urgence, utilisant le délai qu'il est possible d'attendre avant que le manque de certaines ressources n'ait des conséquences graves.

A titre indicatif, ce délai pour les ressources suivantes est de 3h pour le plasma sanguin et l'équipement traumatologique, de 12h pour l'abri, les couvertures et l'eau potable, de 24h pour la nourriture, de 48h pour les antibiotiques et de 96h pour équipements de reconstruction.

Ces améliorations pourraient compléter efficacement le modèle proposé, celui-ci étant principalement basé sur l'articulation des différentes phases entre elles. Ce modèle pourrait donc servir de point de départ à d'autres travaux de recherches sur ce sujet. Il permettrait alors de répondre de façon spécifique au besoin de chaque agence, et pourrait s'adapter à chaque situation.

## ANNEXE I

### PROGRAMME LINGO DE LA PHASE 1

```
SETS :  
zone : habitants ;  
CDR : ouvert ;  
liens ( zone , CDR ) : distance ;  
cata ;  
situation ( zone , cata ) : freq , sensibilite ;  
  
ENDSETS  
  
DATA :  
zone = A B C D ;  
CDR = E F G H ;  
distance =  
0 1 2 3  
1 0 4 5  
2 4 0 6  
3 5 6 0 ;  
  
!distance ( villes , villes ) = @ole('coordonées.xls','distance');  
ENDDATA  
  
! fonction objective;  
  
MIN = @sum ( liens ( i , j ) : distance * ouvert ( i ) );  
  
!contraintes;  
@for (zone : @bin(ouvert));  
@sum (zone : ouvert ) >= 1 ;  
@sum (zone : ouvert ) <= 3 ;
```



## ANNEXE II

### PROGRAMME LINGO DE LA PHASE 3

```
SETS :
ville : entrepot ;
zone : population ;
liens ( ville , zone ) : distance , affecte ;
ENDSETS

DATA :
ville = A B C D ;
zone = E F G H ;
distance =
0 1 2 3
1 0 4 5
2 4 0 6
3 5 6 0 ;
population = 5 3 9 1 ;

!distance ( villes , villes ) = @ole('coordonées.xls','distance') ;
ENDDATA

! fonction objective;

MIN = @sum ( liens ( i , j ) : distance * affecte * population ) ;

!contraintes ;

! variables binaires pour l'entrepot et l'affection ;
@for ( ville : @bin ( entrepot ) ) ;
@for ( liens ( i , j ) : @bin ( affecte ) ) ;

! un et un seul entrepot pour servir une zone ;
@for ( zone ( j ) : @sum (liens ( i , j ) : affecte ) = 1) ;

! une zone ne peut être servie que par un entrepot ouvert ;
@for ( liens ( i , j ) : affecte <= ( entrepot (i) ) ) ;

! limitation du nombre d'entrepots ;
@sum ( ville : entrepot ) >= 1 ;
@sum ( ville : entrepot ) <= 2 ;
```



## ANNEXE III

### PROGRAMME LINGO DE LA PHASE 5

```
SETS :  
moyen ;  
ressource ;  
periode ;  
offre ( periode , moyen ) : capacite , taillelot , nbcaisses , nblots ,  
nbentlots , reste , binlot , coutlots ;  
demande ( periode , ressource ) : besoin , stock ;  
transport ( offre , demande ) : coutunit , quantra ;  
  
ENDSETS  
  
DATA :  
moyen = @OLE('data.xlsx' , 'moyen') ;  
ressource = @OLE('data.xlsx' , 'ressource') ;  
periode = @OLE('data.xlsx' , 'periode') ;  
capacite = @OLE('data.xlsx' , 'capacite') ;  
taillelot =  
8 1  
8 1  
8 1  
8 1  
8 1 ;  
besoin = @OLE('data.xlsx' , 'besoin') ;  
stock = @OLE('data.xlsx' , 'stock') ;  
coutunit = @OLE('data.xlsx' , 'coutunit') ;  
  
coutlots =  
30 18  
30 18  
30 18  
30 18  
30 18 ;  
  
ENDDATA  
  
!fonction objective;  
  
MIN = @sum ( transport : coutunit * quantra ) + @sum ( offre : nbentlots  
* coutlots ) ;  
  
!contraintes ;  
  
!#1 calcul du stock ;
```

```

! q = b - s ;
@for ( periode ( per ) : @for ( ressource ( res ) : @sum ( offre ( i , moy
) : quantra ( i , moy , per , res ) ) = besoin ( per , res ) - stock (
per , res ) ) ) ;

!#2 Capacité ;

@for ( periode ( per ) : @for ( moyen ( moy ) : @sum ( periode ( i ) :
@sum ( ressource ( res ) : quantra ( i , moy , per , res ) ) ) ) <=
capacite ( per , moy ) ) ) ;

!#3 Interdiction du stock négatif ;

@for ( demande : stock >= 0 ) ;

!#4 Cout du voyage ;

@for ( periode ( per ) : @for ( moyen ( moy ) : ( @sum ( periode ( i ) :
@sum ( ressource ( res ) :
quantra ( i , moy , per , res ) ) ) ) = nbcaisses ) ) ) ;

@for ( periode ( per ) : @for ( moyen ( moy ) : nbcaisses = ( taillelot *
nblots ) + reste ) ) ;

@for ( periode ( per ) : @for ( moyen ( moy ) : reste <= taillelot *
binlot ) ) ;

@for ( periode ( per ) : @for ( moyen ( moy ) : @bin ( binlot ) ) ) ;

@for ( periode ( per ) : @for ( moyen ( moy ) : @gin ( nblots ) ) ) ;

@for ( periode ( per ) : @for ( moyen ( moy ) : nbentlots = nblots +
binlot ) ) ;

```

## ANNEXE IV

### ÉVOLUTION DES DÉGÂTS AUX ANTILLES

On constate pour les Antilles que la tendance du nombre de morts et de blessés est stable, malgré deux (2) évènements majeurs en 2004 (une inondation et un ouragan à Haïti) (Figure 5-8).

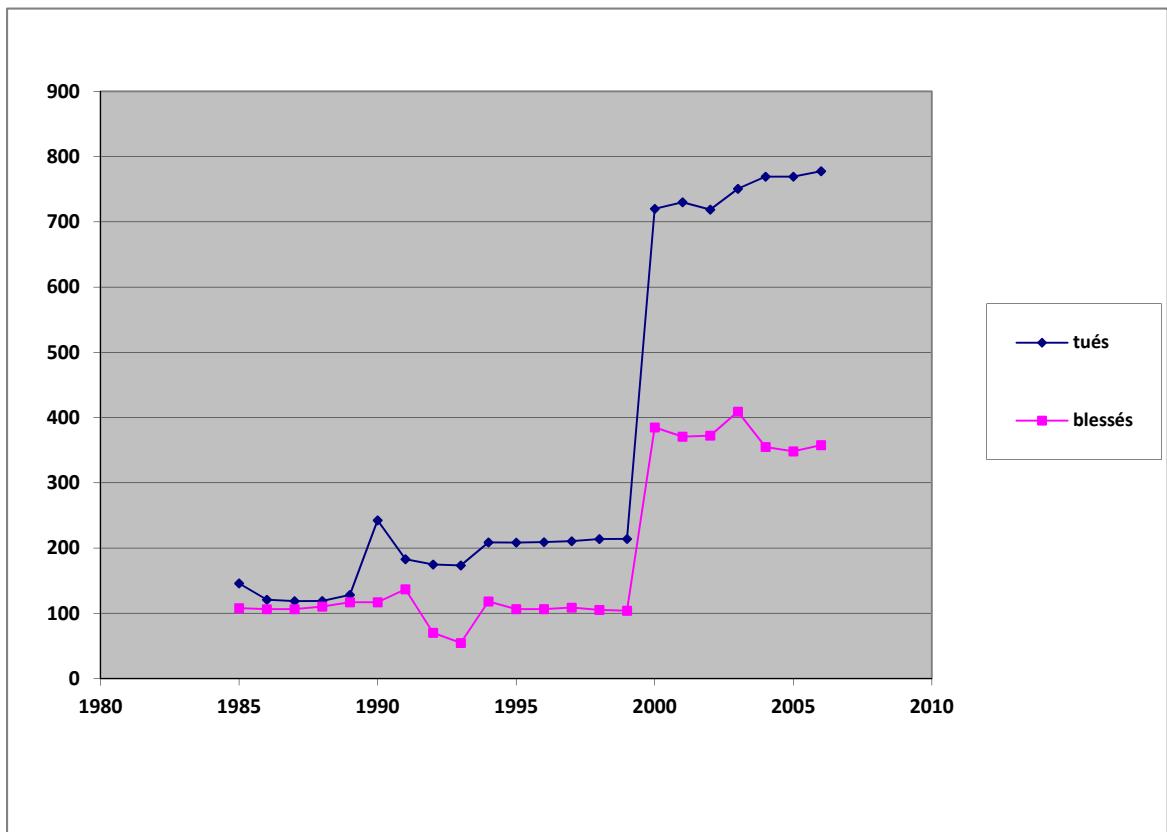


Figure 5-8 : Évolution du nombre de morts et de blessés aux Antilles

Le nombre de sans-abri augmente puis diminue sur la période étudiée, on ne peut donc pas confirmer une tendance (Figure 5-9).

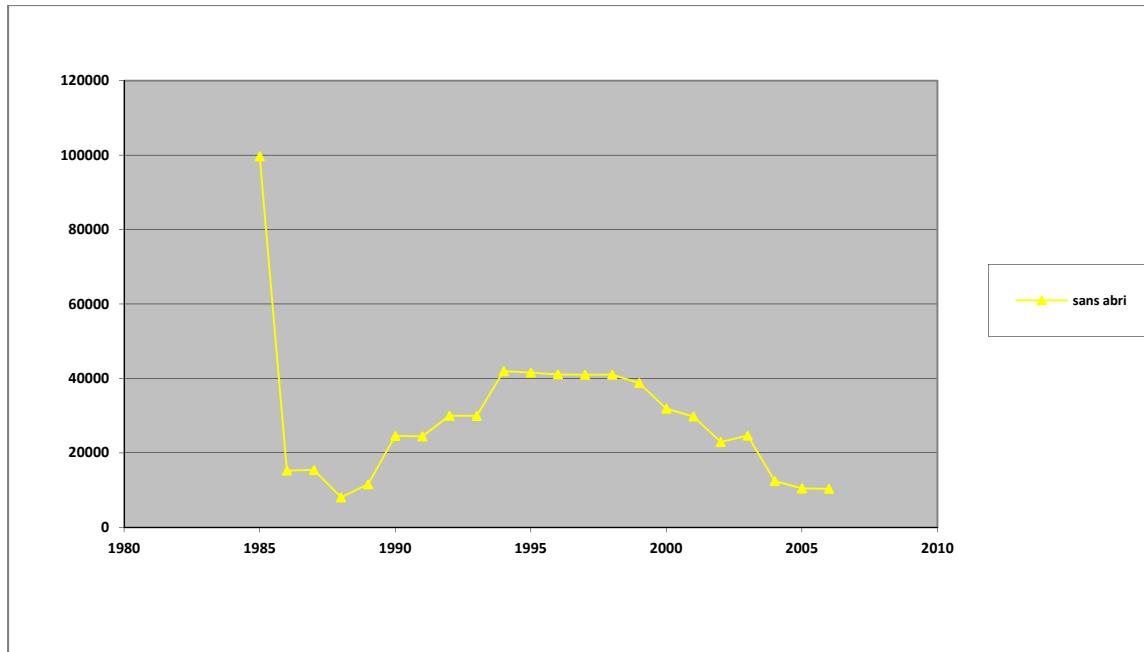


Figure 5-9 : Évolution du nombre de sans-abris aux Antilles

Par contre, le nombre de personnes affectées et le montant des dommages économiques sont en nettes augmentation, puisque le premier chiffre triple en trente ans, tandis que le second est multiplié par 7 sur la même période (Figure 5-10 et Figure 5-11).

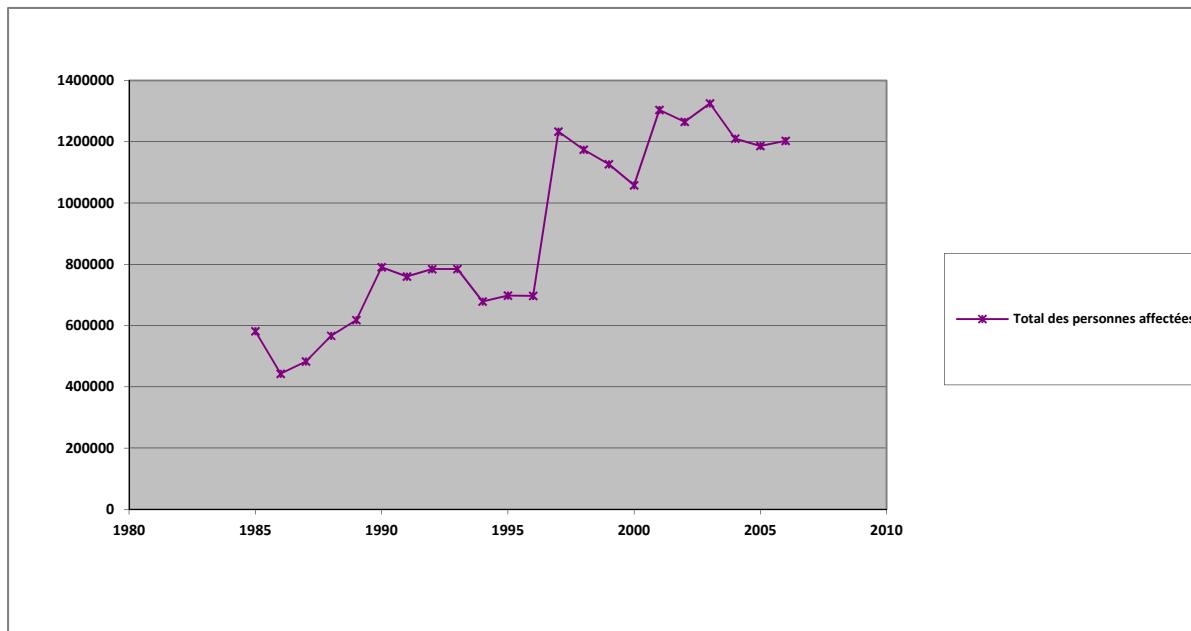


Figure 5-10 : Évolution du nombre de personnes affectées aux Antilles

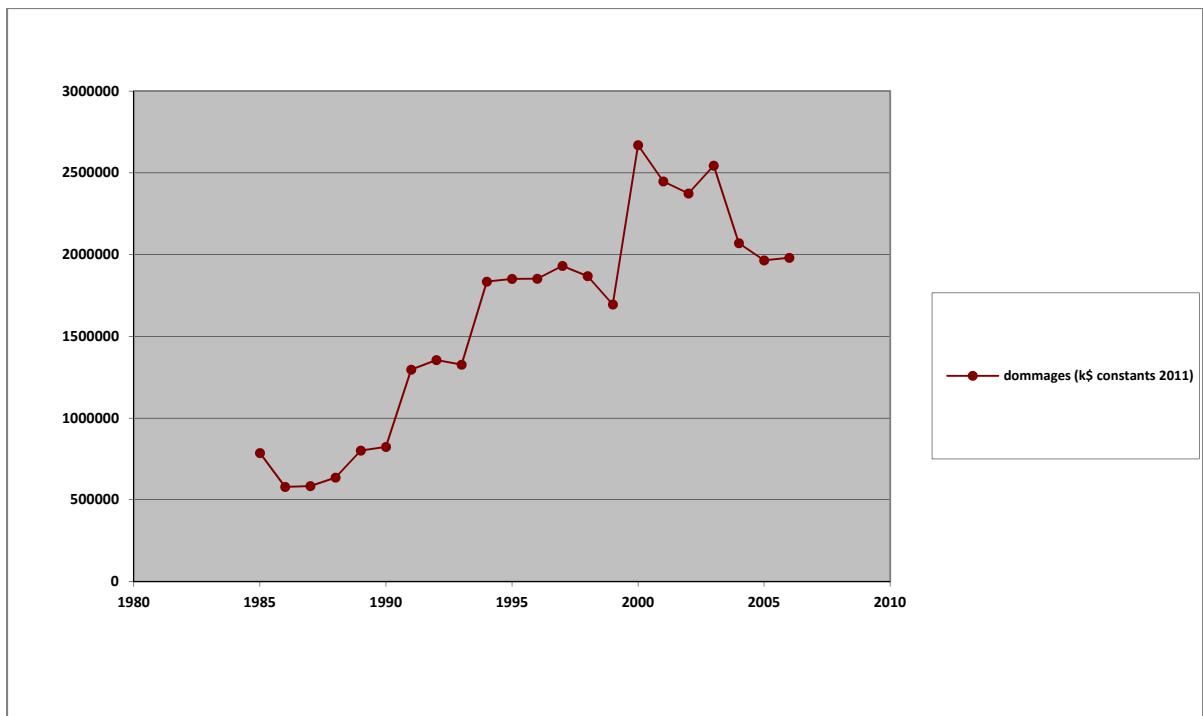


Figure 5-11 : Évolution des dommages économiques aux Antilles

## ANNEXE V

### ÉVOLUTION DES DÉGÂTS EN AMÉRIQUE CENTRALE

On constate pour l'Amérique Centrale une stabilité du nombre de morts et une forte diminution du nombre de blessés (Figure 5-12).

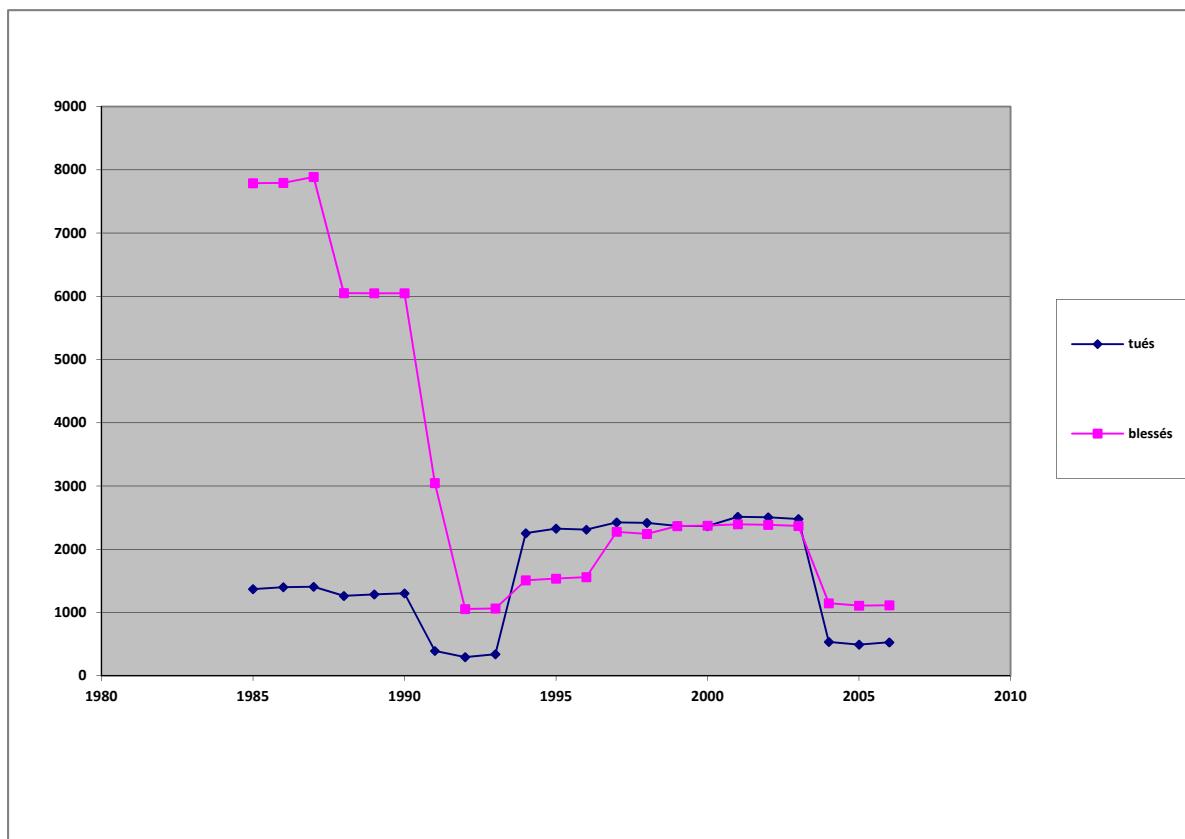


Figure 5-12 : Évolution du nombre de morts et de blessés en Amériques Centrale

Le nombre de sans-abri est stable lui aussi (Figure 5-13).

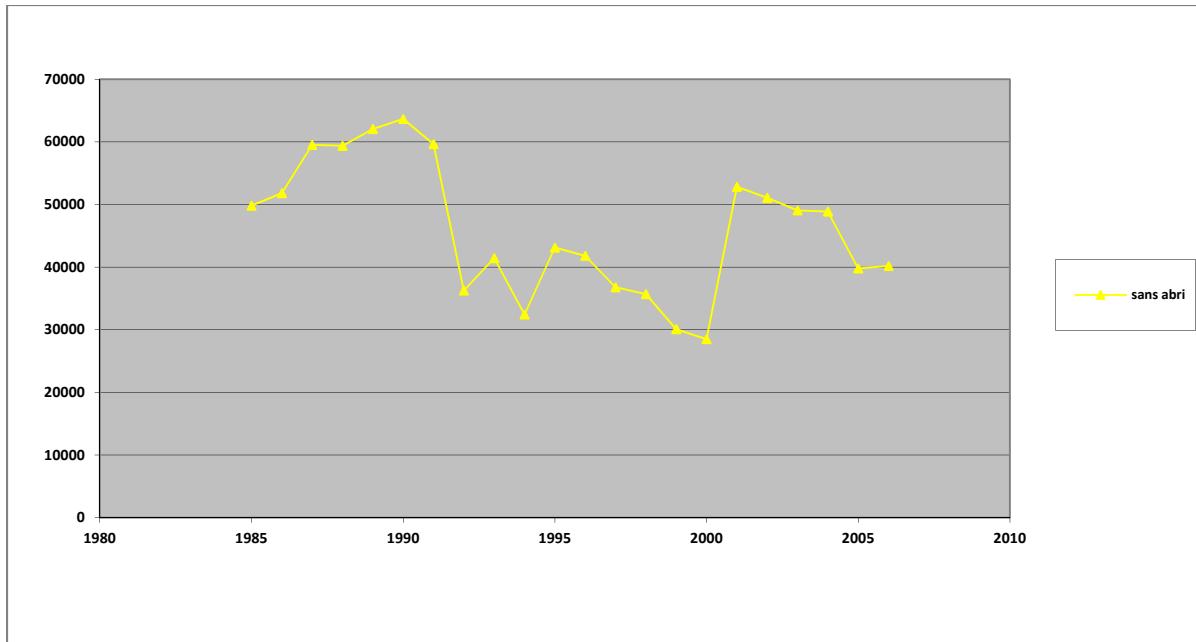


Figure 5-13 : Évolution du nombre de sans abris en Amérique Centrale

Dans cette région aussi, le nombre de personnes affectées ainsi que la somme des dégâts économiques connaît une forte augmentation, le premier étant multiplié par 4 et le second par 3 (Figure 5-14 et Figure 5-15).

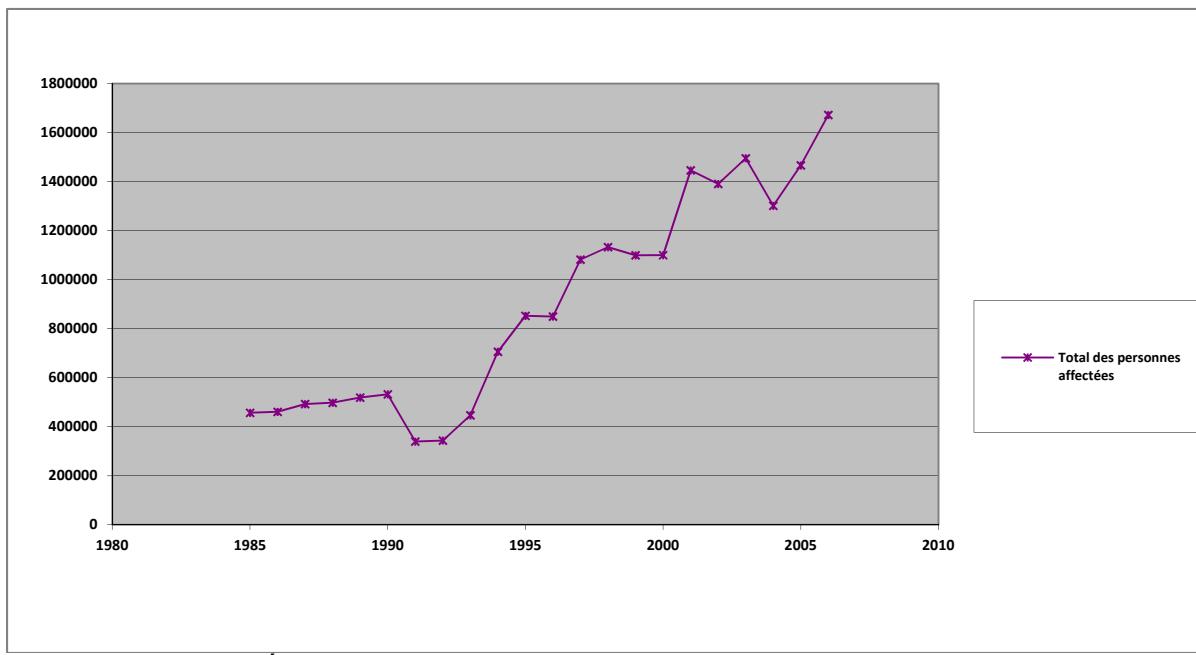


Figure 5-14 : Évolution du nombre de personnes affectées en Amérique Centrale

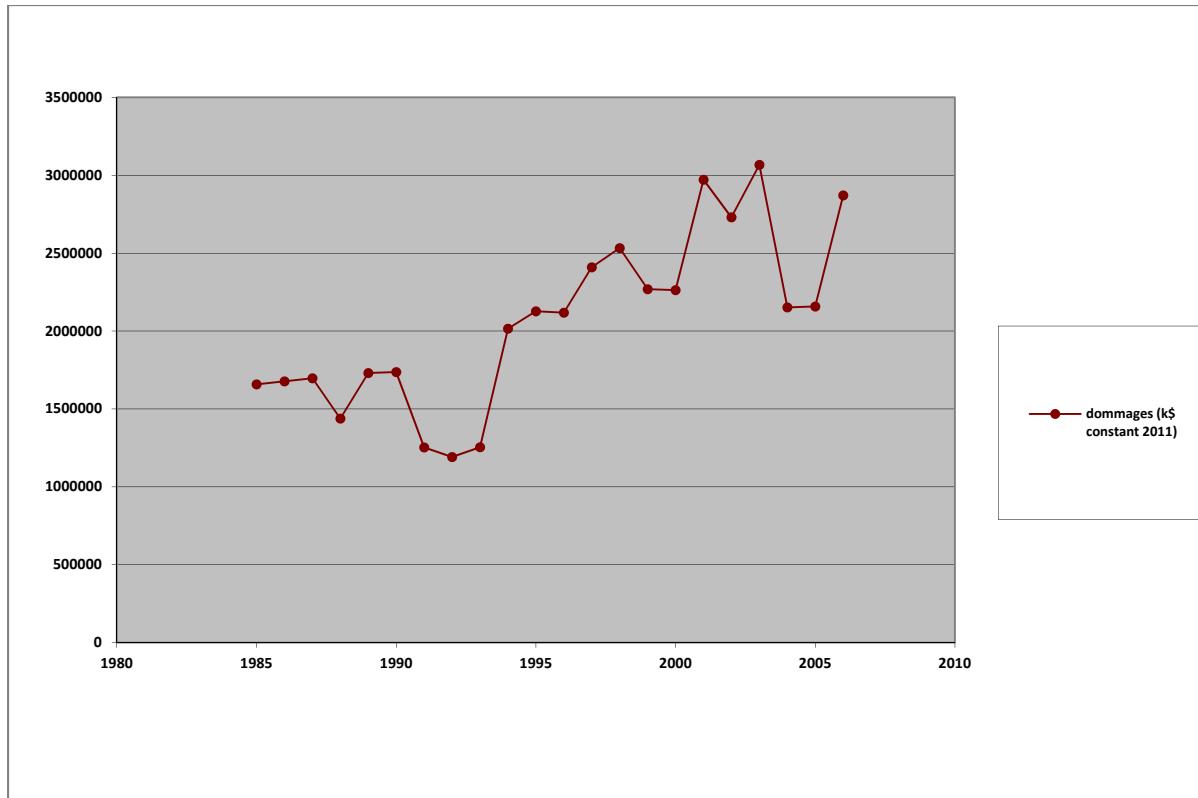


Figure 5-15 : Évolution des dommages économiques en Amérique Centrale

## ANNEXE VI

### RÉPARTITION DES DÉGÂTS AUX ANTILLES

Dans les Antilles, la répartition est très différente pour les différents types de dégâts, comparée à la répartition de la population (Figure 5-16).

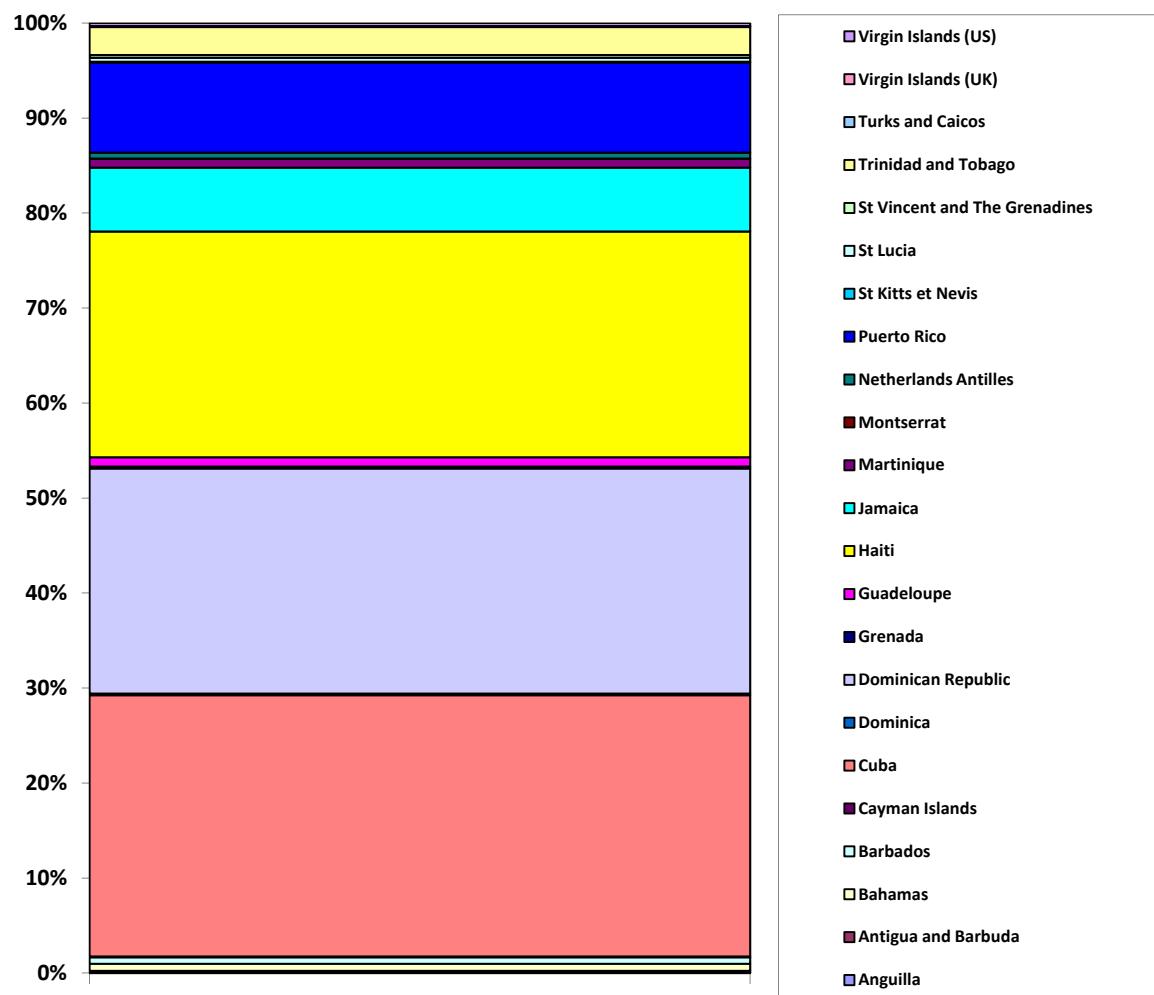


Figure 5-16 : Proportion de chaque pays dans la population totale des Antilles

Les morts sont beaucoup plus nombreux à Haïti que dans le reste de la région comme on le voit ci-dessous (Figure 5-17)

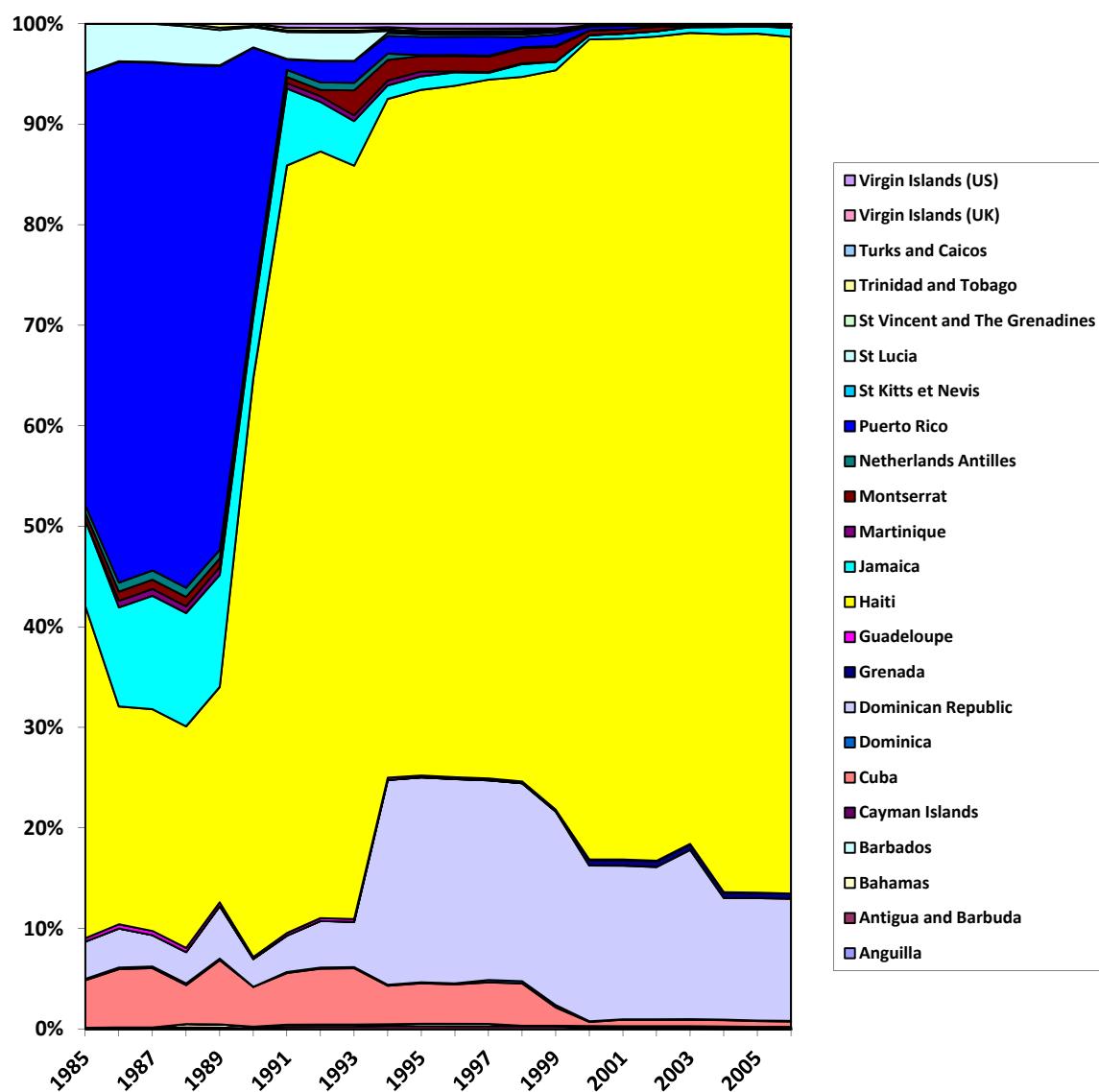


Figure 5-17 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des morts

Les blessés également, malgré un événement en République Dominicaine en 1998 (Figure 5-18).

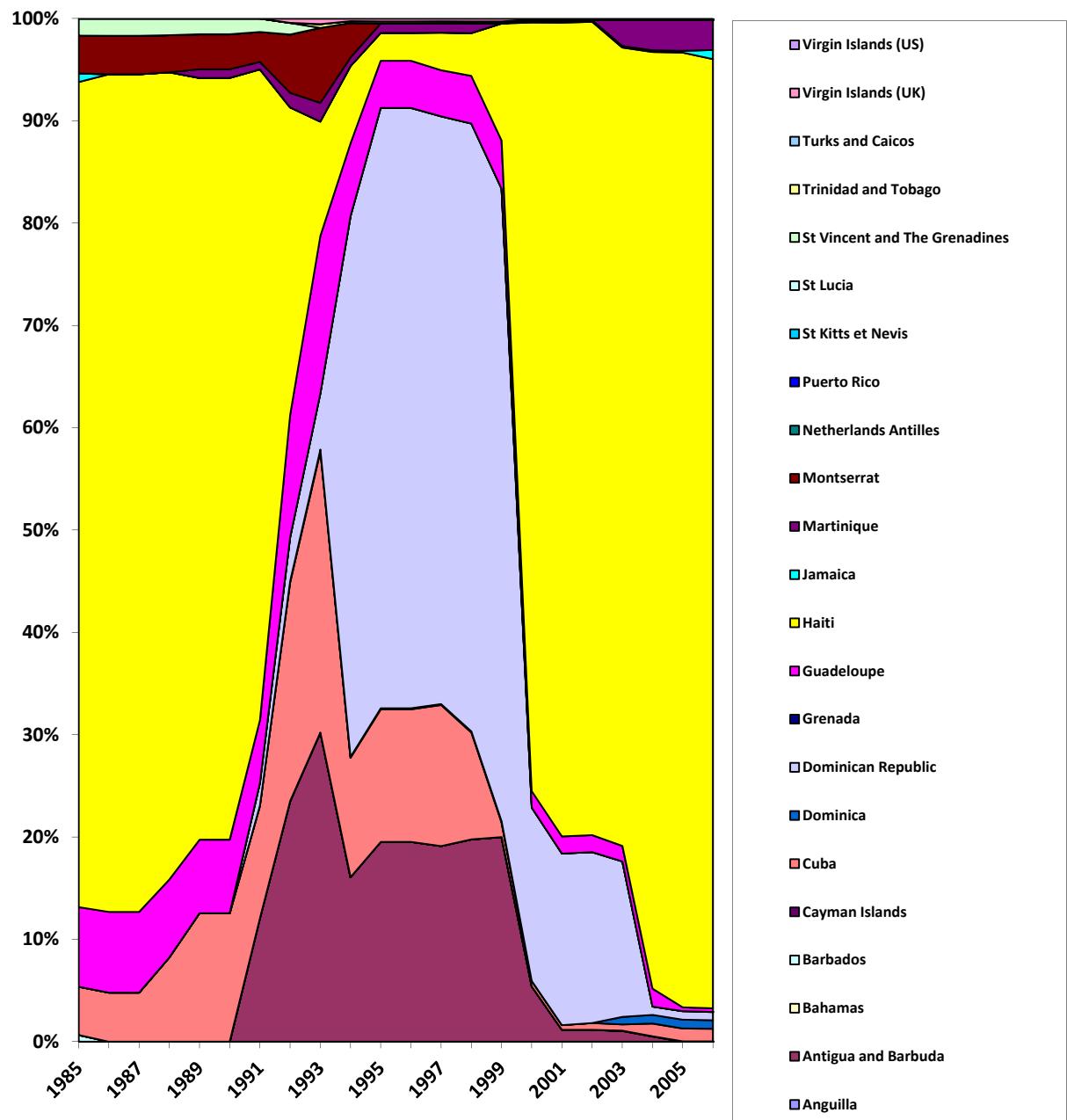


Figure 5-18 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des blessés

Les sans-abri ainsi que les personnes affectées sont quant à elles réparties entre Haïti, Cuba et la République Dominicaine (Figure 5-19 et Figure 5-20).

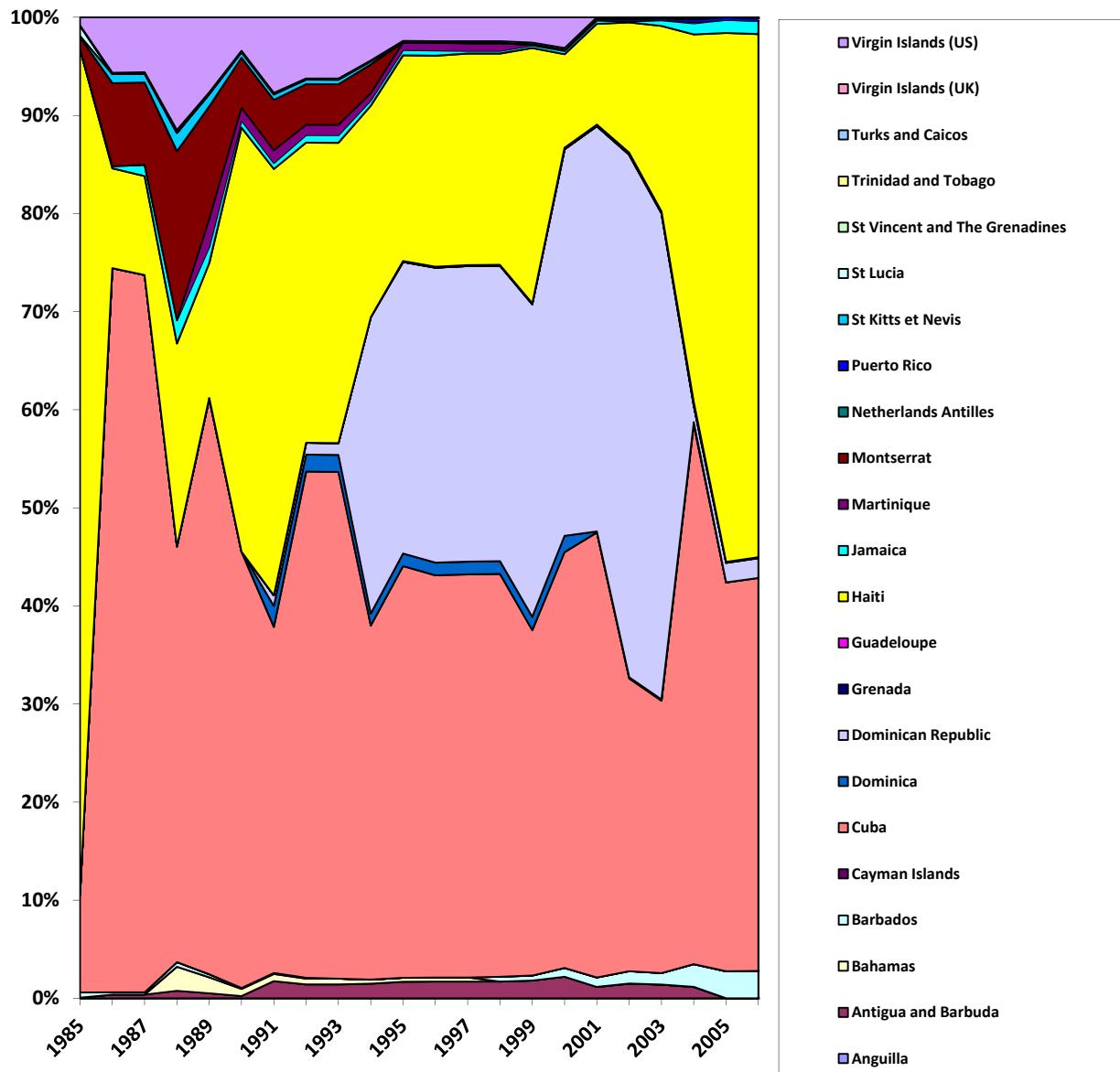


Figure 5-19 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des sans-abris

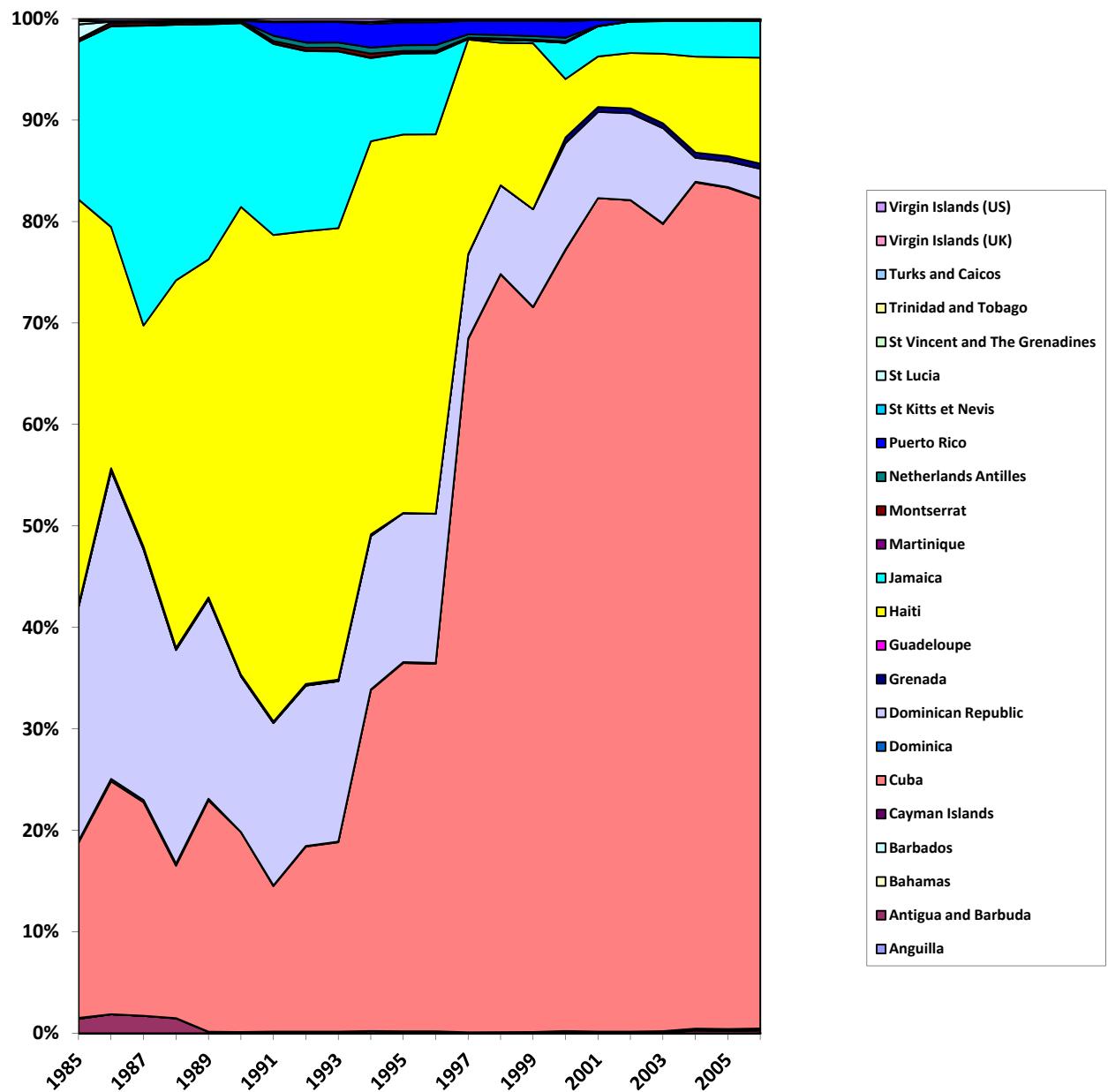


Figure 5-20 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des personnes affectées

On constate enfin que la répartition des dommages économiques semblent relativement équitable entre les différents pays, et totalement indépendante de la taille du pays (Figure 5-21).

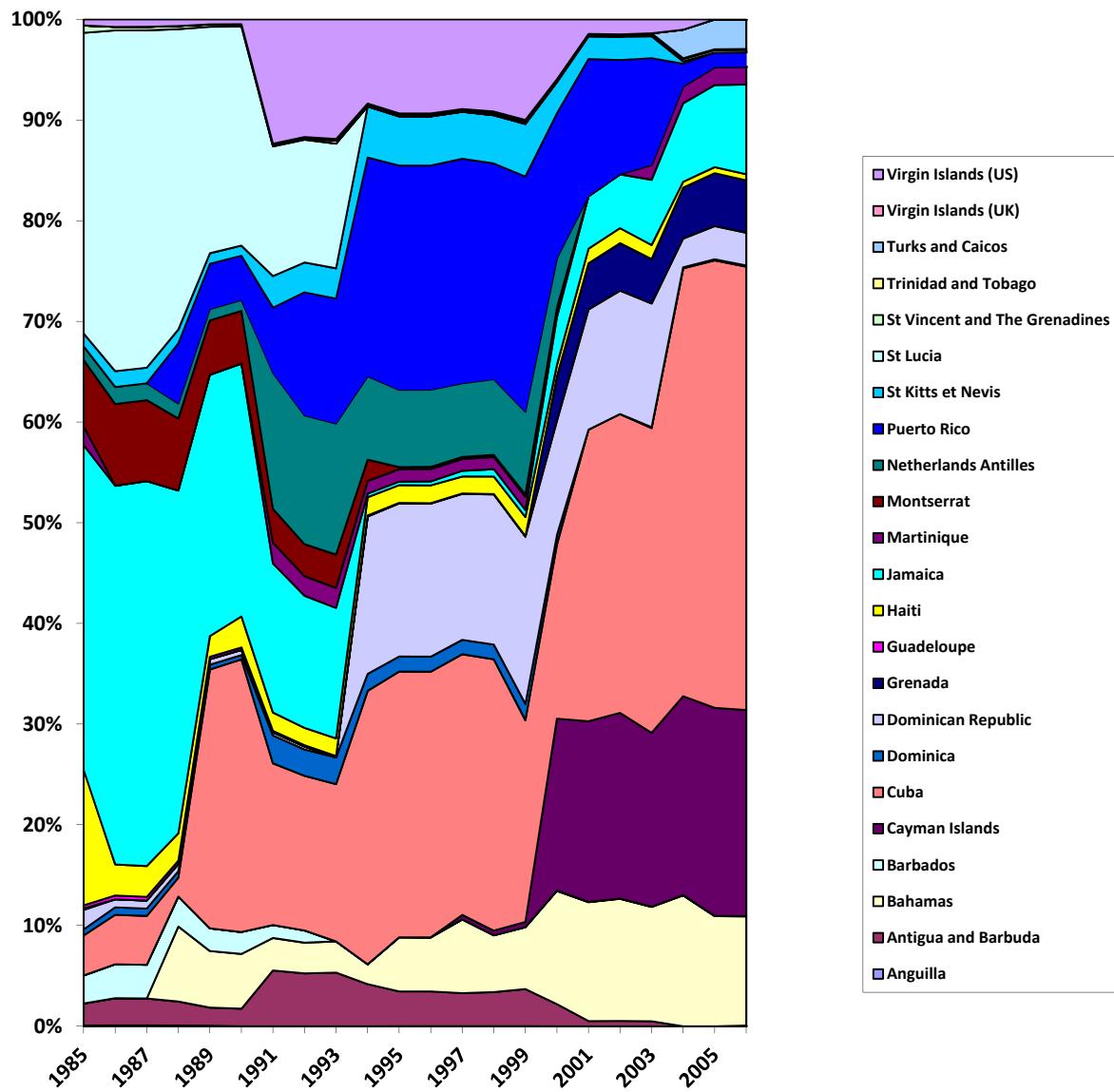


Figure 5-21 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des dommages économiques

**ANNEXE VII****RÉPARTITION DES DÉGÂTS EN AMÉRIQUE CENTRALE**

En Amérique Centrale, on comparera également la répartition des dégâts constatés avec la proportion de chaque pays dans la population totale de la région (Figure 5-22).

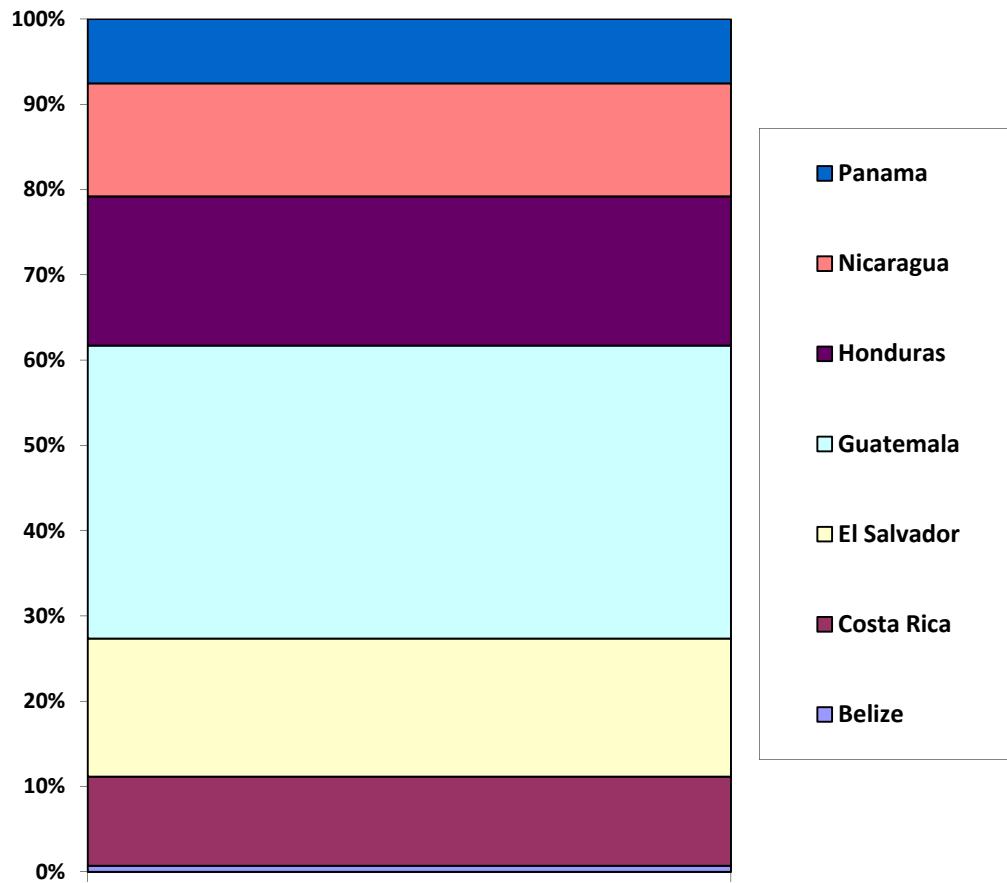


Figure 5-22 : Proportion de chaque pays dans la population totale de l'Amérique Centrale  
Les répartitions sont beaucoup plus irrégulières dans le temps, notamment pour le nombre de morts (Figure 5-23) et de blessés (Figure 5-24).

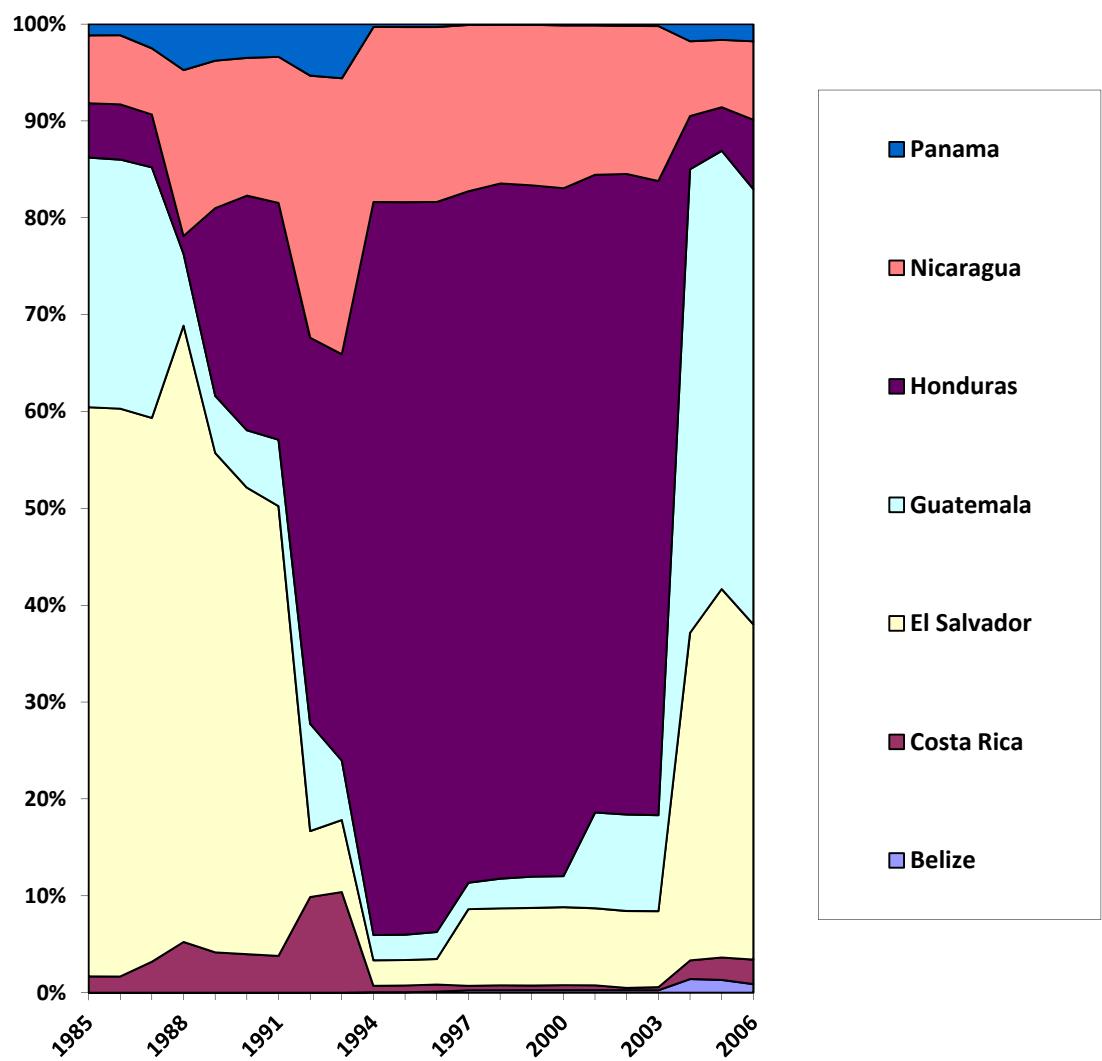


Figure 5-23 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des morts

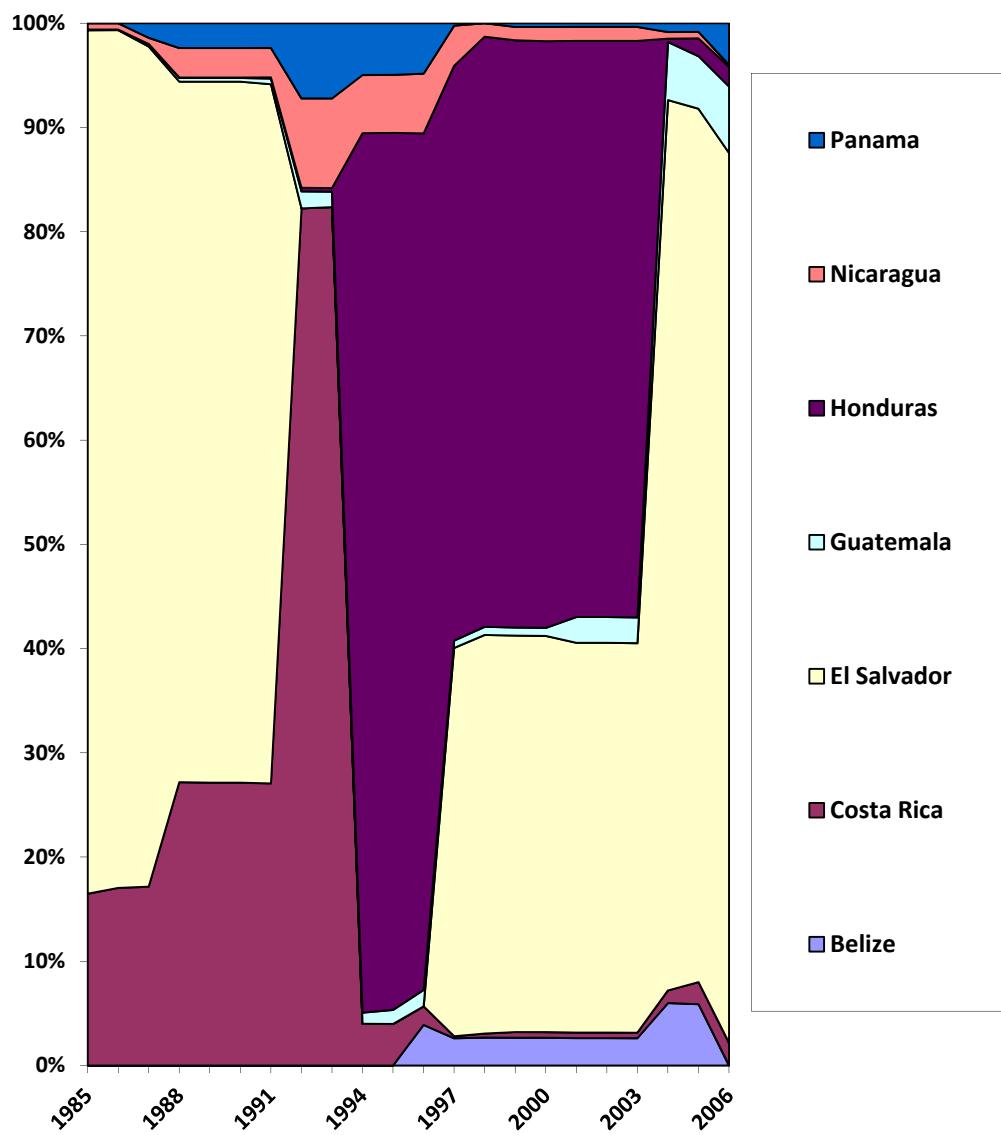


Figure 5-24 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des blessés

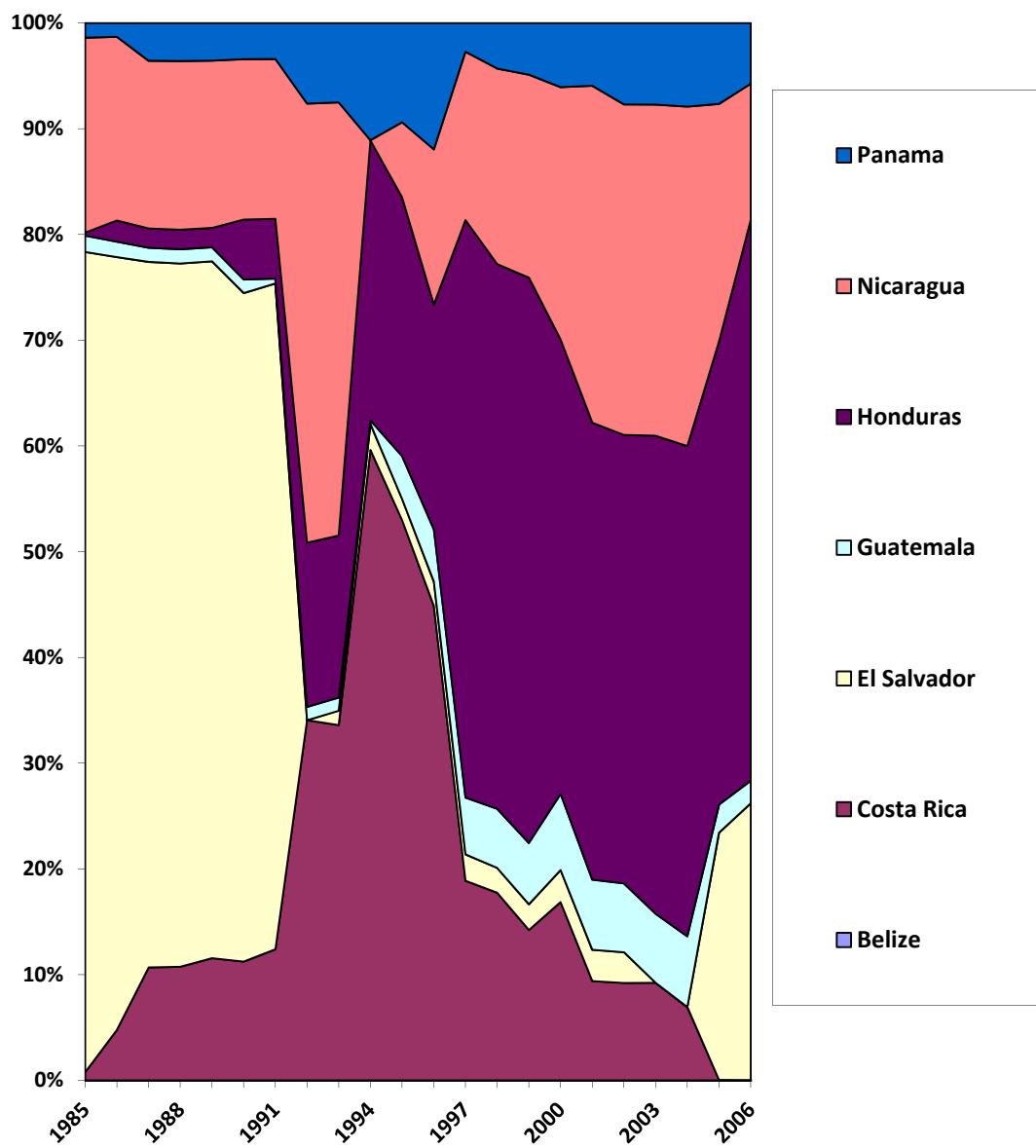


Figure 5-25 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des sans-abris

La répartition du nombre de personnes affectées (Figure 5-26) et des dommages économiques (Figure 5-27) semble plus régulières.

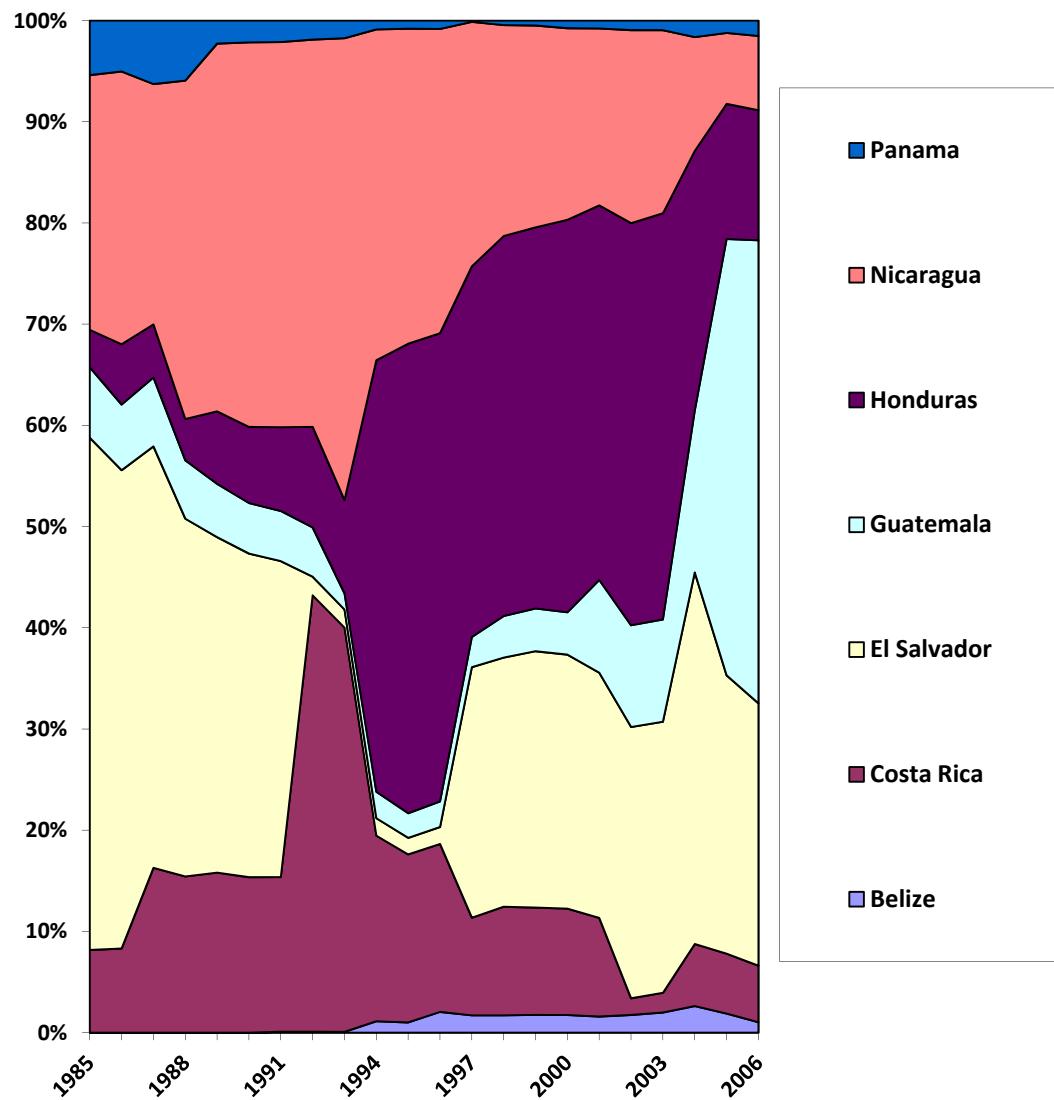


Figure 5-26 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des personnes affectées

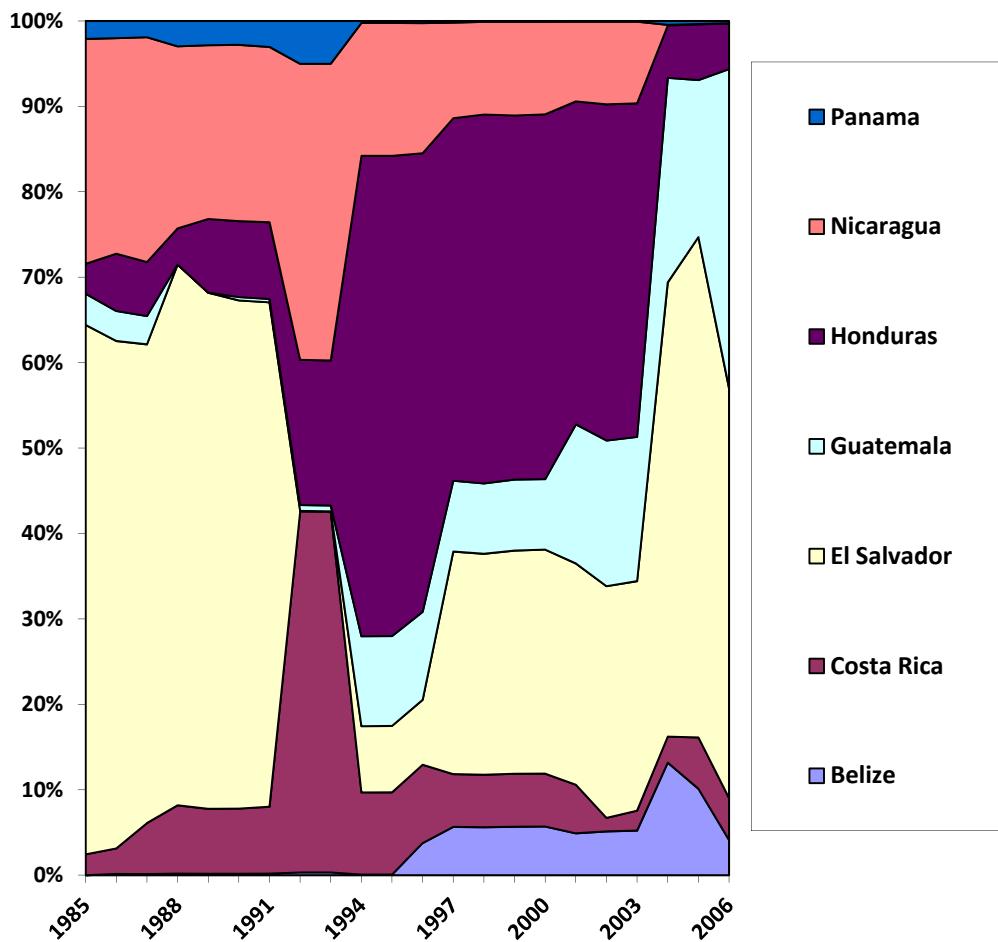


Figure 5-27 : Proportion de chaque pays dans le total annuel des dommages économiques

On peut constater que les différentes catégories semblent se corréler de façon plus prononcée entre elles, et que l'ensemble de ces dommages semblent proportionnels à la population du pays, à l'exception notable du Guatemala, qui semble beaucoup moins touché par les catastrophes naturelles que les autres pays.

## ANNEXE VIII

### APPLICATION DU PROGRAMME LINGO DE LA PHASE 3 AUX INONDATIONS DU PAKISTAN EN 2010

On calcule d'abord la solution avec un (1) CDL, qui situe celui-ci à Charsadda (voir Figure 44)

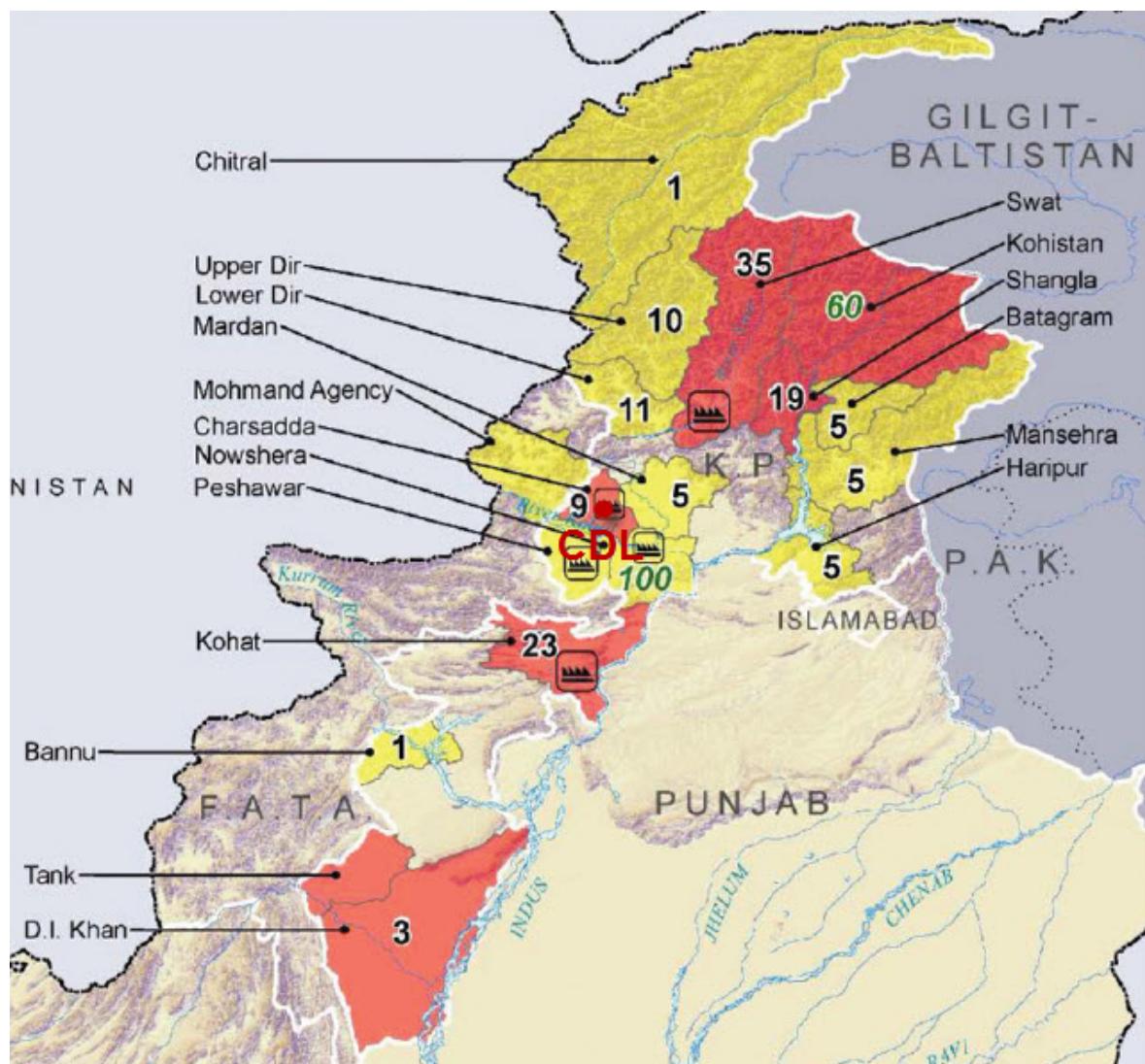


Figure 5-28 : Centre de Distribution Local situé à Charsadda

Puis en autorisant deux (2) CDL qui sont placés à D.I. Khan et Mardan (Figure 45) .

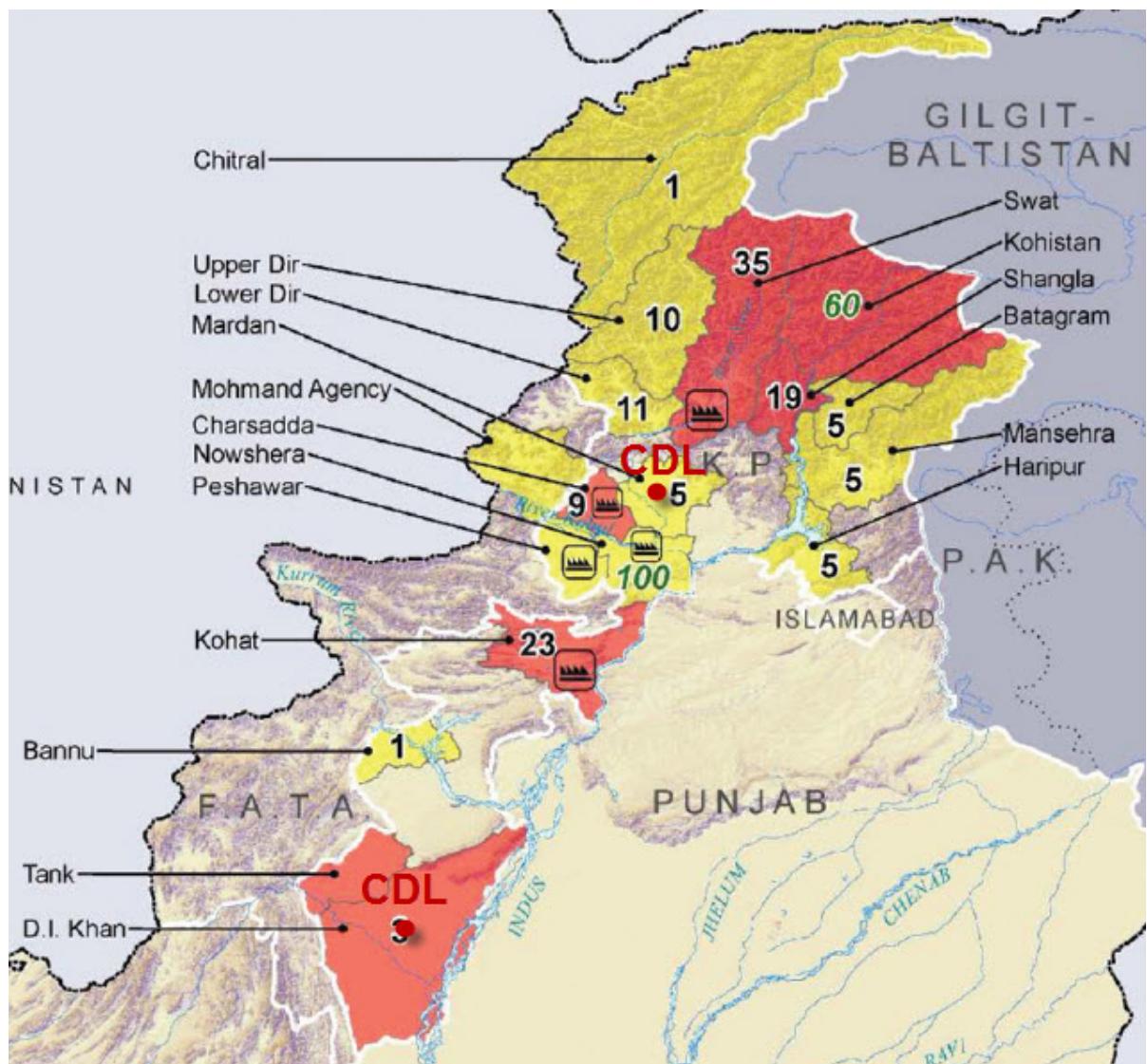


Figure 5-29 : Emplacements des deux CDL

Et enfin en autorisant trois (3) CDL, qui sont placés à Swat, Charsadda, et D.I. Khan (Figure 46).

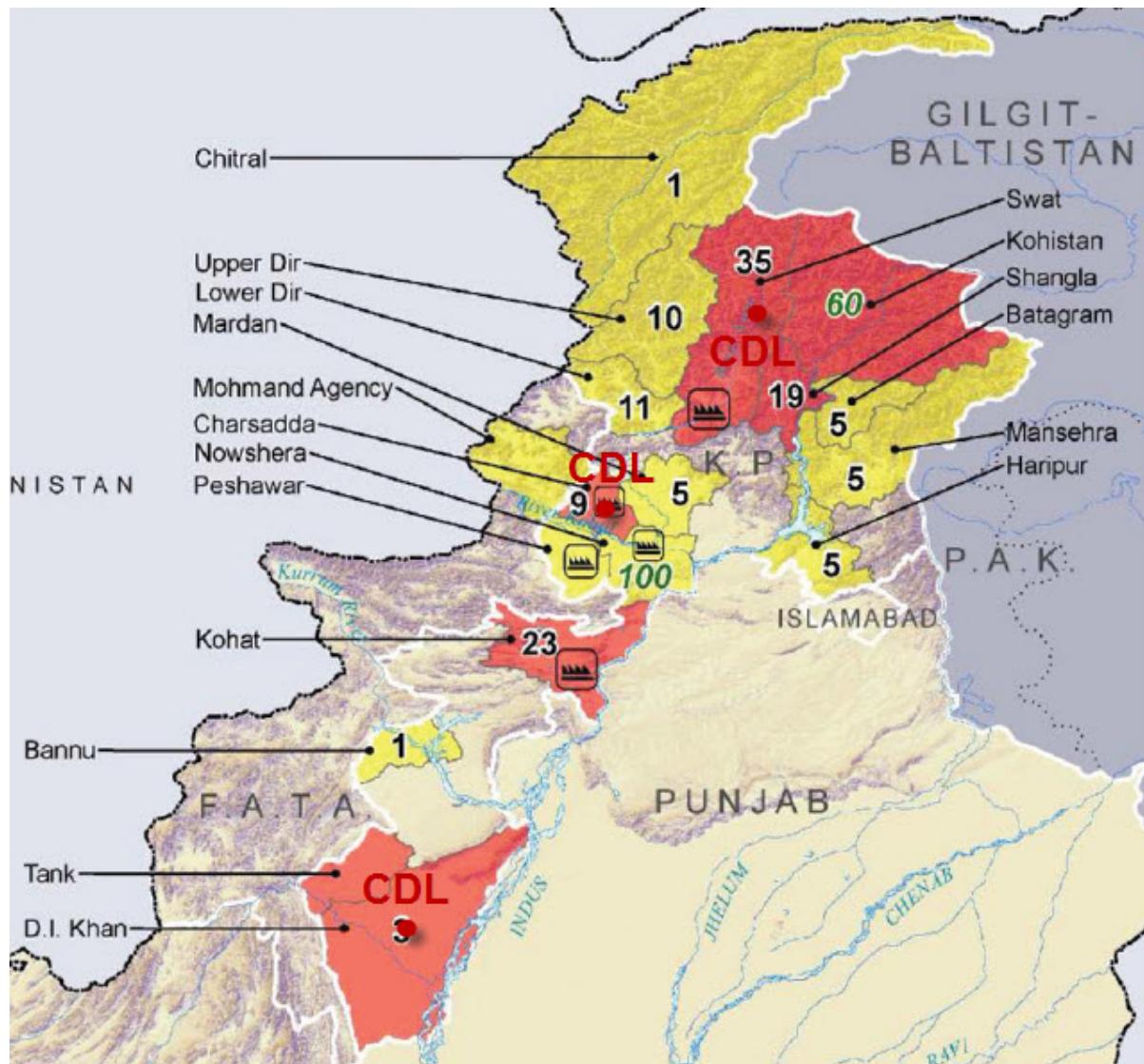


Figure 5-30 : Emplacement des trois CDL

Le calcul de ces solutions est très rapide, ce qui permet d'explorer différent scénarios avant de décider lequel choisir.

En utilisant le deuxième modèle, qui minimise le nombre de CDL en garantissant une distance maximale au CDL. On définit d'abord la limite de distance à 300 km. Dans ce cas, un seul CDL est suffisant, il est situé à Charsadda (voir la Figure 47).

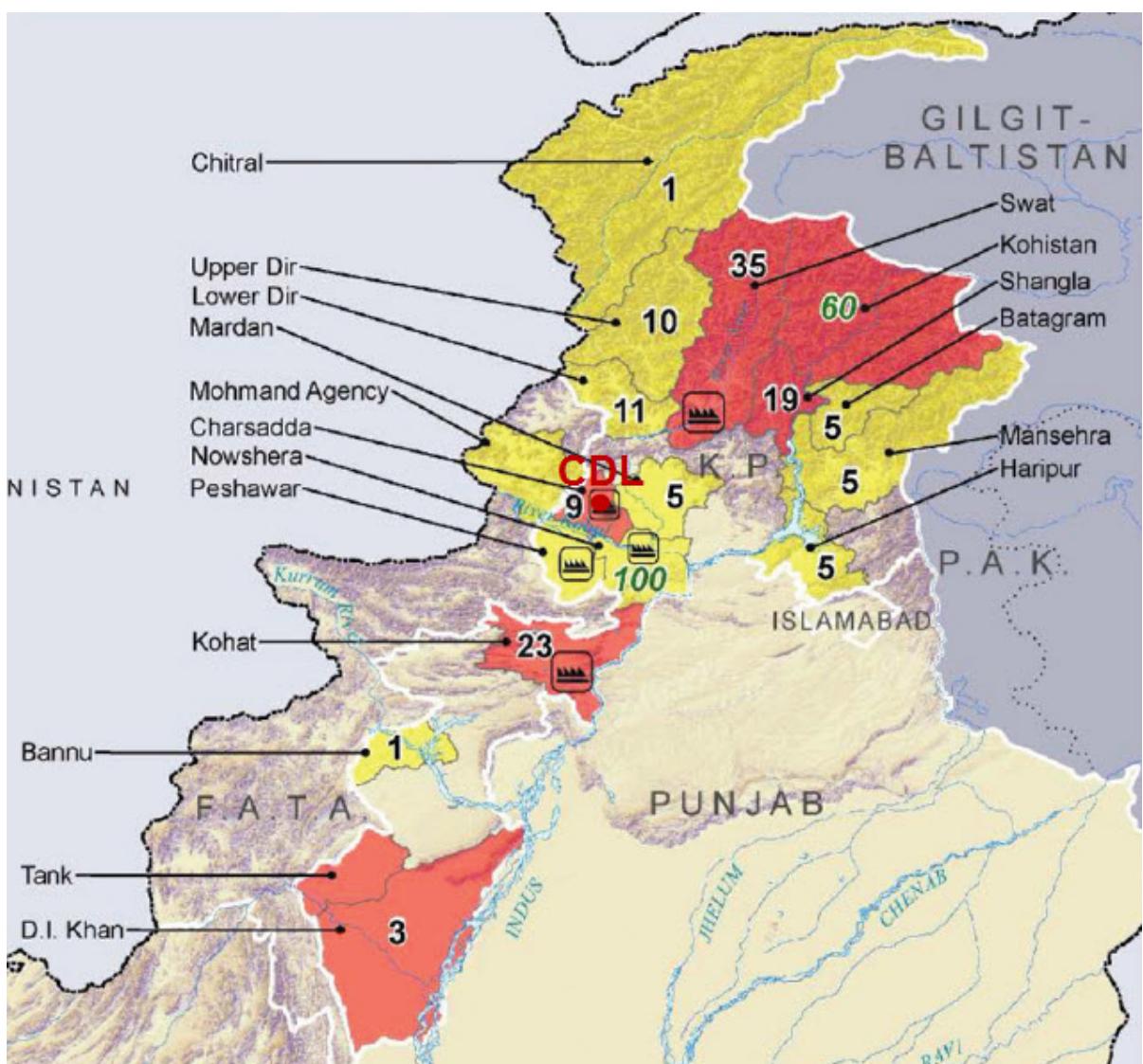


Figure 5-31 : Répartition des CDL pour une distance maximale de 300 km

En réglant la distance maximale à 200 km, on a deux CDL, Charsadda et Tank (Figure 48).

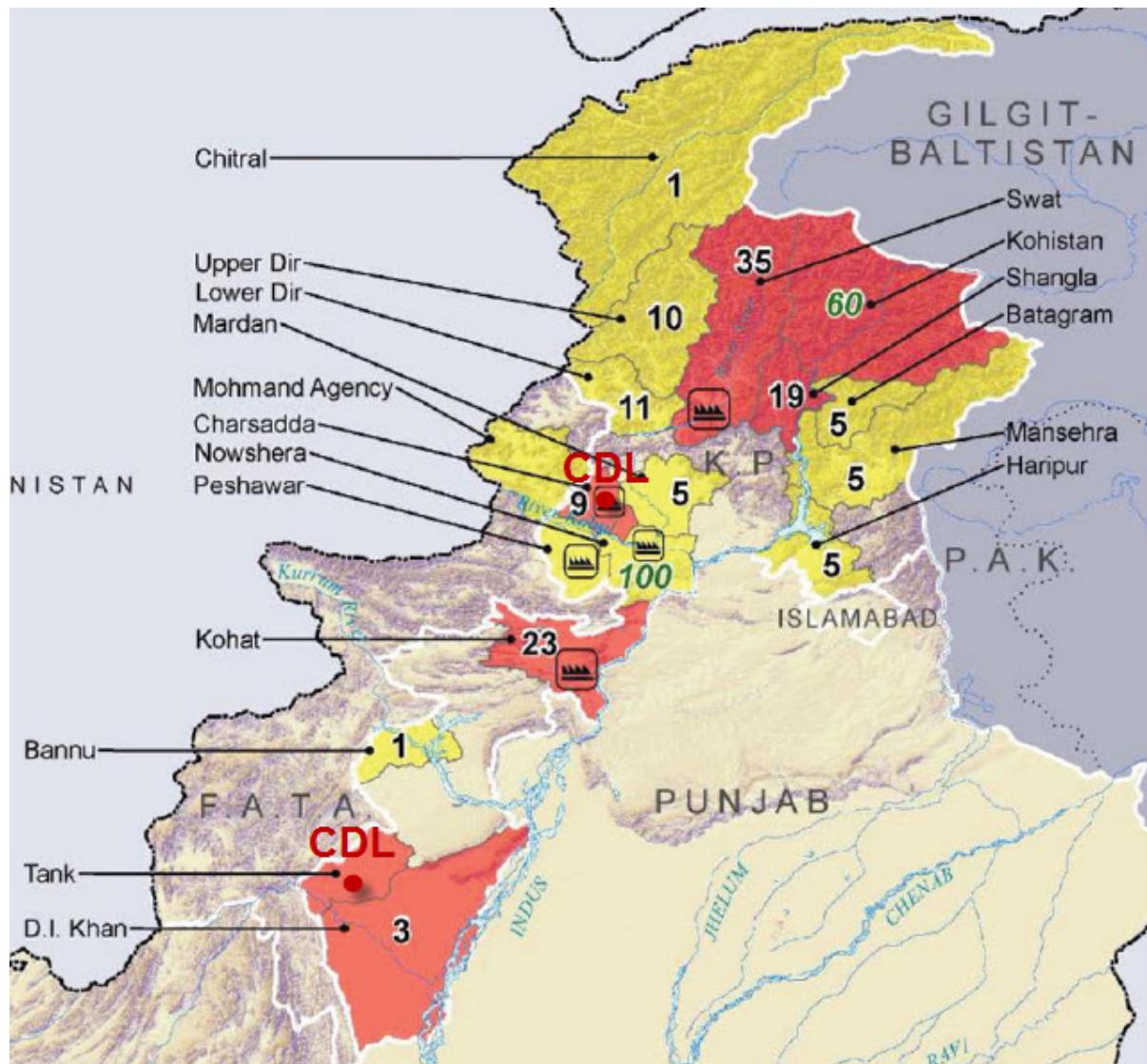


Figure 5-32 : Répartition des CDL pour une distance maximale de 200 km

En réglant la distance maximale à 100 km, on obtient 4 CDL à Kohat, Tank Upper Dir et Batagram (Figure 49)

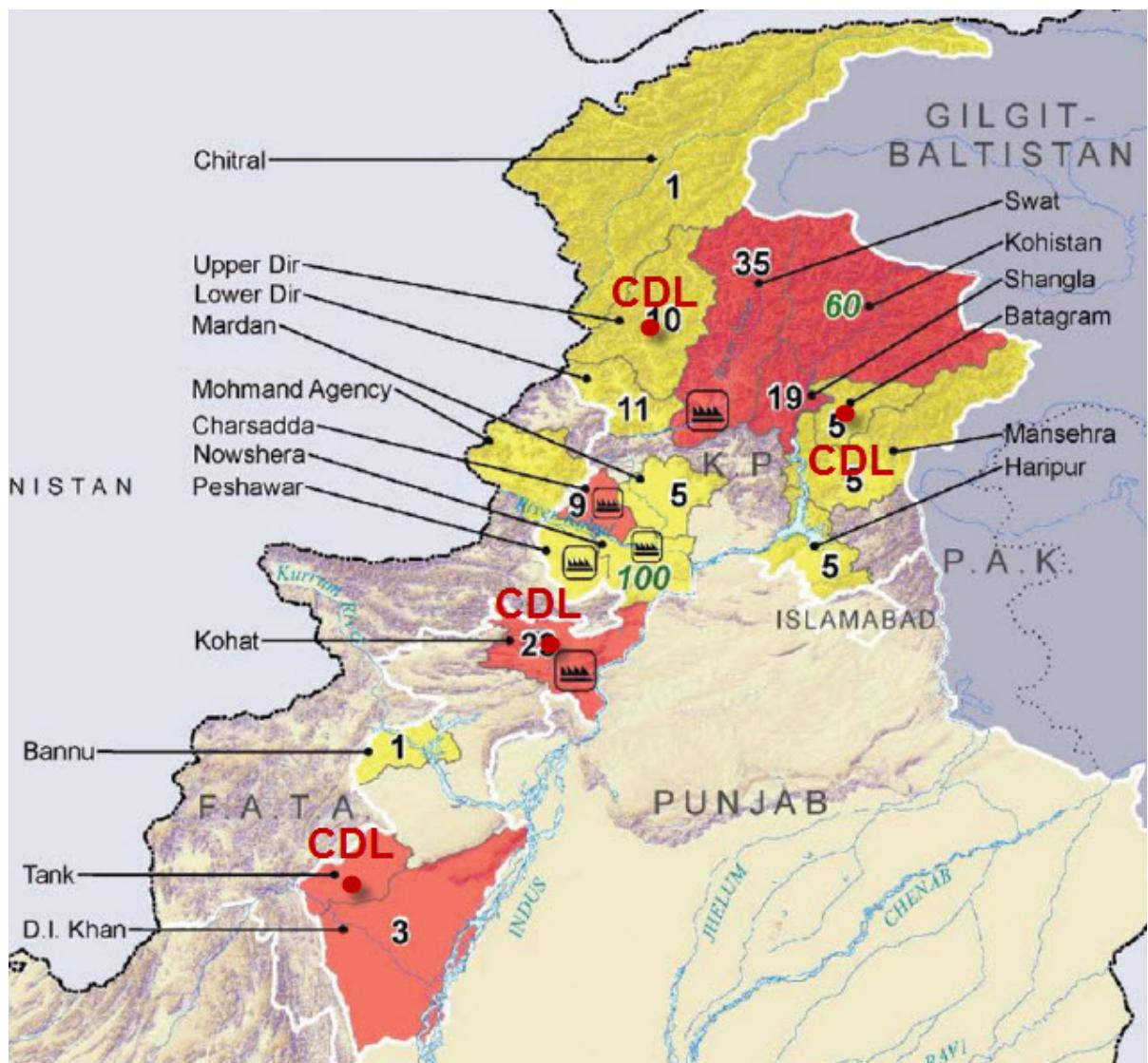


Figure 5-33 : Répartition des CDL pour une distance maximale de 100 km

## BIBLIOGRAPHIE

Alcantara-Ayala, I. (2002). "Geomorphology, natural disasters, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries." Geomorphology **47**(2002): 107-124.

Alexander, D., Ed. (1993). Natural Disasters. New York.

Balcik, B., B. M. Beamon, et al. (2008). "Last Mile Distribution in Humanitarian Relief." Journal of Intelligent Transportation Systems **12**(2008): 51-63.

Barbarasoglu, G., L. Özdamar, et al. (2002). "An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations." European Journal of Operational Research(140): 118-133.

Berkoune, D., J. Renaud, et al. (2011). "Transportation in disaster response operations." Socio-Economic Planning Science(2011): 1-10.

Brown, G. G. and A. L. Vassiliou (1993). "Optimizing Disaster Relief : Real-Time Operational and Tactical Decision Support." Naval Research Logistics **40**: 1-23.

Chang, M.-S., Y.-L. Tseng, et al. (2007). "A scenario planning approach for the flood emergency logistics preparation problem under uncertainty." Transportation Research Part E(43): 737-754.

CRED (2011). EM-DAT: The OFDA/CRED International Disaster Database. Université Catholique de Louvain – Brussels – Belgium.

Darcy, J. and C.-A. Hofmann (2003). "Humanitarian needs assessment and decision-making." Humanitarian Policy Group **13**(2003): 1-6.

Denis, H., Ed. (2002). La réponse aux catastrophes, Presses Internationales Polytechnique.

Gendreau, M., G. Laporte, et al. (1996). "Stochastic vehicle routing." European Journal of Operational Research **88**(1996): 3-12.

Giovinazzi, S. and S. Lagomarsino (2003). "Seismic Risk : a method for the vulnerability assessment of built-up areas."

- Haque, C. E. (2002). "Perspectives of Natural Disasters in East and South Asia, and the Pacific Island States: Socio-economic Correlates and Needs Assessment." Natural Hazards Review **29**(2003): 465-483.
- Katz, R. (2002). "Stochastic Modeling of Hurricane Damage." Journal of Applied Meteorology **41**(2002): 754-762.
- Lin, Y.-H., R. Batta, et al. (2009). "A logistics model for delivery of critical items in a disaster relief operation : heuristic approaches." Transportation Research Part E.
- Mediterranean, W. H. O. R. O. f. t. E. (2011). "The WHO e-atlas of disaster risk." from <http://www.emro.who.int/eha/e-atlas.htm>.
- Okada, S. and N. Takai (1999). "Classifications of Structural Types and Damage Patterns of Buildings for Earthquake Field Investigation." Journal of Structural and Construction Engineering(1999).
- Oloruntoba, R. and R. Gray (2006). "Humanitarian aid: an agile supply chain?" Supply Chain Management: An International Journal **11**: 115-120.
- Ozbay, K. and E. E. Ozguven (2007). "Stochastic Humanitarian Inventory Control Model for Disaster Planning." Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board **2022**(2007): 63-75.
- Özdamar, L., E. Ekinci, et al. (2004). "Emergency Logistics Planning in Natural Disasters." Annals of Operations Research(129): 217-245.
- Pielke, R. A. J., J. Rubiera, et al. (2003). "Hurricane Vulnerability in Latin America and The Caribbean : Normalized Damage and Loss Potentials." Natural Hazards Review **4**(Aug 2003): 101-114.
- Pinelli, J.-P., E. Simiu, et al. (2004). "Hurricane Damage Prediction Model for Residential Structures." Journal of Structural Engineering(2004): 1685-1691.
- Planitz, A. (1999). "A Guide To Successful Damage And Needs Assessment." South Pacific Disaster Reduction Program.
- Powell, G. and R. Allahabadi (1988). "Seismic damage prediction by deterministic methods : concepts and procedures." Earthquake Engineering and Structural Dynamics **16**(1988): 719-734.
- Quarantelli, E. L. (2001). "Statistical and conceptual problems in the study of disasters." Disaster Prevention and Management **10**(2001): 325-338.

Redmond, A. (2005). "Needs assessment of humanitarian crises." [British Medical Journal](#) **330**(June 2005): 1320-1322.

Reliefweb (2010a). "Haiti Earthquakes - Affected population (as of 12 Jan 2010)." Retrieved 30/06/11, 2011, from <http://reliefweb.int/node/15256>.

Reliefweb (2010b). "Pakistan: Khyber Pakhtunkhwa - Floods Impact Profile (as of 30 Jul 2010)." Retrieved 30/06/11, 2011, from <http://reliefweb.int/node/17292>.

Sforza, A. and C. Sterle (2010). An Introduction to Critical Infrastructure Protection : Problems and Models. [CIRRELT Joint Seminar](#).

Sheu, J.-B. (2007). "An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters." [Transportation Research Part E](#)(43): 687-709.

Sklaver, B. (2003). "Humanitarian Daily Rations : The need for evaluation and guidelines." [Disasters](#) **27**(2003): 259-271.

Sugimoto, T., H. Murakami, et al. (2003). "A Human Damage Prediction Method for Tsunami Disasters Incorporating Evacuation Activities." [Natural Hazards Review](#) **29**(2003): 585-600.

Teodorovic, D. and G. Pavkovic (1996). "The fuzzy set theory approach to the vehicle routing problem when demand at nodes is uncertain." [Fuzzy Sets and Systems](#) **82**(1996): 307-317.

Teodorovic, D. and G. Radivojevic (2000). "A fuzzy logic approach to dynamic Dial-A-Ride problem." [Fuzzy Sets and Systems](#) **116**(2000): 23-33.

Thomalla, F., T. Downing, et al. (2006). "Reducing hazard vulnerability : towards a common approach between disaster risk reduction and climate adaptation." [Disasters](#) **30**(30): 39-48.

Ukkusuri, S. V. and W. F. Yushimito (2008). "Location Routing Approach for the Humanitarian Prepositioning Problem." [Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board](#) **2089**(2008): 18-25.

Wei, Y.-M., Y. Fan, et al. (2003). "The assessment of vulnerability to natural disasters in China by using the DEA method." [Environmental Impact Assessment Review](#)(2004): 427-439.

Weichselgartner, J. (2001). "Disaster mitigation : the concept of vulnerability revisited." [Disaster Prevention and Management](#) **10**(2001): 85-94.

Yi, W. and A. Kumar (2007). "Ant colony optimization for disaster relief operations." Transportation Research Part E(43): 660-672.

Yi, W. and L. Özdamar (2007a). "A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities." European Journal of Operational Research(179): 1177-1193.

Yi, W. and L. Özdamar (2007b). Fuzzy Modeling for Coordinating Logistics in Emergencies: 24.