APPLICATION AU CAS DE LA GESTION DES CATASTROPHES RECURRENTES AU P E RO U.

Ce chapitre propose de confronter l'ensemble des propositions faites dans ce document au cas réel du Pérou. En effet, ce pays subit régulièrement les affres de la nature (inondations, tremblements de terre, vagues de froid, etc.) et se doit de disposer d'une Chaîne Logistique Humanitaire (CLH) efficientes et résilientes.

Concrètement, nous commencerons par présenter les caractéristiques du cas d'étude. Puis nous montrerons comment l'utilisation de nos premières contributions a permis de bâtir des scénarios réalistes de demande permettant d'alimenter utilement nos outils d'aide à la décision. La dernière section de ce chapitre s'intéressera à la conception d'un réseau logistique robuste pour le Pérou capable de répondre de manière satisfaisante aux crises récurrentes d'une part, mais également de servir de base aux réponses nécessaires en cas de crise exceptionnelle d'autre part.

1. Le Pérou.

1.1. Présentation générale.

Le Pérou est situé sur la côte centrale de l'ouest de l'Amérique du Sud. Il est bordé par l'océan Pacifique à l'Ouest, par le Chili au Sud, par la Bolivie et le Brésil à l'Est et par la Colombie et l'Équateur au Nord. Avec une superficie totale de 1 285 216 km2. Le Pérou est le troisième pays d'Amérique du Sud par sa taille, après le Brésil et l'Argentine. Politiquement, il est divisé en 24 régions.

Schématiquement, on peut diviser le pays en trois zones naturelles avec des particularités géographiques et climatiques fortes :

- La Côte (*Costa*) est une étroite bande de 3080 kilomètres de long bordée par l'océan Pacifique. Le climat est sec et désertique. Ces déserts côtiers sont provoqués par la présence d'un courant froid, qui remonte la côte Pacifique en bloquant l'évaporation et la formation de perturbations pluvieuses. La Côte ne représente que 10,7 % du territoire du Pérou. Mais c'est la zone la plus peuplée, avec 19,5 millions d'habitants. On y trouve en particulier Lima, la capitale politique et financière du pays (9 millions d'habitants) ;
- La Montagne (*Sierra*) le long de la Cordillère des Andes, couvre 31,8 % du territoire. Le climat varie de tempéré à froid en fonction de l'altitude. On y trouve le point culminant du pays (6 768 mètres). C'est le foyer de 8,4 millions de personnes ;
- La Forêt amazonienne (*Selva*) est la plus grande région. Le climat y est tropical. Elle occupe 57,5 % du territoire du pays mais elle est très peu peuplée (environ 2,9 millions d'habitants).

Au Pérou il y a une grande variété climatique, physiographique et biologique ce qui le rend particulièrement vulnérable aux effets du changement climatique. Selon un rapport du Ministère de l'Environnement au Pérou, MINAM (2010), le pays est l'un des 10 pays au monde les plus diversifiés, avec :

- La deuxième plus grande forêt après l'Amazonie brésilienne ;
- La zone de montagne tropicale la plus haute ;
- 71 % des glaciers tropicaux ;
- 84 des 104 zones de vie identifiés dans la planète ;
- 27 des 32 climats du monde.

Cette hyper diversité est gravement menacée par le changement climatique et explique en grande partie la forte vulnérabilité du pays. Par son emplacement sur la planète, le Pérou devrait avoir un climat tropical, chaud et pluvieux, avec une végétation dense. Cependant, deux facteurs naturels interviennent pour que la frange occidentale du littoral du Pacifique soit un désert avec un climat tempéré toute l'année. Ces facteurs sont :

- L'existence de la Cordillère des Andes (dans la région occidentale du continent sud-américain), qui traverse le pays du sud au nord, en laissant deux franges : la côte désertique à l'occident et la forêt au côté oriental. La Cordillère agit comme un énorme mur qui empêche que les nuages de l'Atlantique arrivent sur la côte

péruvienne. La formation des Andes est associée à une forte activité sismique et d'autres phénomènes telluriques dans la région en raison de l'interaction de la plaque tectonique de Nazca avec la plaque Sud-Américaine (Castillo et Alva, 1993) ;

- L'existence d'un courant maritime d'eaux froides, appelé courant de Humboldt (ou la Péruvienne) qui parcourt du sud au nord l'Océan Pacifique très proche du littoral. Il maintient la température de la mer froide et rafraîchit la température atmosphérique. Les variations de ce courant sont à l'origine des phénomènes « *La Niña* » et « *El Niño* » discutés au Chapitre II.

Le pays est particulièrement menacé par les catastrophes naturelles :

- Les tremblements de terre associés à son emplacement sur la Ceinture du Pacifique ;
- Les inondations, glissements de terrain, vagues de chaleur dus au phénomène « *El Niño* » et vagues de froid dues au phénomène « *La Niña* » ;
- L'activité volcanique dans la partie sud du territoire entre les régions de Tacna, Moquegua, Arequipa et Ayacucho, où il y a plus de 20 volcans majeurs, dont certains sont actifs. Mentionnons toutefois qu'il n'y a pas eu d'éruption volcanique grave depuis 400 ans.

Au Pérou, les phénomènes naturels qui provoquent les plus grandes crises sont les séismes et les inondations (accompagnées parfois de glissements de terrain). D'autres phénomènes tels que les vagues de froid, les sécheresses, les tsunamis, les incendies de forêts ou les coulées de boue se produisent par moment. Mais ils ont un impact généralement mineur en termes de territoire touché, en nombre de victimes, en dommages et pertes économiques.

La Convention des Nations Unies sur les changements climatiques CCNUCC (1992) a retenu neuf facteurs caractérisant les pays auxquels il faut prêter attention suite à la modification du climat. Le Pérou en présente sept sur les neuf. De plus, ces facteurs se retrouvent sur une grande partie de son territoire.

Caractéristiques reconnues par la CMNUCC	Pérou
Pays de basse altitude et autres pays insulaires (P.19 et l'art. 4.8)	x
Pays ayant des zones côtières de basse altitude (P.19 et de l'art. 4.8)	√
Zones arides et semi-arides (P.19 y art. 4.8) : zones couvertes de forêts et zones exposées à la déforestation (art. 4.8)	√
Zones exposées aux inondations, à la sécheresse et à la désertification (P.19)	√
Pays ayant des zones sujettes à des catastrophes naturelles (art. 4.8)	√
Pays en développement ayant des écosystèmes montagneux fragiles (P.19) : Pays ayant des écosystèmes fragiles, y compris les écosystèmes montagneux (art. 4.8)	√
Pays ayant des zones de forte pollution de l'atmosphère urbaine (art. 4.8)	√
Pays dont l'économie dépend fortement des revenus générés par la production, la transformation et l'exportation de combustibles fossiles, des produits à forte consommation énergétique (art. 4.8).	√
Pays sans littoral et de transit (art. 4.8)	x

Table V-1 : Pérou, pays vulnérables aux effets négatifs du changement climatique.

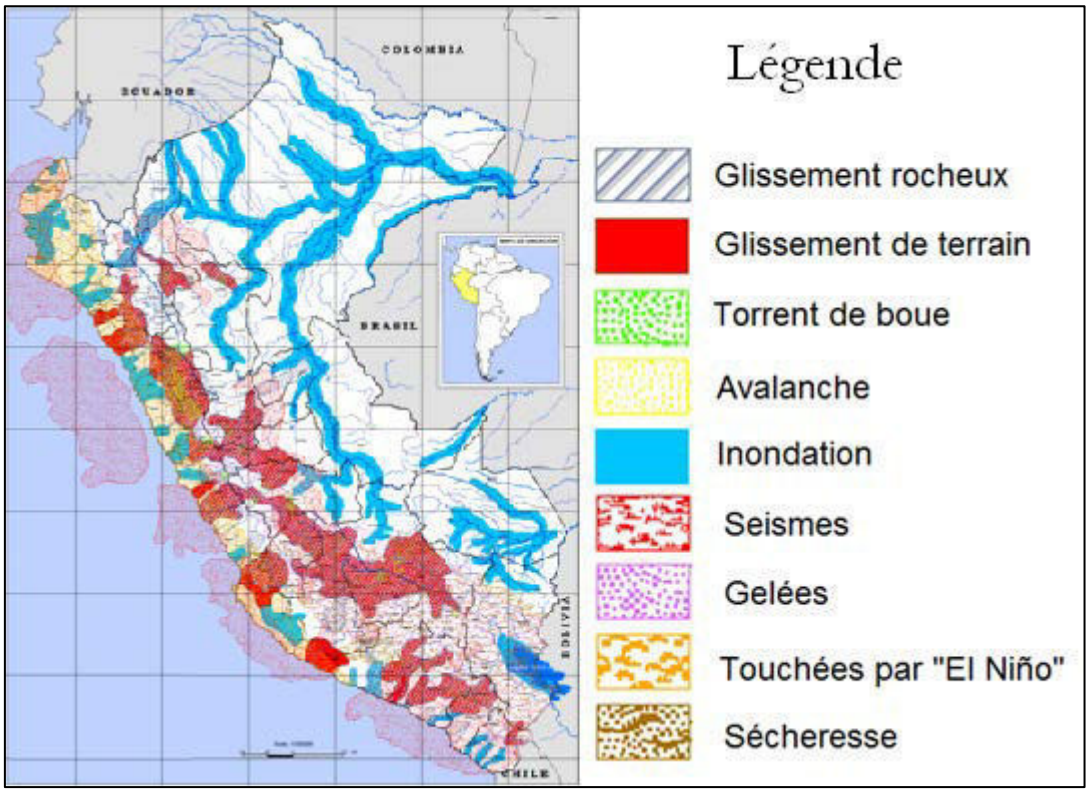


Figure V-1 : Les zones à risque du Pérou (Ministère Economie Pérou, 2003).

Source : www.vivienda.gob.pe/pnc/documentos/Material_Divulgacion/Mapa_de_Peligros_Multiples.pdf

1.2. Le Pérou et les tremblements de terre.

Le Pérou et le Chili sont sur la Ceinture du Pacifique, plus précisément à la frontière de la plaque Amérique du Sud (plaque émergée) et de la plaque Nazca (plaque immergée). La plaque Nazca s'enfonce sous la plaque Amérique (phénomène dit de subduction). Cette subduction crée une fosse océanique le long de la côte et constitue la cause principale de l'élévation de la Cordillère des Andes par compression de la bordure occidentale de la plaque Sud-Américaine.

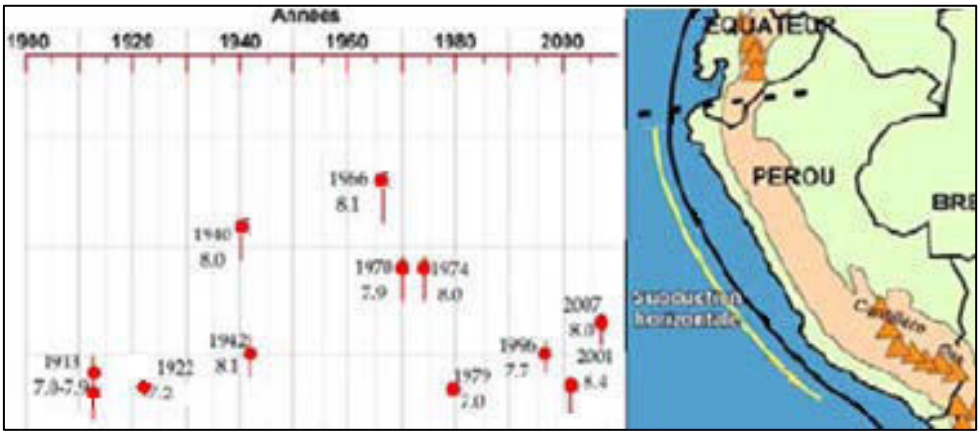


Figure V-2 : Les séismes de subduction historiques depuis 1900 au Pérou.

Source : Saillard (2008)

Ce phénomène géologique explique aussi la propagation des séismes. Par exemple, un tremblement de terre avec un épicentre à Lima affectera aussi les régions côtières frontalières d'Ancash et Ica, parce que la ligne de faille sismique suit la côte. Mais il n'affectera pas les régions de Pasco et Junín, elles aussi en bordure, mais situées derrière la Cordillère des Andes qui sert de mur d'amortissement des ondes séismiques. Entre 1582 et 2007, on a recensé au Pérou 37 tremblements de terre importants d'une magnitude comprise entre 6,0 et 7,9 et 10 tremblements de terre de magnitude supérieure ou égale à 8. L'essentiel de ces séismes a eu lieu dans les deux régions frontalières de Lima et Ica (70%), les autres étant sur la côte au centre-sud du pays.

No	Date	Magn.	Région	No	Date	Magn.	Région
1	22/01/1582	7,9	Arequipa	25	24/05/1940	8,2	Ancash
2	09/07/1586	8,1	Lima	26	24/08/1942	8,4	Ica (mar)
3	24/11/1604	8,4	Ica	27	30/09/1946	7,0	Ica (mar)
4	14/02/1619	7,8	La Libertad	28	10/11/1946	7,2	Ancash
5	31/05/1650	7,2	Cusco	29	01/11/1947	7,5	Junín
6	13/11/1655	7,4	Lima	30	28/05/1948	6,7	Lima
7	12/05/1664	7,8	Ica	31	21/05/1950	6,0	Apurímac
8	16/06/1678	7,0	Lima	32	01/03/1951	6,7	Arequipa
9	20/09/1687	8,2	Lima	33	12/12/1953	7,7	Tumbes
10	21/10/1687	7,0	Arequipa	34	21/07/1955	6,7	Ayacucho
11	22/01/1725	7,0	Lima	35	15/01/1958	7,3	Arequipa
12	28/09/1746	8,4	Lima	36	07/02/1959	7,2	Tumbes
13	13/05/1784	8,0	Arequipa	37	13/01/1960	7,5	Arequipa
14	07/12/1806	7,5	Lima	38	17/10/1966	8,1	Lima
15	10/07/1821	7,9	Arequipa	39	19/06/1968	6,9	Moyobamba
16	18/09/1833	7,0	Tacna	40	01/10/1969	6,4	Tacna
17	13/08/1868	8,6	Tacna	41	31/05/1970	7,9	Chimbote
18	09/05/1877	7,5	Tacna	42	03/10/1974	8,1	Lima
19	28/07/1913	7,0	Arequipa	43	23/06/2001	8,4	Arequipa
20	06/08/1913	7,7	Arequipa	44	07/07/2001	7,6	Arequipa
21	11/10/1922	7,4	Arequipa	45	26/09/2005	7,5	Moyobamba
22	09/04/1928	6,4	Madre de Dios	46	20/10/2006	6,7	Ica
23	14/05/1928	7,3	Amazonas	47	15/08/2007	8,0	Ica
24	18/07/1928	7,0	Cajamarca				

Table V-2 : Tremblements de terre les plus importants du Pérou 1582-2007.

Source : Silgado (1978), INDECI (2004) et USGS (2014).

Si on reporte ces données sur un graphique, il est possible de constater une certaine saisonnalité dans la survenue de ces grands tremblements de terre au Pérou.

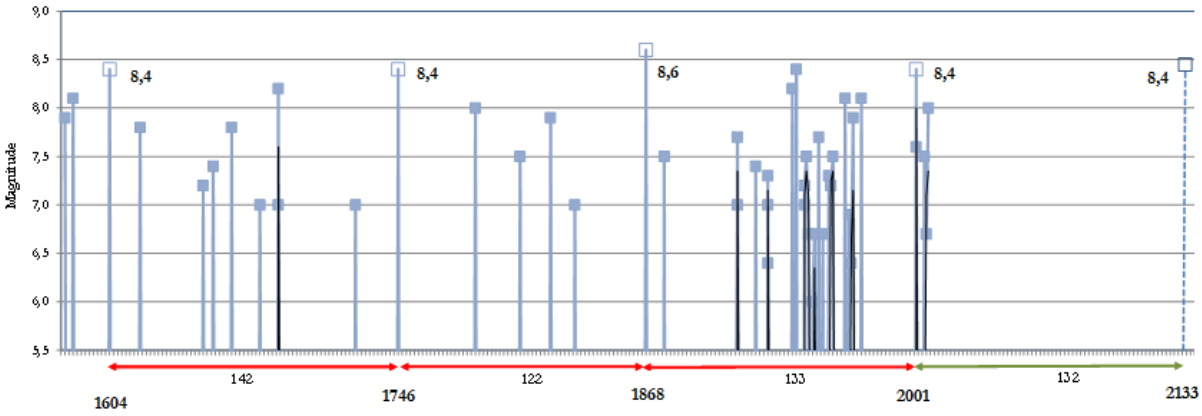


Figure V-3 : Nature cyclique des grands tremblements de terre au Pérou et prévision.

Sur le graphique on peut vérifier que les tremblements de terre de magnitude supérieure à 8 ont une fréquence relativement constante, avec une moyenne de 132 années entre deux apparitions (années 1604, 1746, 1868, 2001) et des intensités moyennes de 8,4 M (magnitudes 8,4 / 8,6 / 8,4 / 8,4 respectivement). Au premier abord ces évènements passent pour exceptionnels. Mais en fait, ils ont une nature cyclique. Cette nature cyclique ne peut se détecter que si l'on dispose d'une base de données couvrant plusieurs cycles.

On prévoit en conséquence que le prochain tremblement de terre important au Pérou arrivera autour de l'année 2133 et que l'emplacement probable de son épicentre sera entre les régions de Lima et Ica.

Ces tremblements de terre de magnitude élevée ne constituent qu'une petite partie des séismes du Pérou. Peu ou prou, toutes les régions péruviennes subissent des séismes. Si on regarde ce qui s'est passé dans la région de Cusco (région située dans la Cordillère et loin du littoral), il y a eu 14 tremblements de terre significatifs entre 1970 et 2007. Sur une analyse des fréquences, on peut voir que dans cette région, 7 % des tremblements de terre recensés ont une magnitude supérieure à 5,5.

Donnes	
Minimun	3,5
Maximun	6,3
# Rang - 1	4
Rang	0,7
# Evénements	14
Ecart type	1,9

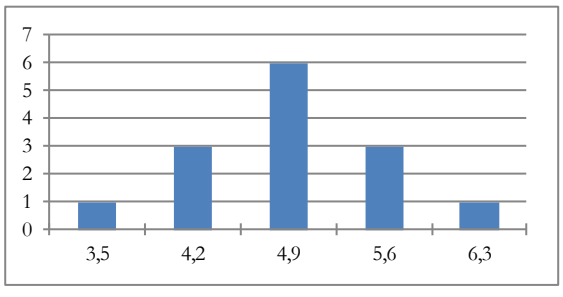


Figure V-4 : Distribution de fréquence des tremblements de terre.

La base de données de l'Institut de Géophysique du Pérou, l'IGP (site http://www.igp.gob.pe) contient 2200 tremblements de terre, enregistrés sur une période de collecte allant du 05/01/1970 au 31/12/2007 Cette base enregistre les relevés sismiques d'un réseau de sismographes répartis à travers le pays. Pour les experts péruviens en sismologie, cette base de données est considérée comme la plus fiable. La table suivante donne un aperçu de cette base.

Record No.	Date yyyy/mm/dd	Heure UTC	Lat. °S	Lon. °O	Depth km	Magnitudes				Intensité maximale MM/MSK
						mb	ML	Ms	Mw	
1	1970/01/05	06:58:58.3	-17,310	-70,930	118	4,9				III Characato
2	1970/01/14	23:49:05.6	-16,690	-72,000	96	3,9				III Characato
3	1970/02/14	11:17:16.5	-9,912	-75,542	27	5,8				VIII Quero
[…]										
2273	2007/12/25	16:20:57.0	-19,619	-70,455	109		5,5		5,8	IV Tacna
2274	2007/12/31	04:55:32.7	-7,364	-79,889	53		4,0			II San Pedro de Lloc
2275	2007/12/31	10:39:40.6	-15,065	-75,900	27	5,1	4,8		5,2	III San Juan de Marcona
2276	2007/12/31	10:58:58.7	-15,066	-75,787	14	5,0	4,7			III San Juan de Marcona

Table V-3 : Extrait de tremblements de terre historiques dossiers dès 1970 à 2007.

Comme on peut le remarquer, selon les enregistrements, cette base utilise plusieurs mesures de magnitude. Pour mesurer l'intensité des tremblements de terre, au fil du temps, différents systèmes d'échelle, ont été utilisés comme la magnitude locale ML dite aussi de Richter, la mesure de l'amplitude de l'onde MS, la magnitude des ondes de volume Mb ou magnitude de moment MW appelé aussi Richter Modifié (Hanks et Kanamori, 1979). Cette dernière est la magnitude la plus utilisée aujourd'hui. C'est la mesure standard officielle utilisée par l'Enquête Géologique aux Etats Unis, *The United States Geological Survey* (USGS, 2002). Heureusement, il existe des formules d'équivalence entre ces échelles, qui permettent la transformation des données (McCalpin, 2009).

Sur les 2200 séismes, environ 20% sont au-dessus de 5,5 Mb et donne lieu au déclenchement d'aide humanitaire. En dessous de cette magnitude, on a des mouvements sismiques sans incidence importante. Ceci a été vérifié pour toutes les régions en étudiant les dossiers historiques constituant le « Compendium des Statistiques du Pérou ». La carte ci-après synthétise les intensités sismiques maximales enregistrées dans le pays. Cette carte a été réalisée dans le cadre des travaux menés par le Centre Péruvano-Japonais pour la Recherche sur les Tremblements de Terre et l'Atténuation des Catastrophes (*El Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres*, CISMID).

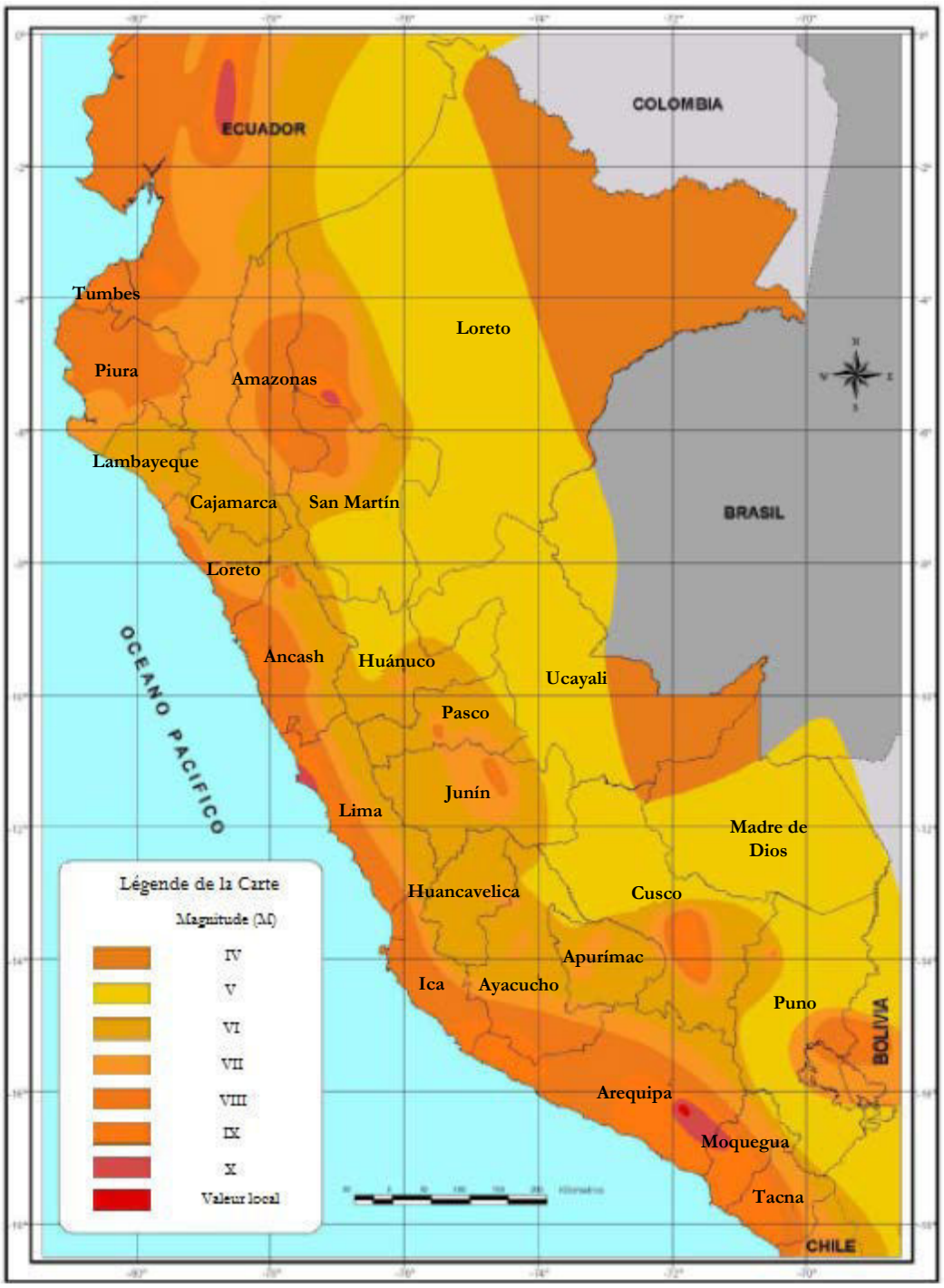


Figure V-5 : Carte de la distribution d'intensité sismique maximale.

Source : Alva et al. (1993).

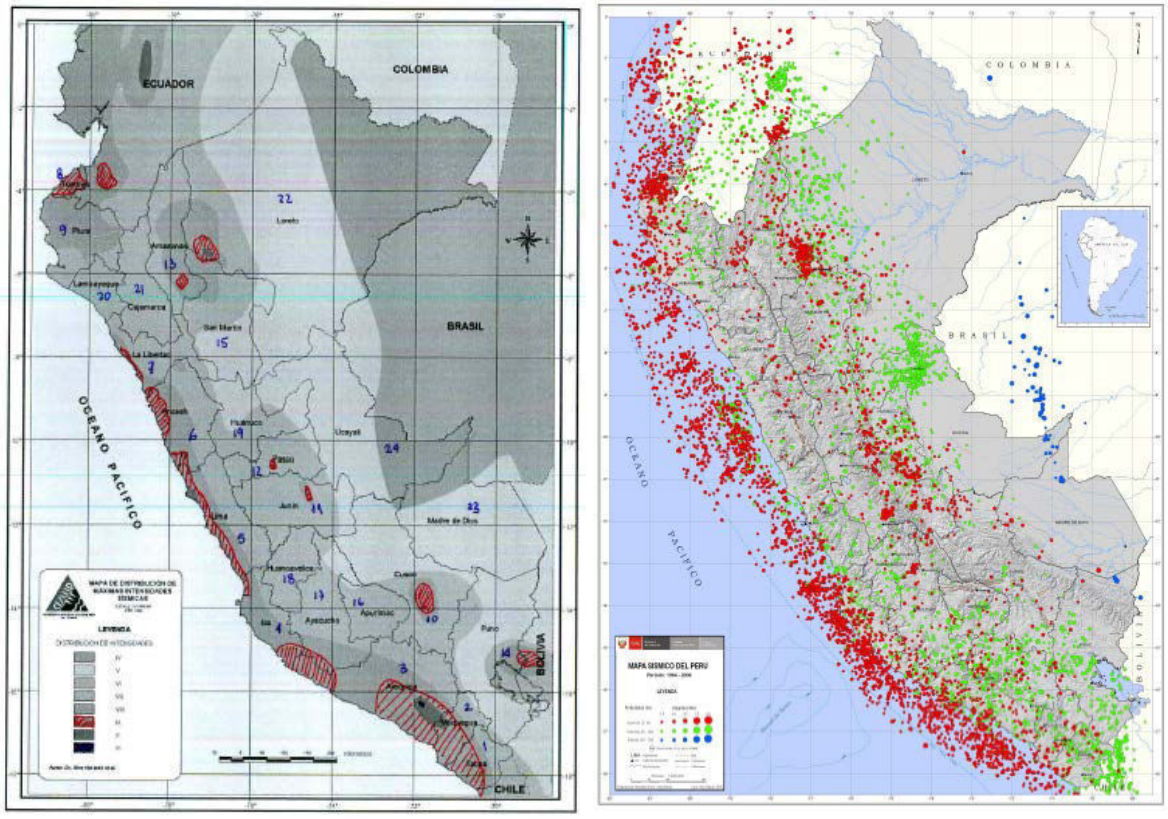


Figure V-6 : Cartes sur les séismes au Pérou.

Sources : CISMID (à gauche, les zones géologiques plus vulnérables) et IGP (à droite, les enregistrements de secousses sismiques.).

1.3. Le Pérou et « El Niño »

Les fortes pluies diluviennes et les orages provoquent régulièrement des inondations et des glissements de terrain au Pérou, mais aussi en Bolivie et au Chili. A titre d'illustration sur ces dernières années :

- En 2009, les pluies ont provoqué des glissements de terrain dans la région d'Arequipa, dans le sud du Pérou. D'autres glissements de terrain de terrain ont provoqué la coupure de nombreuses routes et isolé le district de Quicacha du reste du pays. De nombreuses rivières étaient en crue ;
- En 2011 l'état d'urgence a été déclaré en Bolivie et au Pérou en raison des pluies diluviennes. Les pluies ont laissé des milliers de sans-abri et provoqué des dommages matériels importants ;
- En 2014, au Pérou, les pluies ont fait plusieurs milliers de sans-abri. De gros dégâts ont été causés aux infrastructures : au moins 15 ponts ont été détruits et plus de 300 kilomètres de routes ont été endommagés. La rivière traversant la ville d'Arequipa a débordé et inondé la ville faisant pour 100 millions de dollars de dégâts.

Nous avons dit au début de cette présentation que le climat de la côte était désertique. Il peut paraître paradoxal de parler des dommages dus aux précipitations abondantes. En temps normal, dans l'océan Pacifique, les alizés, chargés en vapeur d'eau, engendrent d'abondantes précipitations sur l'Indonésie (jusqu'à 7 mm par heure de précipitations par an), alors que de l'autre côté du

Pacifique, dans les Andes et les hauts plateaux du Pérou sévit la sécheresse. Cependant, il arrive que le trajet des alizés se modifie entre janvier et mars. Les cumulo-nimbus s'installent alors au large de l'Amérique Latine. D'importantes précipitations s'abattent sur la côte Ouest du Pérou. Ce phénomène climatique est causé par le réchauffement accentué des eaux de surface près des côtes de l'Amérique du Sud. Il porte aujourd'hui le nom « *El Niño* » (le petit garçon, en espagnol, et par extension « l'Enfant Jésus », en rapport à la période de l'année où le phénomène est le plus marqué : Noël). Les événements « *El Niño »* apparaissent normalement d'une manière irrégulière, tous les 2 à 7 ans mais semblent beaucoup plus fréquents depuis le début des années 1990 (tous les 2 à 3 ans). Ces épisodes débutent en général en milieu d'année et durent de 6 à 18 mois. Ils atteignent leur intensité maximale vers Noël. La phase qui fait suite à « *El Niño* » est nommée « *La Niña* » (soit petite fille en espagnol). Elle est caractérisée par un refroidissement des eaux de surface et entraîne souvent des vagues de froid assez importantes.

1.4. Mise en place de l'aide

Les tremblements de terre et les inondations constituent un groupe de catastrophes naturelles récurrentes au Pérou. Pour aider les victimes, le gouvernement a mis en place des entrepôts de stockage d'aide. Le réseau péruvien actuel est composé d'un entrepôt national et de douze entrepôts régionaux. La majorité des stocks de secours se trouve actuellement dans la région de Lima, qui est probablement la plus sensible en raison de la concentration de la population. Mais si un tremblement de terre de forte intensité se produit dans cette région, il y a des risques qu'une partie de ces stocks soient rendue inutilisable et que la réponse ne soit pas aussi efficace que prévue.

Une partie de cette aide est constituée de produits non périssables. Voici une description des « Kits » de secours proposés par INDECI (2011) pour une famille ayant tout perdu.

Famille	Personne
(Les articles sont livrés pour chaque famille)	(Les articles sont livrés pour chaque personne)
01 Modulo ou Tente	01 Lit ou Matelas
15 Tôles ondulées en acier [1]	01 Couettes ou Couverture
10 Panneaux de contreplaqués [1]	01 Moustiquaire (forêt ou Sierra)
10 m de plastique [1]	01 Vaisselle (assiette, tasse, cuillère)
01 cuisine avec 02 brûleurs	01 nourriture froide journalière
02 Pots No. 024	Autre selon les besoins
01 Réservoir pour eau 140 litres	
01 Saut	
0,2 Paquet des vêtements par personne	
01 Louche	
01 Couteau	
[1] *Livraison en multiples de.*	

Table V-4 : Kit des secours selon le bénéficiaire.

Secours : INDECI (2011).

Pour Coppola (2007), l'aide alimentaire doit répondre aux besoins de la population ciblée. La nourriture doit rester proche de l'alimentation habituelle, en utilisant des ingrédients identiques ou similaires à ceux que les gens consomment dans la vie courante et de préférence de provenance locale. Les populations ayant des besoins spéciaux, tels que les malades, les enfants, les femmes enceintes ou allaitant, les personnes âgées doivent voir leurs besoins nutritionnels couverts. Le matériel utilisé pour le transport, le stockage, la cuisson doit être adapté.

Pour Socarrás et Bolet (2010), les estimations en besoins nutritionnels doivent être faites sur la base d'informations spécifiques de la zone en crise, incluant notamment :

- La structure démographique de la population (âge et sexe) ;
- L'emplacement et la disponibilité de la nourriture ;
- Les groupes à risque : malades, femmes enceintes, nourrissons, jeunes enfants, personnes âgées et handicapées ;
- L'état de santé et l'état nutritionnel de la population : maladie gastro-intestinale, taux de sous alimentés, etc. Les besoins devraient augmenter si la population est sous-alimentée.

Lorsque les conditions de survie reposent pendant plusieurs semaines ou même plusieurs mois exclusivement ou presque exclusivement sur les rations d'aide alimentaire, ces rations devraient fournir de 1 700 - 2 000 kcals par personne et par jour (PAHO, 2005). La valeur énergétique doit être de amenée pour 5 à 10 % par des protéines, pour environ 30 % par des matières grasse et pour 65 % par des glucides (Socarrás et Bolet, 2010). Ils recommandent la quantité ci-dessous en fonction de l'âge, du sexe.

Catégorie	Subsistance en cas de crises (Kcal)	Conservation temporal (Kcal)
0 à 2 ans	1 000	1 000
3 à 5 ans	1 250	1 500
6 à 9 ans	1 500	1 750
10 à 17 ans	2 000	2 500
Grossesse et la lactation	2 000	2 500
Homme adulte	1 900	2 200
Femme adulte	1 600	1 800

Table V-5 : Alimentation recommandé en cas de crises.

Source: Socarrás y Bolet (2010).

L'eau constitue un élément critique pour la survie dans les situations de crise (TPS, 2011). On doit s'intéresser en priorité à son traitement et sa distribution par exemple :

- Identifier les sources d'eau disponibles dont la qualité pour le consommateur a été vérifiée ;
- Identifier la vulnérabilité des routes par lesquels les camions fournisseurs peuvent se déplacer ;
- Identifier les zones prioritaires à alimenter (hôpitaux, camp de réfugiés, etc.).

TPS (2011) recommande de fournir de 7,5 à 15 litres d'eau par personne et par jour. Cette eau doit assurer divers usages :

Usage	Quantité (Litres)
La boisson	2,5 – 3,0
Les pratiques fondamentales d'hygiène	2,0 – 6,0
Pour faire la cuisine	3,0 – 6,0

Table V-6 : Besoins elementaires d'eau pour doit assurer la survie.

Source: TPS (2011)

TPS (2011) donne aussi le nombre maximum de personnes selon la source d'eau.

Nombre de personnes par source	Le débit de la source d'eau (L/minutes)
250 par robinet	7,5
500 par bombe d'eau manuelle	17,0
400 pour chaque puit ouvert	12,5

Table V-7 : Nombre maximum de personnes par source d'eau.

Source: TPS (2011)

Le contexte général du cas application étant désormais planté, nous allons désormais nous intéresser à la mise en œuvre des contributions développées dans les chapitres précédents au cas particulier du Pérou.

2. Modèle de prévision de la demande.

2.1. Etape 1 : Identification des facteurs d'influence.

La première étape consiste à identifier les facteurs qui permettent de qualifier le niveau de vulnérabilité et de résilience d'une région touchée par une catastrophe potentielle. Comme on l'a vu au chapitre 3, à travers la littérature, nous avons identifié 89 facteurs génériques pour caractériser la vulnérabilité et la résilience. Il s'agit notamment des indicateurs sur la démographie, l'économie, l'environnement, la santé et l'accessibilité. Parmi les 89 facteurs listés, seuls 58 sont quantitatifs. Certains de ces indicateurs ne peuvent pas être appliqués à tous les types de catastrophes naturelles. Par exemple, certains d'entre eux peuvent être retenus pour les tremblements de terre, les inondations, les éruptions volcaniques, etc. mais pas pour les maladies, les actes terroristes, etc.

Une partie de ces facteurs est difficile à renseigner, soit parce qu'ils sont qualitatifs, soit parce que les données nécessaires ne se trouvent pas dans des bases de données existantes.

Dans un premier temps, nous avons travaillé avec un groupe d'experts de la gestion de crise à Lima pour faire une présélection basée sur l'apport de chaque facteur et la possibilité de collecte de l'information. Il en est ressorti 12. Ces facteurs sont :

- La taille de la population (en millions) ;
- L'Indice de Développement Humain (ratio IDH) ;
- Le taux de logement raccordé aux réseaux publics d'eau (%) ;
- Le taux de logement raccordé au réseau électrique (%) ;
- Le taux d'habitation précaire (%) ;
- L'espérance de vie à la naissance (ans) ;
- Le taux d'alphabétisation (%) ;
- Le taux de personnes ayant suivi des études secondaires (% d'une génération inscrit dans des études secondaires) ;
- Le taux de réussite éducatif (% d'une génération ayant validé un diplôme du secondaire) ;
- Le revenu moyen par personne et par jour (*Nuevos Soles*) ;
- Le taux d'insécurité (nombre de plaintes / mille habitants)
- Le taux de qualité de l'aide apportée (montant des aides sociales / million d'habitants).

Arrêtons-nous un instant sur deux indices particulièrement représentatifs : « IDH » et « taux d'habitation précaires ».

2.1.1. Indice de Développement Humain (IDH).

Jusqu'en 1990, pour évaluer le niveau de développement d'un pays, on se limitait à observer ses performances économiques et à mesurer la production de richesse de ses agents économiques : typiquement le produit intérieur brut par habitant ou PIB. L'évaluation du niveau de développement ne peut se limiter aux seules performances économiques. De multiples facettes

du développement doivent aussi être étudiées, comme les domaines sociaux (santé, éducation, logement, emploi...), la pauvreté, les inégalités. L'IDH est un indicateur synthétique du niveau de développement des pays, dont la construction a été inspirée par les travaux d'Amartya Sen, prix Nobel d'économie en 1998. Outre la richesse monétaire, l'IDH prend en compte deux autres aspects essentiels du développement humain : la santé et l'éducation. L'IDH est construit à partir de quatre indices :

- L'indice de santé : l'espérance de vie à la naissance ;
- L'indice de scolarisation des jeunes : le rapport du nombre des « jeunes » scolarisés sur la population des « jeunes » en âge d'être scolarisés. Pour le PNUD, le nombre de jeunes scolarisés est le nombre d'individus inscrits au niveau primaire (excepté en maternelle), secondaire et tertiaire (supérieur), quels que soient leurs âges ;
- L'indice d'alphabétisation des adultes : « Le pourcentage des personnes âgées de 15 ans ou plus qui peuvent, en le comprenant, lire et écrire un texte court en rapport avec leur vie de tous les jours » ;
- L'indice de richesse monétaire : l'indice de richesse monétaire calculé par le PNUD est basé sur le produit intérieur brut (PIB) par habitant en dollar parité de pouvoir d'achat (PPA), une unité commune qui permet la comparaison des pays, notamment en corrigeant les PIB par habitant pour la différence des niveaux des prix entre les pays (donc pour la différence de pouvoir d'achat d'un dollar entre les pays.

2.1.2. Taux d'Habitations Précaires.

Le Centre d'Etudes et de la Prévention des Catastrophes, Predes (*Centro de Estudios y Prevención de Desastres*) du Pérou a défini les paramètres qui permettent de déterminer le niveau de vulnérabilité des bâtiments dans une région ou un district donné :

- La densité de population : élevée (plus de 450 habitants/ha), moyenne haute (350-450 habitants/ha), moyen basse (250-350 habitants/ha), faible (150-250 habitants/ha) et très faible (70-150 habitants/ha) ;
- Les matériaux de construction prédominants : on considère par exemple que les matériaux de construction prédominants à Lima sont la brique/béton, l'argile, le bois et le chaume ;
- Le type de bien : maison indépendante, immeuble d'appartements, logement de quartier, logements précaires normalement non destinés à l'habitat humain ;
- Etat de la propriété : délabrée, en consolidation, densifiée et consolidée ;
- Hauteur de logements.

Par la suite, nous avons dû écarter les données associées au taux de qualité de l'aide apportée parce qu'elles étaient incomplètes dans les enregistrements de l'INDECI.

Finalement, nous avons pu renseigner les valeurs des 11 facteurs restant pour chacune des 24 régions du Pérou sur quatre années : 1993, 1995, 2000 et 2007. Ces valeurs ont été recueillies à partir de bases de données gouvernementales publiques, d'organisations nationales telles que l'Institut National de Statistique et d'Informatique (INEI) et le Ministère Péruvien de l'Education

(MINEDU) et de bases de données d'ONGs locales. Le tableau suivant présents ces valeurs sur les années 1993, 2000 et 2007[1].

Region	Vulnerability indexes																		Resilience indexes																	
	Population			IDH			Eau [2]			Electricité			Vulnérables murs [3]			Espérance de vie à la naissance			Analphabétisme			Secondary registration			Réussite éducatif			Revenu per cápita par famille			Dossiers criminels			Soutien logistique		
	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007	1993	2000	2007
	quantity (mil)			ratio			%			%			%			years			%			%			%			S/. mes			quantity (mil)			(S/. millon)		
Amazonas	354,2	406,1	376,0	0,47	0,51	0,57	32%	48%	43%	18%	50%	48%	71%	67%	63%	63,4	68,2	72,4	79,5	82,9	88,0	40,8	51,5	78,6	66,6	72,4	84,9	65,8	195,37	204,7	5,23	6,40	0,81	0,0	1,6	0,3
Ancash	983,7	1067,3	1063,5	0,53	0,58	0,60	49%	61%	72%	45%	65%	73%	69%	68%	59%	66,8	67,9	72,3	78,1	80,8	87,6	65,1	75,1	86,3	73,8	78,9	87,2	87,9	307,27	320,8	7,88	8,20	4,50	0,0	0,0	0,4
Apurímac	396,1	426,9	404,2	0,40	0,46	0,56	29%	56%	54%	20%	61%	69%	97%	94%	91%	59,1	64,3	71,8	63,0	70,4	78,3	43,9	63,7	89,9	56,6	68,2	82,2	52,0	137,49	203,3	1,63	1,56	1,13	0,0	0,0	2,3
Arequipa	939,1	1073,0	1152,3	0,65	0,64	0,65	74%	69%	80%	70%	73%	84%	23%	19%	14%	66,8	68,7	73,5	92,0	93,6	95,9	82,7	92,4	90,7	88,9	93,2	94,2	149,9	331,33	434,8	16,32	11,07	9,19	0,0	1,6	1,6
Ayacucho	512,4	527,5	527,5	0,42	0,49	0,49	45%	61%	61%	26%	65%	65%	84%	68%	68%	59,4	66,0	66,0	67,2	71,7	71,7	46,9	69,8	69,8	60,4	71,1	71,1	62,9	167,91	167,9	2,26	3,90	2,19	0,0	0,0	0,0
Cajamarca	1297,8	1411,9	1387,8	0,45	0,49	0,56	26%	66%	58%	17%	31%	40%	91%	88%	84%	63,4	66,6	72,1	72,7	77,8	82,9	41,3	51,6	79,6	62,2	69,1	81,8	62,9	198,44	215,7	2,25	3,89	2,29	0,0	0,0	2,9
Cusco	1066,5	1158,1	1171,4	0,48	0,54	0,58	44%	69%	64%	42%	73%	64%	89%	85%	81%	58,5	64,9	70,8	73,8	83,3	86,1	54,5	65,4	87,6	67,3	77,3	86,6	98,6	259,75	262,5	11,57	4,62	4,07	0,0	2,1	2,3
Huancavelica	400,4	431,1	454,8	0,37	0,46	0,54	28%	46%	34%	19%	65%	56%	96%	95%	94%	54,3	64,2	70,0	65,7	72,5	79,9	45,9	61,2	86,7	59,1	68,7	82,2	42,0	142,06	131,9	0,75	2,00	0,02	0,0	0,0	0,0
Huánuco	677,9	776,7	762,2	0,45	0,49	0,57	29%	61%	39%	25%	65%	43%	73%	68%	64%	62,3	66,2	71,5	75,0	77,4	83,4	41,4	55,4	81,7	63,8	70,1	82,8	60,5	191,82	231,6	3,85	4,08	0,99	0,0	0,0	0,3
Ica	578,8	649,3	711,9	0,64	0,67	0,65	74%	61%	77%	75%	65%	76%	65%	68%	33%	68,5	72,0	75,9	94,2	95,7	97,2	87,8	93,4	89,7	92,0	94,9	94,7	125,2	357,79	371,9	7,48	5,77	2,55	0,0	0,0	13,0
Junín	1093,0	1190,5	1225,5	0,54	0,58	0,60	57%	61%	61%	58%	65%	73%	66%	68%	48%	63,4	67,2	71,8	86,3	88,1	92,4	70,2	85,8	86,2	80,9	87,3	90,4	91,4	253,06	278,1	11,86	2,87	1,71	0,0	0,0	2,7
La Libertad	1287,4	1466,0	1617,1	0,58	0,61	0,62	60%	74%	65%	55%	56%	72%	75%	60%	63%	68,3	69,7	73,5	86,2	89,0	91,9	66,0	71,8	82,0	79,5	83,3	88,6	101,3	338,24	381,3	14,81	10,78	9,76	0,0	0,0	0,3
Lambayeque	950,8	1093,1	1112,9	0,59	0,63	0,62	67%	74%	70%	66%	56%	76%	68%	60%	53%	68,8	71,2	73,5	88,7	89,5	93,5	70,7	75,1	85,3	82,7	84,7	90,8	103,2	343,20	318,4	9,86	9,95	8,47	0,0	0,0	0,6
Lima - Callao	7126,5	8239,9	8482,6	0,68	0,74	0,68	82%	70%	82%	82%	82%	93%	14%	11%	8%	65,1	73,3	76,1	87,1	96,2	98,2	77,7	94,6	89,2	84,0	95,7	95,2	189,7	547,47	552,1	145,90	19,90	67,83	0,0	4,5	2,9
Loreto	736,2	880,5	891,7	0,53	0,56	0,59	36%	48%	37%	48%	50%	61%	2%	2%	1%	62,8	67,3	70,3	88,8	92,0	94,5	47,3	60,5	79,2	75,0	81,5	89,4	99,4	265,28	279,1	6,36	2,90	3,49	0,0	1,8	0,7
Madre de Dios	69,9	84,4	109,6	0,60	0,62	0,63	39%	69%	66%	49%	73%	68%	3%	2%	1%	65,5	68,9	71,6	92,0	92,7	96,8	61,5	85,7	83,3	81,8	90,4	92,3	127,6	327,47	429,8	1,99	5,95	1,39	0,0	0,0	0,2
Moquegua	130,2	147,4	161,5	0,62	0,67	0,65	72%	69%	77%	62%	73%	80%	48%	40%	32%	66,9	69,9	75,1	91,0	92,6	95,3	85,6	91,0	91,1	89,2	92,1	93,9	121,0	412,72	418,2	1,85	5,21	1,44	0,0	0,0	0,6
Pasco	239,2	247,9	280,4	0,52	0,57	0,59	51%	46%	38%	46%	65%	69%	55%	52%	48%	62,5	66,7	71,9	84,6	89,1	91,7	70,5	89,4	85,0	79,9	89,2	89,5	81,2	233,75	222,4	1,12	4,61	0,33	0,0	0,0	0,1
Piura	1409,3	1545,8	1676,3	0,53	0,55	0,60	58%	74%	64%	41%	56%	66%	53%	51%	49%	63,3	68,6	71,7	83,2	86,9	90,8	59,2	70,0	82,4	75,2	81,3	88,0	100,6	209,18	313,8	10,74	5,17	5,52	0,0	2,5	0,6
Puno	1103,7	1199,4	1268,4	0,45	0,51	0,56	26%	56%	40%	20%	53%	57%	87%	81%	74%	58,0	64,0	68,6	77,6	79,5	87,8	65,3	82,4	86,5	73,5	80,5	87,3	55,5	179,72	208,8	7,92	0,83	1,61	0,0	1,6	4,1
San Martín	572,4	743,7	728,8	0,54	0,55	0,59	35%	48%	53%	37%	50%	59%	55%	45%	35%	66,2	70,0	72,4	87,1	89,6	92,3	46,1	56,3	77,7	73,5	78,5	87,4	93,6	220,57	255,4	2,86	2,78	1,34	0,0	1,6	1,3
Tacna	223,8	277,2	288,8	0,71	0,68	0,65	81%	77%	73%	74%	73%	82%	25%	19%	13%	70,4	73,4	74,2	92,5	93,0	96,3	77,3	83,9	89,7	87,4	90,0	94,1	193,8	420,45	410,4	7,06	8,52	1,08	0,0	0,8	0,4
Tumbes	158,6	193,8	200,3	0,61	0,62	0,65	69%	74%	73%	70%	56%	81%	59%	60%	47%	65,7	69,7	75,2	93,3	93,4	96,6	73,4	82,5	85,4	86,7	89,8	92,9	124,9	311,84	412,8	3,92	7,29	1,53	0,0	0,0	0,2
Ucayali	331,8	424,4	432,2	0,53	0,57	0,60	28%	48%	42%	48%	50%	65%	3%	2%	1%	62,0	65,8	71,2	89,9	90,9	95,2	54,1	76,5	80,2	78,0	86,1	90,2	91,2	257,43	313,4	3,39	6,98	2,86	0,0	0,9	0,4

Table V-8 : Données sur la vulnérabilité et la résilience pour les 24 régions du Pérou.

[1] Les valeurs des années 1993 et 1995 étant très proches, nous ne présentons ici que celles de l'année 1993 pour ne pas surcharger inutilement la lecture du tableau.
[2] Services d'approvisionnement en continu, y compris: réseau public dans le logement, le réseau public en dehors de la maison, bassin publique.
[3] Il est compris ces maisons dont les murs sont en pisé, chaume ou de la boue.

2.2. Etape 2 : Sélection des facteurs discriminants.

Conformément à notre méthodologie (chapitre 3), nous avons réalisé une ACP sur l'ensemble des données, sur les valeurs des années 1993, 2000 et 2007 des 11 facteurs retenus, pour la vulnérabilité et la résilience.

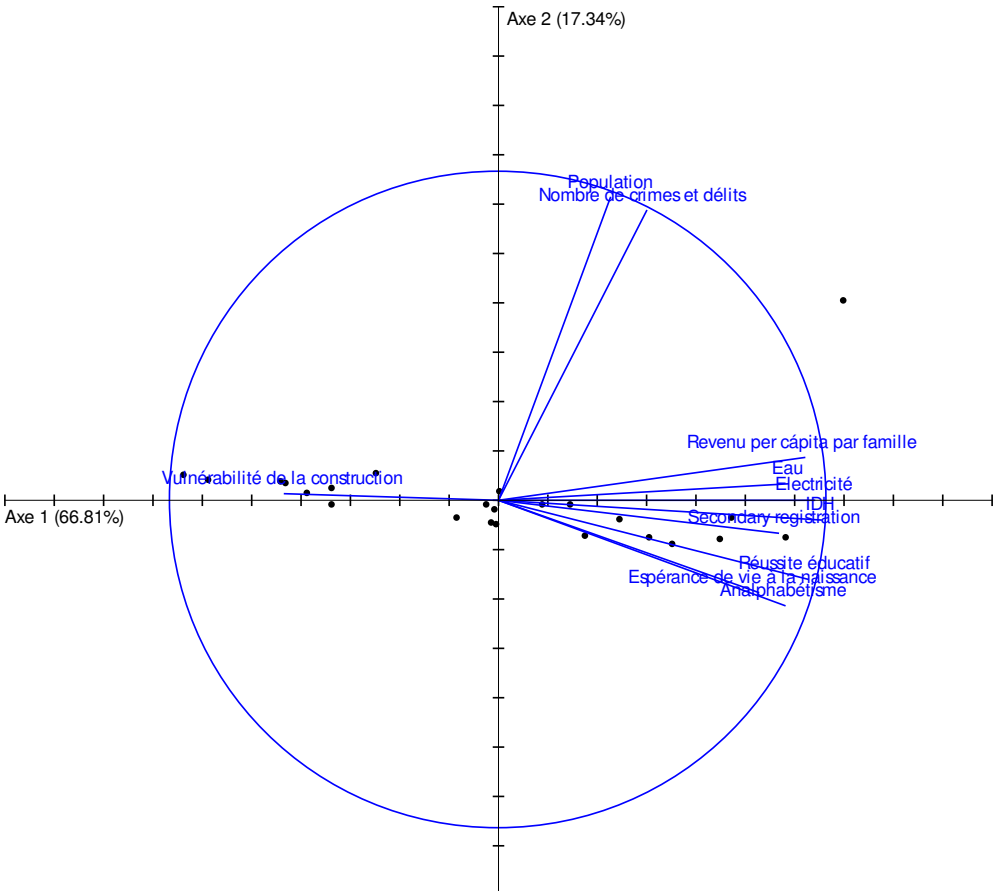


Figure V-7 : Résultat de l'ACP réalisée.

Cette analyse de données a permis d'identifier des corrélations entre les 11 facteurs que nous avions retenus comme représentatifs. Suite à cette première ACP, quatre facteurs peuvent être retenus comme variables discriminantes :

- L'Indice de Développement Humain (IDH) ;
- Le taux d'habitation précaires (ou Vulnérabilité des Constructions, VCS) ;
- Le taux de personnes inscrites dans des études secondaires (ou Taux d'Etudes Secondaires, TES) ;
- Le taux d'insécurité (ou Nombre de Crimes et Délits, NCD).

Remarquons que ces variables conservent 84,15 % de la variance des données. Ces résultats peuvent être considérés comme significatifs et le plan factoriel résultant peut donc être interprété. Ces corrélations étaient en partie attendues. L'Indice de Développement Humain (IDH) notamment est de par sa construction corrélé avec les indices d'espérance de vie à la naissance et d'analphabétisme. Il est de plus corrélé à l'accessibilité à l'eau et à l'électricité, la réussite éducative et le revenu *per capita* par famille. Ils ont un $R \geq 0,85$.

		Population	IDH	Eau	Electricité	(VDC)	(EV)	(AN)	(SR)	(RE)	(RC)	(NCD)
Population		1,00										
IDH		0,29	1,00									
Eau		0,33	0,86	1,00								
Electricité		0,32	0,94	0,90	1,00							
Vulnérabilité de la const.	(VDC)	-0,19	-0,65	-0,33	-0,58	1,00						
Espérance de vie	(EV)	0,06	0,85	0,70	0,73	-0,44	1,00					
Analphabétisme	(AN)	0,04	0,88	0,63	0,82	-0,73	0,77	1,00				
Secondary registration	(SR)	0,20	0,82	0,87	0,86	-0,33	0,60	0,70	1,00			
Réussite éducatif	(RE)	0,12	0,93	0,80	0,91	-0,60	0,76	0,94	0,90	1,00		
Revenu per cápita	(RC)	0,42	0,94	0,83	0,89	-0,68	0,70	0,74	0,71	0,79	1,00	
Nombre de crimes et délits	(NCD)	0,98	0,40	0,42	0,43	-0,31	0,12	0,14	0,29	0,23	0,53	1,00

Table V-9 : Corrélations entre les facteurs discriminants de la vulnérabilité et résilience.

Sur la base de ces quatre variables discriminantes, nous avons fait une deuxième analyse utilisant l'ACP, où les facteurs choisis représentent 81,01 % de la variabilité, comme le montre la figure suivante :

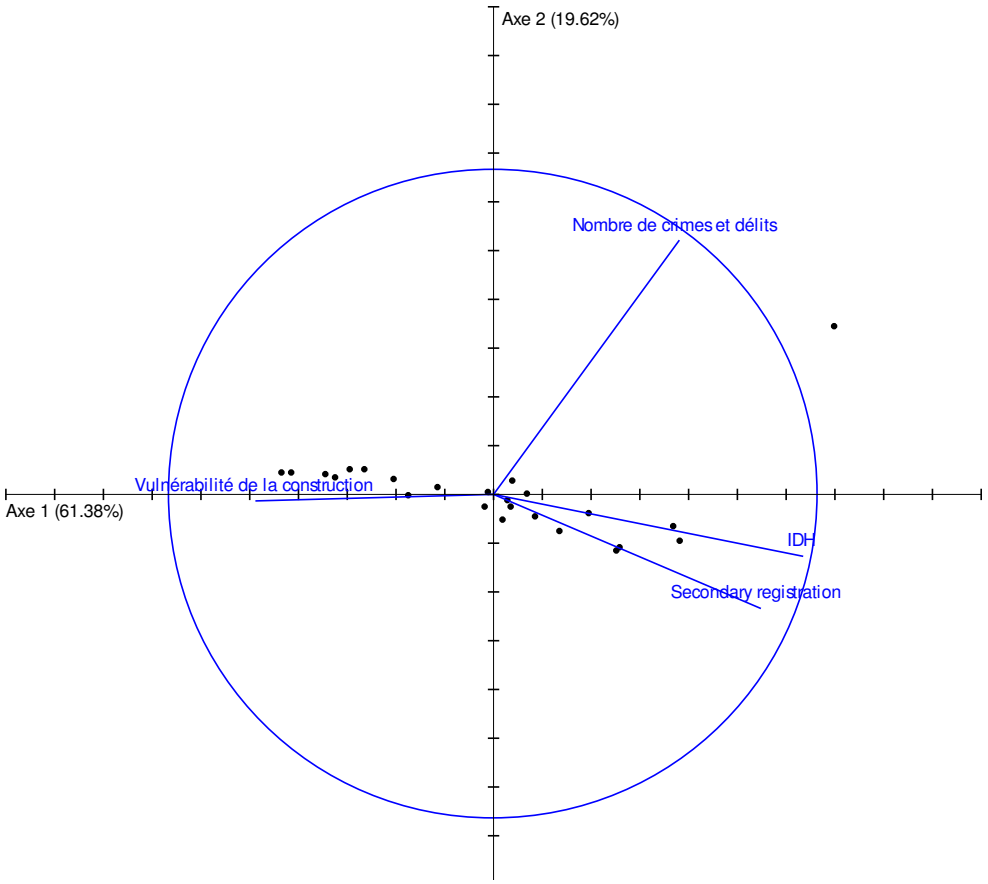


Figure V-8 : Résultat de l'ACP intermédiaire sur les 4 facteurs discriminants.

Les points IDH et taux d'études secondaires dans la population sont très proches car ces 2 facteurs sont très corrélés. Ces deux points sont très proches du cercle ce qui signifie que les 2 facteurs sont très bien représentées. De plus les données de la région de Lima sont en dehors du cercle. Un éloignement des facteurs du cercle montre que ces facteurs sont plutôt mal représentés. C'est pourquoi, nous avons décidé de retirer les données de la région Lima et du taux d'études secondaires. A la suite de quoi, nous avons fait une troisième ACP. Les résultats sur la carte permettent de visualiser les positions des 3 critères restant et les coordonnées des 23 observations (voir la figure suivante). Un pourcentage égal à 90,19 % de la variance est expliqué par les deux axes représentés.

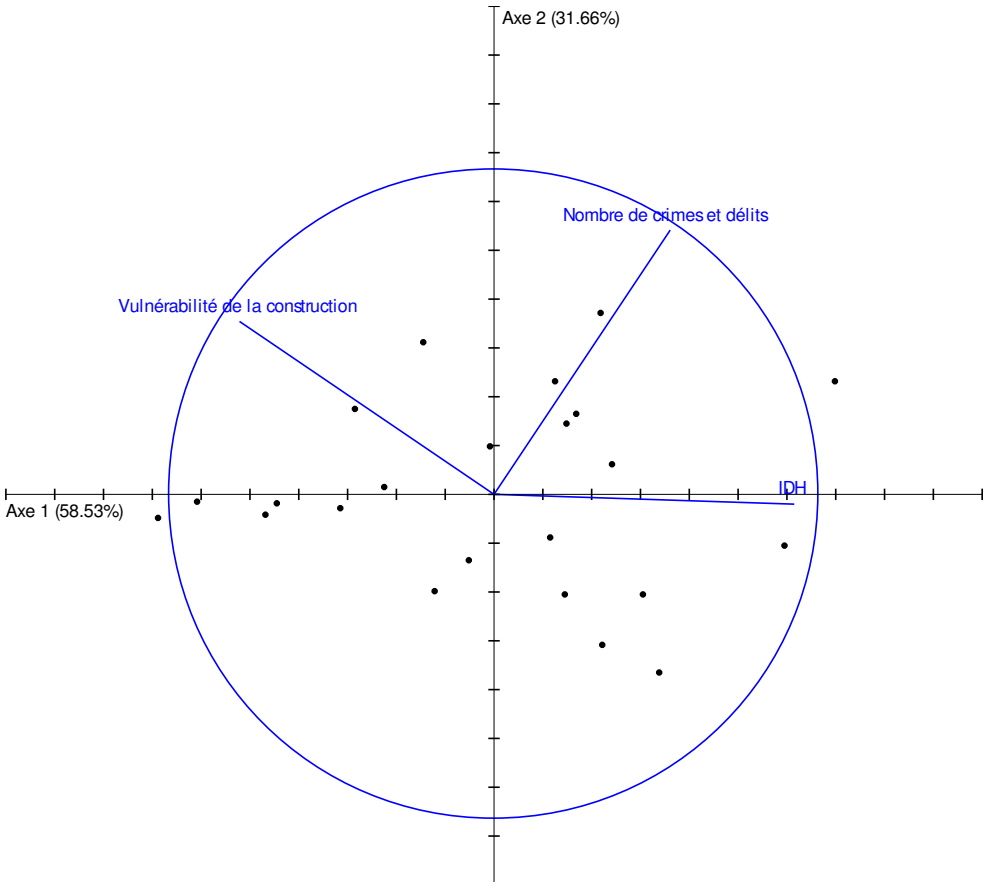


Figure V-9 : Résultat de l'ACP finale réalisée sur les valeurs des 3 facteurs discriminants.

Les valeurs du tableau donnent les coefficients de corrélation entre les critères retenus : IDH vulnérabilité des constructions au séisme (VCS) et nombre de crimes et délits (NCD).

	IDH	Vulnérabilité des constructions au séisme	Nombre des crimes et délits
IDH	1,00		
Vulnérabilité de la construction	-0,61	1,00	
Nombre de crimes et délits	0,40	-0,05	1,00

Table V-10 : Corrélations entre les 3 facteurs discriminants.

2.3. Etape 3 : Etablissement du modèle de prévision.

Cette étape consiste à établir l'équation de régression pour la prévision en nous basant sur les trois variables discriminantes identifiées à l'étape précédente. Cette équation doit permettre d'évaluer la quantité potentielle des victimes pour une période et une région. Pour les trois variables discriminantes, nous disposons de l'ensemble des données aussi pour l'année 1995.

Nous rajoutons donc ces données de 1995 pour améliorer la validité des résultats. Le tableau suivant donne le détail des valeurs pour chacun des 3 facteurs discriminants. Il faut remarquer ici que les modalités de calcul de l'IDH ont évolué à compter de l'année 2009 et n'offrent plus de continuité dans l'historique (les nouvelles valeurs sont de l'ordre de 1,5 fois inférieur aux anciennes valeurs pour un même contexte). Ce point est à intégrer pour éviter un biais dans l'établissement des prévisions futures.

Région	Facteurs de Vulnerabilité								Facteurs de Résilience			
	IDH				Vulnérabilité de la construction				Nombre de crimes et délits			
	1993	1995	2000	2007	1993	1995	2000	2007	1993	1995	2000	2007
	ratio				%				quantité (mille)			
Amazonas	0,47	0,53	0,51	0,57	71%	69%	67%	63%	5,23	1,53	6,40	0,81
Ancash	0,53	0,56	0,58	0,60	69%	67%	68%	59%	7,88	6,21	8,20	4,50
Apurímac	0,40	0,47	0,46	0,56	97%	95%	94%	91%	1,63	1,69	1,56	1,13
Arequipa	0,65	0,70	0,64	0,65	23%	22%	19%	14%	16,32	16,60	11,07	9,19
Ayacucho	0,42	0,44	0,49	0,49	84%	82%	68%	68%	2,26	1,69	3,90	2,19
Cajamarca	0,45	0,49	0,49	0,56	91%	89%	88%	84%	2,25	2,63	3,89	2,29
Cusco	0,48	0,52	0,54	0,58	89%	87%	85%	81%	11,57	7,18	4,62	4,07
Huancavelica	0,37	0,41	0,46	0,54	96%	94%	95%	94%	0,75	0,80	2,00	0,02
Huánuco	0,45	0,48	0,49	0,57	73%	71%	68%	64%	3,85	4,16	4,08	0,99
Ica	0,64	0,68	0,67	0,65	65%	63%	68%	33%	7,48	8,77	5,77	2,55
Junín	0,54	0,61	0,58	0,60	66%	64%	68%	48%	11,86	9,52	2,87	1,71
La Libertad	0,58	0,64	0,61	0,62	75%	73%	60%	63%	14,81	9,33	10,78	9,76
Lambayeque	0,59	0,64	0,63	0,62	68%	66%	60%	53%	9,86	8,72	9,95	8,47
Lima - Callao	0,68	0,85	0,74	0,68	14%	14%	11%	8%	145,90	83,30	19,90	67,83
Loreto	0,53	0,58	0,56	0,59	2%	2%	2%	1%	6,36	2,10	2,90	3,49
Madre de Dios	0,60	0,61	0,62	0,63	3%	3%	2%	1%	1,99	0,85	5,95	1,39
Moquegua	0,62	0,76	0,67	0,65	48%	47%	40%	32%	1,85	2,15	5,21	1,44
Pasco	0,52	0,55	0,57	0,59	55%	54%	52%	48%	1,12	1,25	4,61	0,33
Piura	0,53	0,59	0,55	0,60	53%	52%	51%	49%	10,74	1,51	5,17	5,52
Puno	0,45	0,48	0,51	0,56	87%	85%	81%	74%	7,92	9,66	0,83	1,61
San Martín	0,54	0,58	0,55	0,59	55%	54%	45%	35%	2,86	0,36	2,78	1,34
Tacna	0,71	0,75	0,68	0,65	25%	24%	19%	13%	7,06	4,82	8,52	1,08
Tumbes	0,61	0,66	0,62	0,65	59%	58%	60%	47%	3,92	0,40	7,29	1,53
Ucayali	0,53	0,62	0,57	0,60	3%	3%	2%	1%	3,39	1,28	6,98	2,86

Table V-11 : Données des 3 facteurs discriminants pour le Pérou : 1993 : 1995 : 2000 : 2007.

Le tableau ci-après quant à lui présente les données disponibles sur ces mêmes années vis-à-vis du nombre de victimes concernées par les catastrophes sur le territoire péruvien. Ce recensement est global et concerne aussi bien les crises récurrentes, que les crises exceptionnelles telles que le tremblement de terre de Pisco (région d'Ica) en 2007 qui a fait plus de 300 000 victimes.

Notre étude ne portant que sur les crises récurrentes, de telles données mélangées sont difficiles à exploiter en l'état. Pourtant, n'ayant pu accéder à des données historiques faisant clairement le distinguo entre les crises récurrentes et les crises « exceptionnelles », nous avons été contraint de travailler sur cette base. Aussi, nous nous concentrerons plus spécifiquement dans la suite sur les régions de Amazonas, Ancash, Cajamarca, Huánuco, Junín, Madre de Dios, Pasco, Piura, Puno, San Martin, Tacna, et Tumbes qui sont les seules à présenter sur les années étudiées des historiques correspondant à la notion de crise récurrente (ici, nombre de victimes variant dans une amplitude de 2,5 fois maximum autour de la valeur moyenne).

Ce qui nous intéresse maintenant est le nombre moyen de victimes enregistré pour une catastrophe donnée ayant eu lieu dans une région donnée et à une période donnée. Nous avons rencontré ici une troisième difficulté dans l'obtention des données nécessaires à notre étude. En

effet, la méthode employée pour réaliser le décompte du nombre de crises a semble-t-il beaucoup changé entre les années 1990 et les années 2000.

Nous avons relevé des variations allant jusqu'à 16 000 % entre 1993 et 2007 pour une région donnée… N'ayant ni l'information, ni la légitimité pour retravailler ces données manuellement, il nous était impossible de disposer d'une estimation fiable du nombre de victimes pour une crise dans une région donnée et pour une année donnée. Nous avons donc limité notre application à l'estimation de la quantité de victimes pour une année donnée et une région donnée, quelque soit le nombre de crises.

No	Régions	Nombre total de victimes (données réelles)					
		1993	1995	2000	2007	2012	Histogramme
1	Amazonas	3 333	1 881	4 916	1 161	1 364	
2	Ancash	1 440	830	2 406	491	2 193	
3	Apurimac	*592*	812	372	3 815	3 014	
4	Arequipa	80	4 586	18 022	1 823	4 417	
5	Ayacucho	610	5 047	1 286	262	6 837	
6	Cajamarca	8 650	205	7 145	732	745	
7	Cusco	2 000	2 302	2 682	11 697	596	
8	Huancavelica	95	1 248	10 423	44 733	4 631	
9	Huanuco	3 877	4 187	5 264	1 969	5 284	
10	Ica	*952*	6 400	731	355 332	1 498	
11	Junin	632	1 218	734	3 267	2 790	
12	La Libertad	100	5	2 781	526	1 724	
13	Lambayeque	*53*	*638*	2 564	101	368	
14	Lima-Callao	3 282	4 308	1 955	56 116	6 312	
15	Loreto	392765	2 672	155141	2590	8 605	
16	Madre de Dios	215	1 245	737	134	231 827	
17	Moquegua	50	6 438	1 586	179	125	
18	Pasco	183	849	625	724	2 051	
19	Piura	*346*	2 565	1 130	1 733	649	
20	Puno	1 150	3 007	3 520	5 335	12 453	
21	San Martin	12 787	2 304	3 862	1 865	26 011	
22	Tacna	2 350	20	2 322	20	1 701	
23	Tumbes	525	750	940	49	4 655	
24	Ucayali	*1 619*	1 628	8 759	1 609	189	

N.B. Les données en italique sont des hypothèses établies pour pallier le manque de certaines données réelles.

Table V-12 : Nombre de victimes pour une catastrophe au Pérou : 1993 : 1995 : 2000 : 2007.

Nous avons dès lors appliqué le mécanisme décrit au Chapitre III à l'ensemble de ces données et obtenu les équations de régression multi-variées suivantes :

No	Régions	Equation de Régression Multi-Variée Obtenue
1	Amazonas	+38035,515*IDH+0,857*NCD+30227,91*VCS-40410,026
2	Ancash	+16826,995*IDH+0,686*NCD-2581,551*VCS-11168,97
3	Apurímac	+34299,477*IDH-5,995*NCD+91063,601*VCS-91550,67
4	Arequipa	+348649*IDH-10,623*NCD+814492,233*VCS-240522,978
5	Ayacucho	+621533,227*IDH+0,597*NCD+258270,109*VCS-479974,519
6	Cajamarca	-882137,69*IDH-0,699*NCD-1311377,424*VCS+1600535,042
7	Cusco	+220593,116*IDH +1,856*NCD-13987,094*VCS-112461,426
8	Huancavelica	+289253,681*IDH-8,676*NCD+570179,879*VCS-646952,953
9	Huánuco	-43062,933*IDH+0,893*NCD-64148,197*VCS+66515,424
10	Ica	+161046,558*IDH-13,451*NCD-895759,802*VCS+580042,954
11	Junín	+4118,794*IDH-0,022*NCD-12083,176*VCS+6633,609
12	La Libertad	+203718,006 *IDH+2,687*NCD-38391,946*VDC-128032,081
13	Lambayeque	+51480,326*IDH +1,779*NCD-7484,189*VCS-42826,641
14	Lima-Callao	+174323,153*IDH+0,44*QNCD-1450525,446*VCS+23054,334
15	Loreto	-8188822,64*IDH-14,17*NCD-6864768,675*VCS+4943835,767
16	Madre de Dios	+58615,818*IDH+0,022*NCD+103031,332*VCS-37854,745
17	Moquegua	+47548,176*IDH+0,026*NCD+8636,842*VCS-33671,117
18	Pasco	+43953,669*IDH-0,217*NCD+36170,662*VCS-42454,652
19	Piura	+21014,559*IDH-0,134*NCD+16910,62*VCS-18383,037
20	Puno	+75221,765*IDH+0,089*NCD+27714,244*VCS-57515,927
21	San Martin	-3418533,812*IDH-55,448*NCD-445324,247*VCS+2248853,148
22	Tacna	-38427,373*IDH+0,268*NCD+26868,258*VCS+21099,831
23	Tumbes	+11223,028*IDH+0,071*NCD+6190,019*VCS-10253,339
24	Ucayali	+39359,878*IDH+1,838*NCD+102590,051*VCS-28361,224

Table V-13 : Equation de régression pour chacun des 24 régions du Pérou.

Il nous reste désormais à valider la valeur de ces prévisions avant de les utiliser dans le modèle de localisation des entrepôts de pré-positionnement. Une première validation statistique habituelle consiste à vérifier que la liaison globale entre la variable expliquée Y et les variables explicatives Xi est significative. Pour cela, on utilisera un test de Fisher. La seconde validation consiste à comparer a posteriori les résultats obtenus par la régression avec les données réelles.

2.3.1. L'analyse de la régression linéaire multiple, approche statistique.

Le test statistique F_0 a une distribution F (Fisher) avec v1 = v2 = k et n - p degrés de liberté dans le numérateur et le dénominateur, respectivement. Dans ce cas, si le test statistique est supérieur à la valeur de $F_o=F_{\alpha , k , n - p}$ l'hypothèse nulle est rejetée. Par conséquence on peut conclure que la

variable indépendante est reliée à au moins une des variables indépendantes. Exemple. Pour la région Amazonas.

(i) L'hypothèse.
Ho : $\beta1=\beta2=\beta3=0$
H1 : à moins une des $\beta i \neq 0$

(ii) Règle de la décision.
Pour : $\alpha=0,05$; $k=3$; $n=6$.
On rejet Ho si $F_{calculé} > F_{critique}$
On accepte Ho si $F_{calculé} \leq F_{critique}$

(iii) Résultats.
En utilisant la fonction du logiciel Excel pour l'analyse de régressions linaires multiple, nous avons les résultats suivants : $F_{calculée} = 13,185$ est supérieur à $F_{critique} = 0,10468$. Par conséquent, on peut affirmer qu'il y a une liaison significative entre le nombre de victimes et les variables indépendantes IDH, NCD et VCS.

Régions	F calculé	F critique	Hypothèse: Ho	Hypothèse: H1
Amazonas	13,186	0,105	Rejetée	Accepté
Ancash	2,082	0,105	Rejetée	Accepté
Apurímac	44,621	0,105	Rejetée	Accepté
Arequipa	0,880	0,105	Rejetée	Accepté
Ayacucho	0,247	0,105	Rejetée	Accepté
Cajamarca	0,228	0,105	Rejetée	Accepté
Cusco	1,184	0,105	Rejetée	Accepté
Huancavelica	1,473	0,105	Rejetée	Accepté
Huánuco	12,933	0,105	Rejetée	Accepté
Ica	1,137	0,105	Rejetée	Accepté
Junín	0,577	0,105	Rejetée	Accepté
La Libertad	1,564	0,105	Rejetée	Accepté
Lambayeque	4,095	0,105	Rejetée	Accepté
Lima - Callao	3,858	0,105	Rejetée	Accepté
Loreto	9,660	0,105	Rejetée	Accepté
Madre de Dios	0,256	0,105	Rejetée	Accepté
Moquegua	2,472	0,105	Rejetée	Accepté
Pasco	29,879	0,105	Rejetée	Accepté
Piura	13,022	0,105	Rejetée	Accepté
Puno	0,406	0,105	Rejetée	Accepté
San Martín	0,147	0,105	Rejetée	Accepté
Tacna	14,081	0,105	Rejetée	Accepté
Tumbes	2,118	0,105	Rejetée	Accepté
Ucayali	5,222	0,105	Rejetée	Accepté

Table V-14 : Résultats du Test de signification global.

2.4. Etape 4 : Validation et exploitation du modèle

A la validation statistique, on rajoute une validation du modèle de prévision réalisée en comparant les données réellement constatées sur le terrain pour l'année 2012, aux résultats issus de l'application des modèles de prévisions construits pour chaque région. En théorie, lorsque le ratio de déviation est inférieur à 25 %, le modèle est considéré comme valide. Pour les besoins de la démonstration, la valeur de l'IDH de 2012 a été ré-étalonnée selon la même unité de mesure que

les années 1993, 1995, 2000 et 2007. Pour ce faire, nous avons ajouté à la valeur de l'IDH de 2007 la tendance constatée sur les 15 années précédentes pour la région considérée. Ce calcul donne par exemple un IDH de 0,61 en 2012 pour la région de Huánuco contre 0,37 avec la nouvelle échelle. Pour bien comprendre le principe de l'évaluation, intéressons-nous justement de plus prêt à la région de Huánuco qui correspond aux hypothèses associées aux crises récurrentes telles que nous les avons définies précédemment. Le tableau suivant présente les données employées, ainsi que le résultat obtenu pour l'année 2012. La régression aboutit à une prévision de 5013 victimes pour l'année 2012. La réalité des faits a été selon l'INDECI de 5284 victimes pour cette même année, soit un ratio de déviation de 5 %, ce qui est très satisfaisant (inférieur à 25 % selon les critères proposés au Chapitre III).

Huánuco	IDH	VCS	NCD	Victimes
1993	0,447	0,73	3852	3 877
1995	0,476	0,71	4161	4 187
2000	0,494	0,68	4080	5 264
2007	0,566	0,64	988	1 969
2012	0,606	0,59	2973	5013

Table V-15 : Résultat de la régression multi-variée sur la région de Huánuco, année 2012.

Ce cas d'application basé sur des données réelles démontre la pertinence de notre approche. Pour mettre en œuvre le calcul de prévision pour l'année 2012 sur l'ensemble des régions, nous avons considéré les données suivantes :

No	Región	IDH 2012	Nombre de crimes et délits (NCD) : 2102	Vulnérabilité de la construction (VDC) : 2012
1	Amazonas	0,609	4 146	0,59
2	Ancash	0,621	6 862	0,55
3	Apurímac	0,616	1 438	0,88
4	Arequipa	0,647	12 192	0,10
5	Ayacucho	0,510	2 782	0,57
6	Cajamarca	0,601	2 809	0,81
7	Cusco	0,613	6 751	0,77
8	Huancavelica	0,597	923	0,93
9	Huánuco	0,606	2 973	0,59
10	Ica	0,656	5 265	0,23
11	Junín	0,620	5 479	0,43
12	La Libertad	0,636	11 783	0,54
13	Lambayeque	0,627	9 428	0,45
14	Lima - Callao	0,685	77 876	0,04
15	Loreto	0,610	4 247	0,00
16	Madre de Dios	0,642	3 110	0,00
17	Moquegua	0,664	2 833	0,24
18	Pasco	0,611	2 021	0,45
19	Piura	0,620	7 143	0,47
20	Puno	0,598	3 453	0,68
21	San Martín	0,608	2 327	0,25
22	Tacna	0,626	5 552	0,07
23	Tumbes	0,662	4 246	0,43
24	Ucayali	0,628	4 410	0,00

Table V-16 : Données pour le calcul de prévision de l'année 2012.

Evidemment tous les cas ne fonctionnent pas aussi bien que le cas de la région de Huánuco… L'extension à l'ensemble des régions du Pérou pose plusieurs problèmes compte tenu des deux difficultés évoquées précédemment :

- Données sur le nombre de victimes mélangeant les crises exceptionnelles et les crises récurrentes, sans possibilité de faire proprement le distinguo ;
- Absence d'un décompte fiable et homogène du nombre de crises permettant de déterminer le nombre de victimes pour une crise donnée (et une seule).

L'ensemble des résultats obtenus est présenté dans le tableau suivant. Selon les critères de validation définis au Chapitre III, seules 2 régions présentent des modèles très fiables (ratio inférieur à 25 %) : Ancash et Huánuco. 3 autres régions ont des modèles corrects (ratio inférieur à 50 %) : Junín, La Libertad et Puno. Les autres régions sont au-delà du critère d'acceptation proposée au Chapitre III. Néanmoins, il convient de relativiser ce jugement en considérant que dans de pareilles situations, c'est avant tout l'ordre de grandeur qui va nous intéresser. En ce sens, nous proposons de tester les résultats obtenus selon un critère de variabilité inférieure à 250 % par rapport à la réalité.

No	Régions	Validation du modèle		
		Prévision 2012	2012	Validité ? Variation < 250%
1	Amazonas	4138	1 364	OK
2	Ancash	2566	2 193	OK
3	Apurímac	1087	3 014	OK
4	Arequipa	-	4 417	NV
5	Ayacucho	-	6 837	NV
6	Cajamarca	12870	745	NV
7	Cusco	24615	596	NV
8	Huancavelica	47896	4 631	NV
9	Huánuco	5013	5 284	OK
10	Ica	405836	1 498	NV
11	Junín	3909	2 790	OK
12	La Libertad	12555	1 724	NV
13	Lambayeque	2840	368	NV
14	Lima-Callao	115093	6 312	NV
15	Loreto	-	8 605	NV
16	Madre de Dios	-	231 827	NV
17	Moquegua	48	125	OK
18	Pasco	64	2 051	OK
19	Piura	1627	649	OK
20	Puno	6491	12 453	OK
21	San Martin	-	26 011	NV
22	Tacna	411	1 701	OK
23	Tumbes	155	4 655	OK
24	Ucayali	4460	189	NV

Table V-17 : Evaluation de la qualité des modèles de prévisions obtenus (année 2012).

Selon ce critère, il apparaît que les modèles proposés fonctionnent globalement bien dans 11 régions sur 24.

Pour l'essentiel, il s'agit des régions que nous avions identifiées au départ comme étant les plus en phase avec nos hypothèses de crises récurrentes (données non perturbées par des crises majeures). Pour les autres régions par contre, l'approche proposée ne semble pas satisfaisante. La proposition faite est relativement fiable, dès lors que nous disposons de données propres à disntiguer ce qui est dû à des crises récurrentes, de ce qui ne l'est pas.

On notera néanmoins que trois régions dont les données de récurrence étaient disponibles ne présentent pas des modèles valides : Cajamarca, Madre de Dios et San Martin. Pour les deux dernières, cela s'explique par le fait que 2012 a vu la survenue de deux catastrophes d'ampleur exceptionnelle dans ces régions. Par construction, nos modèles n'ont pas « prévu » ces catastrophes et leurs conséquences. Pour Cajamarca, il s'agit d'une région qui rencontre une très forte variabilité dans la survenue des crises qui la concernent. L'explication est sans doute ici liée au fait que la fréquence de survenue des crises récurrentes la concernant n'est pas annuel mais plutôt pluri-annuel.

Du coup, le modèle n'est pas tout à fait pertinent sur cet intervalle de temps. On notera que certaines régions ont des résultats nuls. Il s'agit en fait de régions pour lesquelles le modèle obtenu donne avec les valeurs de 2012 pour les facteurs discriminants des résultats négatifs (équation de régression). Probablement que dans ces cas, les facteurs identifiés à l'échelle du pays, ne sont pas les plus adaptés aux situations spécifiques de ces régions. Pour être plus pertinent, l'étape 2 de la méthode pourrait être réitérée à l'échelle de la région. Mais cela nécessiterait la mise à disposition des données utiles…

Les résultats en demi-teinte que nous obtenons sont, selon nous, essentiellement liés à la qualité des données que nous avons réussi à collecter. Ce problème de qualité des données nous invite à envisager dès à présent une suite à donner à ce travail qui consistera à collecter des données plus à même d'alimenter notre méthode.

Pour pouvoir développer plus avant le cas d'application, nous proposons de substituer le calcul de prévision par régression multi-variée - adapté aux seuls cas des crises récurrentes - par une approche de type moyenne mobile de longueur 2 autour de la valeur du nombre de victimes pour 2011 pour estimer la demande de 2012.

Le tableau suivant montre que cette option est globalement satisfaisante et nous permet d'obtenir sur l'ensemble des 24 régions des estimations de demande acceptables. Pour pouvoir développer plus avant le cas d'application, pour les régions où l'approche par régression multi-variée est inadaptée, nous proposons d'utiliser une approche de type moyenne.

Nous disposons des données du nombre de victimes sur les années 2003 à 2012.

Régions	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	Moyen. 2003-2012	1,5 Moyen.
Arequipa	1 318	860	132	108	1 823	224	680	366	1 906	4 417	1 183	1 775
Ayacucho	1 071	445	2 711	1 132	262	886	4 952	7 796	14 309	6 837	4 040	6 060
Cajamarca	2 130	1 285	5 082	1 315	732	5 474	1 282	1 160	1 713	745	2 092	3 138
Cusco	4 760	1 338	1 579	2 221	11 697	4 867	19	28 755	8 899	596	6 473	9 710
Huancavelica	1 075	1 443	938	1 796	44 733	281	249	1 123	3 925	4 631	6 019	9 029
Ica	137	54	21 974	412	355 332	606	238	653	3 201	1 498	38 411	57 616
La Libertad	228	100	475	555	526	260	1 035	5 073	1 150	1 724	1 113	1 669
Lambayeque	238	12	41	519	101	8 529	397	380	425	368	1 101	1 652
Lima-Callao	2 468	1 227	1 381	2 114	56 116	3 092	1 315	1 290	1 777	6 312	7 709	11 564
Loreto	2 002	3 313	4 272	2 939	2 590	2 946	5 752	6 006	100 023	8 605	13 845	20 767
Madre de Dios	6 294	208	295	447	134	56	203	54	230	231 827	23 975	35 962
San Martin	4 316	2 314	11 773	1 553	1 865	1 995	4 305	3 359	2 972	26 011	6 046	9 069
Ucayali	1 557	2 429	2 105	3 201	1 609	2 300	1 056	1 545	10 469	189	2 646	3 969

Table V-18 : Calcule des moyennes de Victimes de 2003 à 2012.

Ces données correspondent aux victimes des crises récurrentes et non récurrentes. Faute d'historique pour redresser les données, nous adoptons la procédure suivante :

- Calculer la moyenne M1 des victimes de la région sur 2003 à 2012 ;
- Si le nombre de victimes d'une année est supérieure à 1,5M1, on considére qu'il y a eu catastrophe non récurrente et on ne retient que M1 victimes pour l'année ;
- On calcule la moyenne M2 sur les données rectifiées ;
- On retient M2 comme estimation du nombre de victimes pour la région.

Régions	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	moyenne
Arequipa	1 318	860	132	108	1 183	224	680	366	1 183	1 183	724
Ayacucho	1 071	445	2 711	1 132	262	886	4 952	4 040	4 040	4 040	2 358
Cajamarca	2 130	1 285	2 092	1 315	732	2 092	1 282	1 160	1 713	745	1 455
Cusco	4 760	1 338	1 579	2 221	6 473	4 867	19	6 473	8 899	596	3 723
Huancavelica	1 075	1 443	938	1 796	6 019	281	249	1 123	3 925	4 631	2 148
Ica	137	54	21 974	412	38 411	606	238	653	3 201	1 498	6 718
La Libertad	228	100	475	555	526	260	1 035	1 113	1 150	1 113	656
Lambayeque	238	12	41	519	101	1 101	397	380	425	368	358
Lima-Callao	2 468	1 227	1 381	2 114	7 709	3 092	1 315	1 290	1 777	6 312	2 869
Loreto	2 002	3 313	4 272	2 939	2 590	2 946	5 752	6 006	13 845	8 605	5 227
Madre de Dios	6 294	208	295	447	134	56	203	54	230	23 975	3 190
San Martin	4 316	2 314	6 046	1 553	1 865	1 995	4 305	3 359	2 972	6 046	3 477
Ucayali	1 557	2 429	2 105	3 201	1 609	2 300	1 056	1 545	2 646	189	1 864

Table V-19 : Estimations de demande récurrente sur les 24 régions : données corrigées.

No.	Régions	Modèle	Real 2012 (ou Moyenne 2003-2012)	Prévision 2012	Variation absolute	Variation < 150 %
1	Amazonas	Multi-Variée	1 364	4 138	203,4%	NV
2	Ancash	Multi-Variée	2 193	2 566	17,0%	OK
3	Apurímac	Multi-Variée	3 014	1 087	63,9%	OK
4	Arequipa	Moyenne	1 183	724	38,8%	OK
5	Ayacucho	Moyenne	4 040	2 358	41,6%	OK
6	Cajamarca	Moyenne	2 092	1 455	30,4%	OK
7	Cusco	Moyenne	6 473	3 723	42,5%	OK
8	Huancavelica	Moyenne	6 019	2 148	64,3%	OK
9	Huánuco	Multi-Variée	5 284	5 013	5,1%	OK
10	Ica	Moyenne	38 411	6 718	82,5%	OK
11	Junín	Multi-Variée	2 790	3 909	40,1%	OK
12	La Libertad	Moyenne	1 113	656	41,1%	OK
13	Lambayeque	Moyenne	1 101	358	67,5%	OK
14	Lima-Callao	Moyenne	7 709	2 869	62,8%	OK
15	Loreto	Moyenne	13 845	5 227	62,2%	OK
16	Madre de Dios	Moyenne	23 975	3 190	86,7%	OK
17	Moquegua	Multi-Variée	125	48	61,6%	OK
18	Pasco	Multi-Variée	2 051	64	96,9%	OK
19	Piura	Multi-Variée	649	1 627	150,7%	NV
20	Puno	Multi-Variée	12 453	6 491	47,9%	OK
21	San Martin	Moyenne	6 046	3 477	42,5%	OK
22	Tacna	Multi-Variée	1 701	411	75,8%	OK
23	Tumbes	Multi-Variée	4 655	155	96,7%	OK
24	Ucayali	Moyenne	2 646	1 864	29,6%	OK
Qualité globale de la prévision des évenements récurrents						91,7%

Table V-20 : Modèles retenus et prévisions associées pour 2012 sur l'ensemble des 24 régions.

L'ensemble de ces données constitue un premier scénario de demandes récurrentes de court terme (petits tremblements de terre, inondations, coulées de boue…dans un période annuelle) et de moyenne terme.

3. Construction des scénarios

3.1. Choix des scénarios

Politiquement et administrativement, le Pérou est divisé en 24 régions. Toutes les données et statistiques disponibles se réfèrent à ce découpage. Ceci nous a conduits tout naturellement à retenir ces 24 régions comme « zonage » pour notre étude.

Nous avons constitué un premier scénario nous donnant les demandes dues aux catastrophes récurrentes (inondations, tremblements de terre d'intensité moyenne). Sur la base de ce seul scénario, nous pourrions utiliser le modèle mono-scénario pour déterminer la localisation des entrepôts répondant à ces demandes récurrentes. Mais le réseau que nous voulons implanter doit aussi permettre de réagir en cas de catastrophes non récurrentes. Pour avoir un réseau plus robuste, nous allons ajouter à ce premier scénario « récurrent » des scénarios correspondants à ces catastrophes non récurrentes. Le scénario récurrent aura un poids important (ici 50%). Nous utiliserons ensuite le modèle stochastique multi-scénario pour déterminer le réseau d'entrepôts.

Pour les catastrophes non récurrente, nous n'avons pu recueillir des données fiables et exploitables que sur les catastrophes de type tremblements de terre (la base des 2200 tremblements de terre répertoriés par l'IGP sur la période 1970 – 2007). Pour établir des scénarios significatifs (épicentre de la catastrophe, gravité, propagation, répercussion sur les infrastructures) et avoir des probabilités d'occurrence plausibles, nous nous sommes appuyés sur cette base pour valider la mise en œuvre de nos propositions.

Nous avons synthétisé cette base par région et par magnitude. Nous avons gardé cinq classes pour la magnitude :

- C0 : magnitude < 5,5 (ces séismes ne donne pas lieu à intervention humanitaire) ;
- C1 : magnitude entre 5,5 et 6,0 ;
- C2 : magnitude entre 6,0 et 7,0 ;
- C3 : magnitude entre 7,0 et 8,0 ;
- C4 : magnitude entre 8,0 et 9,0.

Le tableau suivant présente les probabilités d'occurrences et de magnitudes des tremblements de terre sur chaque région. La colonne « Fréquence » donne la probabilité qu'un séisme se produise dans une région. Les colonnes « % dans la région » donne la probabilité qu'un séisme frappant la région soit d'une classe donnée.

No	Régions	Fréquence dans la région	Distribution des séismes par classe de magnitude				
			CO	C1	C2	C3	C4
1	Amazonas	1,30 %	50 %	0 %	0 %	50 %	0 %
2	Ancash	10,0 %	75 %	0 %	0 %	0 %	25 %
3	Apurímac	1,30 %	86 %	0 %	14 %	0 %	0 %
4	Arequipa	10,0 %	93 %	0 %	0 %	0 %	7 %
5	Ayacucho	1,30 %	67 %	0 %	33 %	0 %	0 %
6	Cajamarca	1,30 %	88 %	0 %	0 %	12 %	0 %
7	Cusco	1,30 %	93 %	0 %	0 %	7 %	0 %
8	Huancavelica	1,30 %	89 %	0 %	11 %	0 %	0 %
9	Huánuco	1,30 %	60 %	40 %	0 %	0 %	0 %
10	Ica	10,0 %	86 %	0 %	0 %	0 %	14 %
11	Junín	1,30 %	82 %	0 %	0 %	18 %	0 %
12	La Libertad	10,0 %	86 %	0 %	0 %	14 %	0 %
13	Lambayeque	1,30 %	83 %	0 %	17 %	0 %	0 %
14	Lima	10,0 %	0 %	96 %	0 %	0 %	4 %
15	Loreto	1,30 %	0 %	0 %	75 %	25 %	0 %
16	Madre de Dios	1,30 %	0 %	50 %	50 %	0 %	0 %
17	Moquegua	10,0 %	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %
18	Pasco	1,30 %	60 %	40 %	0 %	0 %	0 %
19	Piura	1,30 %	0 %	0 %	80 %	20 %	0 %
20	Puno	1,30 %	100 %	0 %	0 %	0 %	0 %
21	San Martin	1,30 %	0 %	0 %	80 %	20%	0 %
22	Tacna	10,0 %	80 %	0 %	0 %	0 %	20%
23	Tumbes	10,0 %	66 %	0 %	0 %	34%	0 %
24	Ucayali	1,30 %	66 %	0 %	34 %	0 %	0 %
		Espérance	71 %	11 %	5 %	7%	7%

Table V-21 : Probabilité d'occurrence et de magnitude des séismes au Pérou.

Les séismes de magnitude <5,5 font partie des catastrophes récurrentes et sont déjà pris en compte dans le scénario « récurrent ».

Puno n'ayant pas de séismes majeurs est écarté.

Pour les régions de Lima (C1, C4), Madre de Dios (C1, C2), Piura (C2, C3) et San Martin (C2, C3) nous aurons deux scénarios. Au total nous aurons 27 scénarios.

Leurs probabilités seront proportionnelles à leurs fréquences dans l'ensemble des classes C1, C2, C3 et C4. Ce premier travail nous définit l'épicentre et la gravité de la catastrophe à l'épicentre. La seconde partie consiste à propager cette catastrophe sur les régions voisines en respectant les règles de propagation.

Par exemple, comme nous l'avons dit précédemment, une catastrophe sur Lima affectera aussi les régions côtières d'Ancash et Ica mais n'affectera pas les régions de Pasco et Junin de l'autre côté de la Cordillère.

Ensuite, il faut estimer la gravité sur ces régions pour pouvoir déterminer l'ensemble des demandes. Exemple : un séisme de niveau 8,5 à Lima donnera un séisme de niveau 7,5 sur Ancash et Ica. La dernière étape est d'estimer le nombre de victimes.

En première approche nous avons pris comme règle : le nombre de victimes est proportionnel à la taille de la population de la région touchée et à l'intensité du séisme. Le tableau suivant donne le pourcentage de la population touchée selon la magnitude.

Magnitude		Pourcentage de population touchée
de	à	
<6	6	0,001 %
6	7	0,100 %
7	8	1,000 %
8	9	10,000 %
9	10	100,000 %

Table V-22 : Part de la population affectée selon la magnitude.

A titre d'illustration, voici les demandes pour le scénario relatif à Ica et les deux relatifs à Lima.

Epicentre	Catégorie	Ancash	Arequipa	Ica	Lima
Ica	C4	0	6 889	68 886	6 889
Lima	C1	99	0	99	99
Lima	C4	99 302	0	99 302	993 025

Table V-23 : Scénarios pour les régions Lima et Ica.

Le tableau suivant donne l'ensemble des 28 scénarios (le scénario récurrent et les 27 non récurrents) avec les régions impactées, le nombre total de victimes du scénario et la probabilité de survenue de ce scénario.

En espérance, le nombre de victimes est de l'ordre de 114 000.

No du scénario	Région épicentre	Total régions impactées	Nombre de victimes	Fréquence du scénario
1	Evénements récurrents toutes régions		60 276	50,00 %
2	Amazonas	Amazonas- Loreto	1 977	1,03 %
3	Ancash	Ancash - La Libertad - Lima	87 560	4,10 %
4	Apurimac	Apurimac	201	0,29 %
5	Arequipa	Arequipa - Ica - Moquegua	135 720	1,15 %
6	Ayacucho	Arequipa - Ayacucho - Ica	392	0,68 %
7	Cajamarca	Cajamarca	4 952	0,25 %
8	Cusco	Cusco	6 977	0,14 %
9	Huancavelica	Huancavelica	153	0,23 %
10	Huánuco	Huánuco	4	0,82 %
11	Ica	Arequipa - Ica - Lima	82 663	2,30 %
12	Junin	Junin	8 823	0,37 %
13	La Libertad	La Libertad	13 225	2,30 %
14	Lambayeque	Lambayeque	956	0,35 %
15	Lima	Ancash - Ica - Lima	298	15,75 %
16	Lima	Ancash - Ica - Lima	1 191 630	0,66 %
17	Loreto	Loreto	640	1,64 %
18	Loreto	Loreto	903	0,49 %
19	Madre de Dios	Moquegua	1	0,98 %
20	Madre de Dios	Moquegua	148	1,15 %
21	Pasco	Pasco	2	0,82 %
22	Piura	Piura	1 352	0,98 %
23	Piura	Piura	6 915	1,15 %
24	San Martin	Loreto - San Martin	525	0,98 %
25	San Martin	Loreto - San Martin	5 721	1,15 %
26	Tacna	Pasco - Tacna	31 847	3,28 %
27	Tumbes	Puno - Tumbes	2 196	5,58 %
28	Ucayali	Ucayali	361	0,70 %
En espérance			46 790	100,00 %

Table V-24 : Les scénarios obtenus y la probabilité d'ocurrence.

Les séismes exceptionnels de grande intensité (scénario 4 et 15) vont demander l'intervention de l'aide internationale. Les stocks constitués par le Pérou seront largement insuffisant. Ces stocks sont actuellement prévus pour 100 000 victimes. Avec ce chiffre, en espérance, 7 574 victimes ne

pourront pas être secourues. Le tableau suivant donne, en espérance, le nombre de victimes qu'il sera impossible de secourir selon la capacité globale stockée.

N° Scénario	Nombre des victimes	Fréquence de scénario	Capacité stockée		
			100 000	200 000	300 000
5	135 720	1,15 %	35 720	0	0
16	1 191 630	0,66 %	1 091 630	991 630	891 630
Nombre de victimes structurellement « impossibles » à secourir avec la CLH			7 574	6 508	5 852

Table V-25 : Nombre de victimes structurellement impossible à secourir.

3.2. Evaluation de l'impact sur les infrastructures

Pour le calcul des dommages sur l'infrastructure, nous avons utilisé les études de référence menées par Tavera et al. (2001) et Predes (2009) ainsi que la norme péruvienne pour les constructions antisismiques MVCS (2003).

En cas de séismes, des ondes sismique se forment, ondes qui vont se propager et/ou s'amplifier en fonction notamment de la nature du sol et des conditions géologiques, géomorphologiques et topographiques de la zone traversée. Sous l'effet d'un même train d'onde, tous les sols ne vont pas se déformer et réagir de la même manière. Par suite, les dégâts seront différents d'une zone à l'autre. Voici un exemple de classification des sols utilisé pour Lima.

Type de zone	Niveau de danger	Périodes de vibration naturelle (secondes)	Facteur Sismique d'amplification (secondes)	Période naturel du sol (Ts)	Correspondance avec le type du sol (NBC, 2003)
I	Faible	0,1 – 0,3	1,0	0,4 s	S1
II	Moyenne	0,3 – 0,5	1,2	0,6 s	S2
III	Haut	0,5 – 0,7	1,4	0,9 s	S3
IV	Très haut	< 0,7	1,6	1,2 s	S4

Table V-26 : Résumé du zonage par sensibilité sismique (cas région Lima).

Source : Predes (2009) : PNUD (2009).

Ici nous retiendrons deux types de zone : les zones sensibles (SZ) dans lesquels les dégâts seront élevés et les zones non sensibles (NSZ) où les dégâts seront moindres.

3.2.1. L'impact sur la capacité d'entreposage.

Pour la région où se situe l'épicentre de la catastrophe, les experts estiment que la perte en terme de capacité de stockage, dépend à la fois de l'intensité de la catastrophe, des caractéristiques géologiques locales et de la vulnérabilité de la construction de l'entrepôt.

Lorsque la catastrophe se propage sur une région frontalière, elle perd de son intensité et les pertes seront plus faibles. Dans les deux cas, les pertes seront plus élevé en zone sensible SZ qu'en zone non sensible ZNS.

Par exemple, pour un tremblement de terre de 7,5 M, si la région de l'épicentre est une zone classée sensible (SZ), son entrepôt perdra 60 % de sa capacité de stockage. Mais, si la région est en zone non sensible NSZ, la perte sera seulement de 40 %, voir la figure suivante, pour les capacités d'entreposage (A).

En ce qui concerne les régions frontalières concernées par la propagation de la catastrophe, elles perdent 30 % de leurs capacités de stockage si elles appartiennent à une zone sensible ou 10 % en zone non sensible NSZ. Tous ces pourcentages ont été estimés sur la base de l'avis de praticiens sont impliqués dans les activités opérationnelles liées à la réponse humanitaire péruvienne.

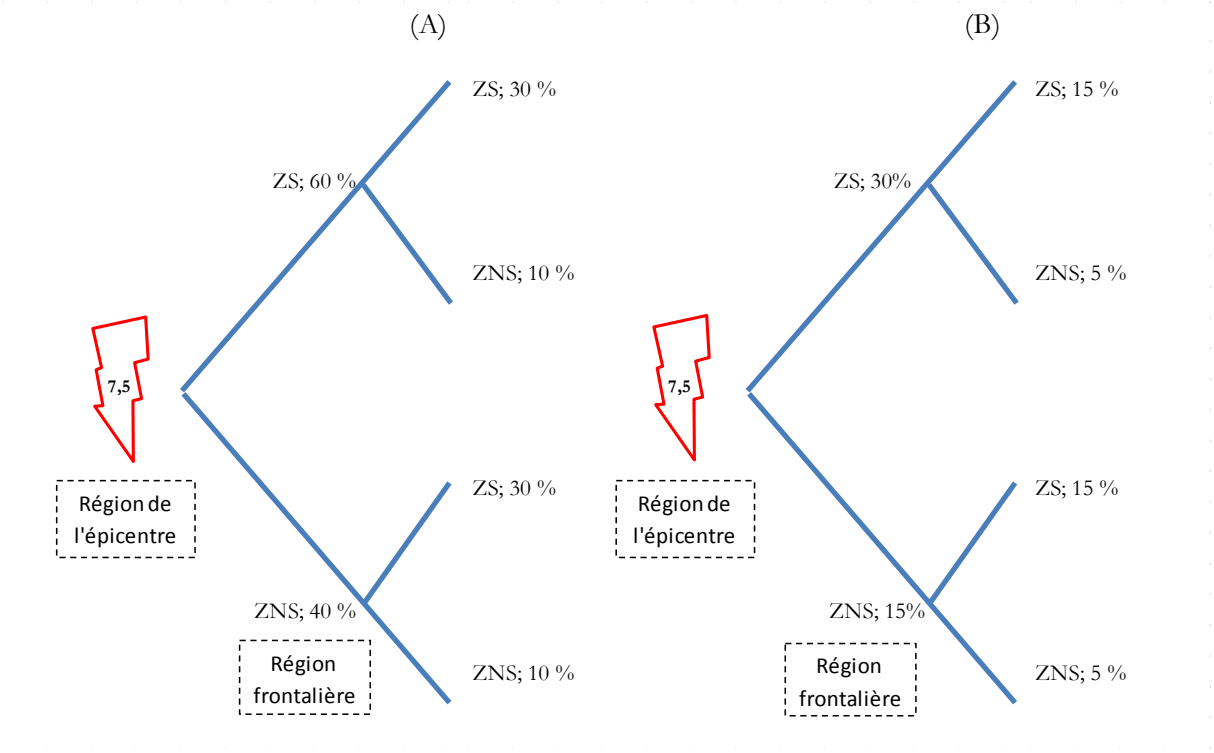


Figure V-10 : Arbre de propagation de l'impact.

3.2.2. L'impact sur la capacité de transport.

La capacité de transport est généralement réduite après des événements importants comme un tremblement de terre. En raison de la destruction totale ou partielle de véhicules (camions, trains, avions, navires), de l'arrêt des services publiques ou des entreprises privées distribuant pétrole, gaz, électricité, eau potable, etc., de la destruction des installations et des infrastructures (ponts, port, routes, etc.).

Par conséquent, les entreprises susceptibles de fournir ou transporter les secours pendant les opérations humanitaires peuvent ne pas être utilisables sur de longues périodes, même si elles n'ont pas souffert de dommages directs (NRC, 2006).

Nous utiliserons ici aussi un arbre de décision pour tenir compte de l'avis des experts quant à la réduction de la capacité de transport. Par exemple, pour un tremblement de terre de 7,5 M, si la région de l'épicentre appartient à une zone SZ, la capacité de transport sera réduite de 30%. Pour les régions épicentre NSZ, la perte sera de 15 % voir la figure antérieur part (B).

La table suivante donne les chiffres détaillés des pertes de capacité de l'entreposage et du transport, en fonction de l'intensité de la catastrophe et les caractéristiques de la région.

Magnitude	% Réduction de la capacité					
	Stockage			Flux de transport		
	Epicentre	Frontière		Epicentre	Frontière	
	SZ	SZ	SNZ	SZ	SZ	SNZ
	SNZ			SNZ		
5,5	0%	0%	0%	0%	0%	0%
	0%	0%	0%	0%	0%	0%
6,5	40%	20%	5%	10%	5%	1%
	20%	20%	5%	5%	5%	1%
7,5	60%	30%	10%	30%	15%	5%
	40%	30%	10%	15%	15%	5%
8,5	80%	40%	20%	70%	35%	15%
	60%	40%	20%	35%	35%	15%
9,5	100%	60%	40%	100%	65%	35%
	80%	60%	40%	65%	65%	35%
10,0	100%	80%	60%	100%	80%	60%
	100%	80%	60%	100%	80%	60%

Table V-27 : Vue d'ensemble de réduction potentielle des capacités en fonction de l'intensité.

Pour construire des scénarios plus fins, d'autres points pourraient être pris en compte. On pourrait s'interroger sur les services disponibles de camionnage, l'existence de goulots d'étranglement potentiels tels que des ponts ou des tunnels, ainsi que sur d'éventuelles pénuries pour obtenir le carburant et d'autres ressources vitales. (Coppola, 2007) répertorie les diverses actions pour évaluer les capacités logistiques post catastrophes. Cette liste comprend des éléments supplémentaires liés à l'accessibilité, tels que les dommages au réseau routier en ce qui concerne la possibilité de livrer du matériel de secours par routes, les restrictions telles que le poids, la largeur, la longueur, ou les limites de hauteur des ponts, tunnels, etc. Il recommande également de vérifier la disponibilité et le coût des moyens de transport, notamment ceux des camions utilisés par les gouvernements ou les ONGs.

3.3. Les stocks

Nous avons retenu un coût fixe pour la gestion des entrepôts de 10 000, un coût variable en raison de l'achat et la possession des kits de 1 par kit. Une victime non secourue (démuni) a un coût de 10 000.

Le tableau suivant donne les coûts de transport d'un kit entre quelques régions. A l'exception de Loreto et Ucayali, les frais de transport sont des coûts de transport par camion. En raison de la taille du Pérou (deux fois la surface de la France) et du manque d'infrastructures de transport terrestre, Loreto et Ucayali qui appartiennent à la zone de forêt péruvienne ne sont accessibles que par avion. Aussi, les coûts de transport pour ces régions sont plus élevés.

Régions	Arequipa	Ayacucho	Cusco	Ica	Junin	Lima	Madre de Dios	Puno	Ucayali
Arequipa	0,0	8,5	4,6	7,1	10,6	10,2	7,6	2,9	100,0
Ayacucho	8,5	0,0	5,1	5,0	2,1	6,1	9,4	9,0	100,0
Cusco	4,6	5,1	0,0	7,1	7,2	10,7	4,3	3,9	100,0
Ica	7,1	5,0	7,1	0,0	4,4	3,6	11,4	9,4	100,0
Junin	10,6	2,1	7,2	4,4	0,0	4,0	11,5	11,0	100,0
Lima	10,2	6,1	10,7	3,6	4,0	0,0	15,0	13,0	100,0
Madre de Dios	7,6	9,4	4,3	11,4	11,5	15,0	0,0	5,6	100,0
Puno	2,9	9,0	3,9	9,4	11,0	13,0	5,6	0,0	100,0
Ucayali	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	0

Table V-28 : Coûts de transport entre quelques régions du Pérou.

4. Exploitation du modèle et résultats

4.1. Capacité totale stockée de 100 000.

Nous avons fait tourner le modèle pour une capacité de 100 000 kits, sans limiter la taille des entrepôts (voir les deux tableaux suivants). Nous avons fait varier le nombre de ces entrepôts de 1 à 24. Au-delà de 8 entrepôts, la solution ne change plus. Dans tous les cas, on n'ouvre pas d'entrepôts dans les régions d'Ica, Tacna et Tumbes. Sur les petites valeurs, on remarque l'importance prise par le stock à Lima. Cette importance se confirme sur l'ensemble des scénarios.

Nombre des entrepôts	Transport	Entrepôt	Total	Victimes totales	Démunis
1	579 657	109 233	688 890	12 676	5 101
2	566 463	119 163	685 626	11 554	3 980
3	517 441	129 094	646 534	11 065	3 491
4	503 153	139 024	642 176	10 669	3 095
5	487 918	148 954	636 872	10 458	2 884
6	484 834	158 884	643 719	10 273	2 699
7	486 133	168 815	654 948	10 229	2 654
8 - 24	485 695	178 745	664 440	10 228	2 654

Table V-29 : Résultats obtenus pour une capacité totale de 100 000 kits (partie 1).

Amazonas	Ancash	Apurimac	Arequipa	Ayacucho	Cajamarca	Cusco	Huancavelica	Huanuco	Ica	Junin	LaLibertad	Lambayeque	Lima	Loreto	Madre De Dios	Moquegua	Pasco	Piura	Puno	SanMartin	Tacna	Tumbes	Ucayali
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	40 300	-	-	-	-	59 700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	11 744	-	-	-	-	33 711	-	-	-	-	54 545	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	11 744	-	-	-	8 445	23 947	-	-	-	-	55 864	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	11 744	-	-	-	8 445	23 947	-	-	7 253	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	11 744	3 834	-	-	6 240	22 059	-	-	7 512	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	-	10 937	4 253	-	-	5 703	22 059	-	-	5 994	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	2 444	419	10 518	3 834	-	-	5 703	22 059	-	-	6 413	-	48 611	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

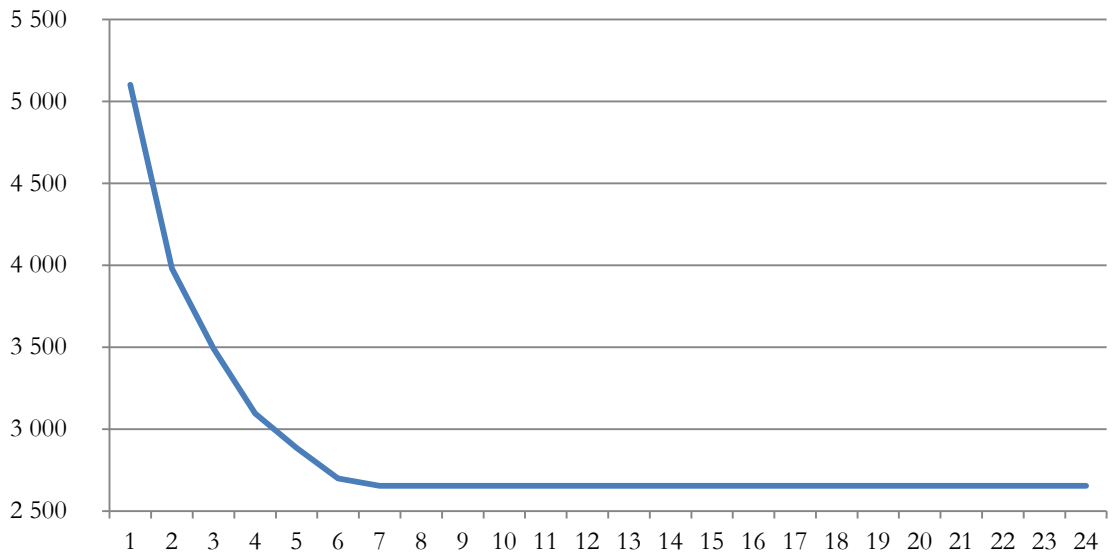
Table V-30 : Résultats obtenus pour une capacité totale de 100 000 kits (partie 2).

Le tableau suivant donne en espérance, le nombre de victimes non secourues. On rappelle que pour une capacité de 100 000 kits stockés, compte tenu des très forts séismes des scénarios 5 et 16, une moyenne de 7 574 personnes ne pourra pas être secourue (Tableau 5.24). La colonne 2 donne le nombre global en incluant ces 7 574 victimes et la colonne 3 le nombre net de démunis en soustrayant 7 574. L'optimum serait d'ouvrir 8 entrepôts. La dernière colonne donne la variation (en pourcentage) par rapport à cette valeur optimale.

Nombre des entrepôts	Victimes non secourues		% Par rapport optimal
	Global	Démunis	
1	12 676	5 101	28,166 %
2	11 554	3 980	14,007 %
3	11 065	3 491	12,795 %
4	10 669	3 095	7,316 %
5	10 458	2 884	6,854 %
6	10 273	2 699	1,696 %
7	10 229	2 654	0,000 %
8 -24	10 228	2 654	0,000 %

Table V-31 : Nombre de victimes non secourues en fonction du nombre d'entrepôts ouverts.

Nous retiendrons la quantité de 8 entrepôts comme solution satisfaisante pour le critère de satisfaction de la demande.



Evolution du nombre de victimes non secourues en fonction du nombre d'entrepôts ouverts.

Considérons maintenant les coûts logistiques (création des entrepôts, entreposage et transport). La dernière colonne donne la variation de coûts si on ajoute un entrepôt de plus que dans la solution de la ligne précédente.

Nombre des entrepôts	Coûts logistiques			% variation en ajoutant un entrepôt
	Transport	Entrepôt	Total	
1	579 657	109 233	688 890	0,476 %
2	566 463	119 163	685 626	6,046 %
3	517 441	129 094	646 534	0,679 %
4	503 153	139 024	642 176	0,833 %
5	487 918	148 954	636 872	-1,064 %
6	484 834	158 884	643 719	-1,715 %
7	486 133	168 815	654 948	-1,429 %
8 - 24	485 695	178 745	664 440	0,000 %

Table V-32 : Coûts logistiques en fonction du nombre d'entrepôts ouverts.

En ce qui concerne les coûts logistique, le coût minimum est obtenu pour 5 entrepôts ouverts.

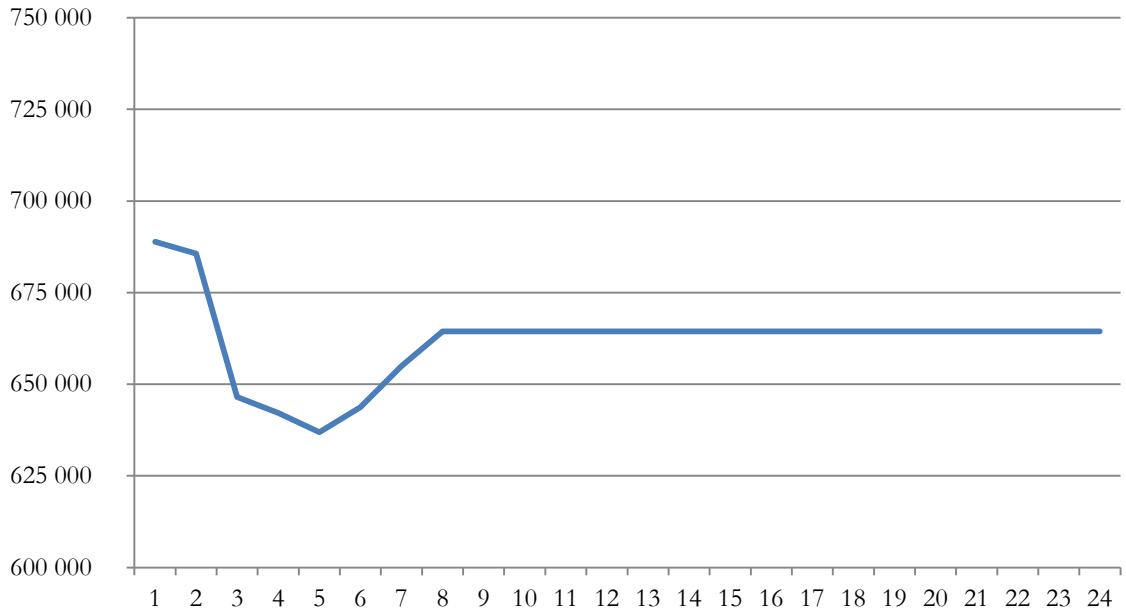


Figure V-11 : Evolution des coûts logistiques en fonction du nombre d'entrepôts ouverts.

Dans une première approche, la solution à retenir serait donc la solution avec 8 entrepôts donnée plus haut. C'est celle qui semble présenter le meilleur compromis entre efficience et résilience.

4.2. Variation des capacités globales stockées

Dans cette partie, nous cherchons à mesurer ce qu'amènerait le stockage d'une plus grande quantité de kits. Nous avons retenu ici 200 000 et 300 000. Le premier graphique donne le nombre des victimes non secourues pour une quantité maximale de kits stockés variables y compris celles qu'il est impossible de secourir sans aide extérieure. Sans surprise on constate que le nombre décroit avec le nombre de kits stockés.

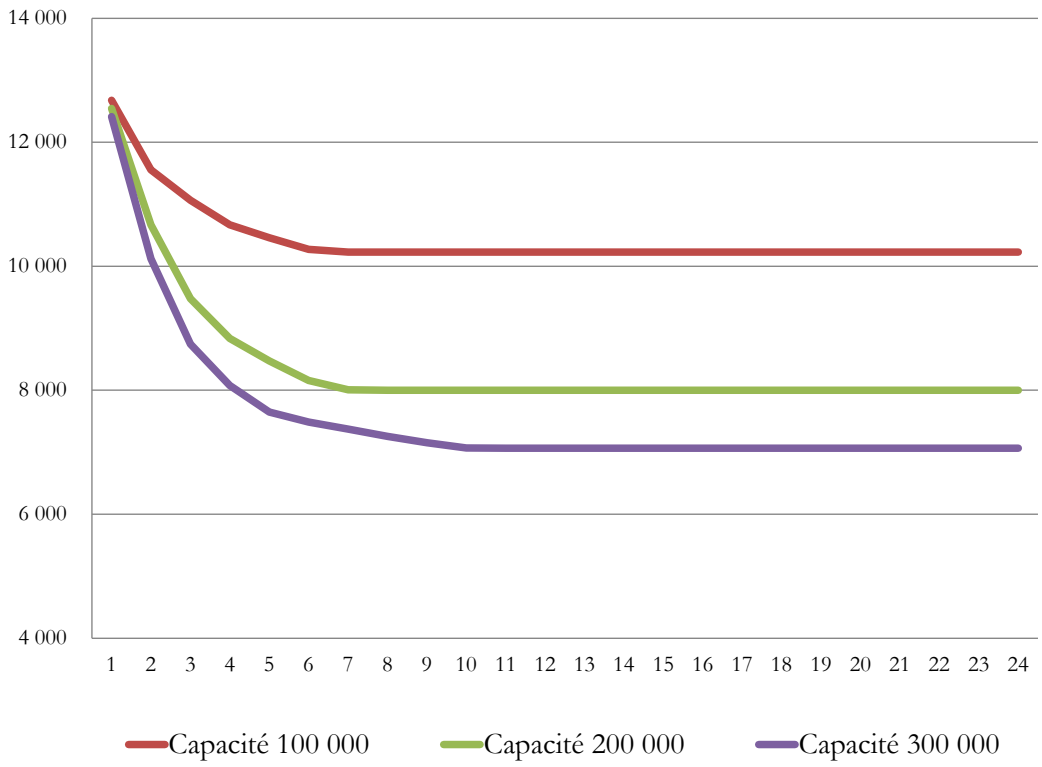


Figure V-12 : Evolution du nombre total de victimes non secourues.

Rappelons que le nombre de victimes impossibles à secourir est en espérance de 7 574, 6 508 et 5 852 pour 100 000, 200 000 et 300 000 kits. Ce second graphique donne les résultats en ce qui concerne les démunis (victimes susceptibles d'être secourues sans aide extérieure mais non secourues). Comme prévu, le nombre de démunis réduit quand on augmente le nombre de kits.
Pour les capacités 100 000 et 200 000, le nombre d'entrepôts reste égal à 8. Cependant le nombre des entrepôts augmente significativement de 8 à 11 entrepôts quand on augmente la capacité de 200 000 à 300 000 kits, comme indique la figure suivante sur l'évolution du nombre de victimes non secourues, parmi celles qu'il est possible de secourir pour une quantité maximale de kits stockés variables.

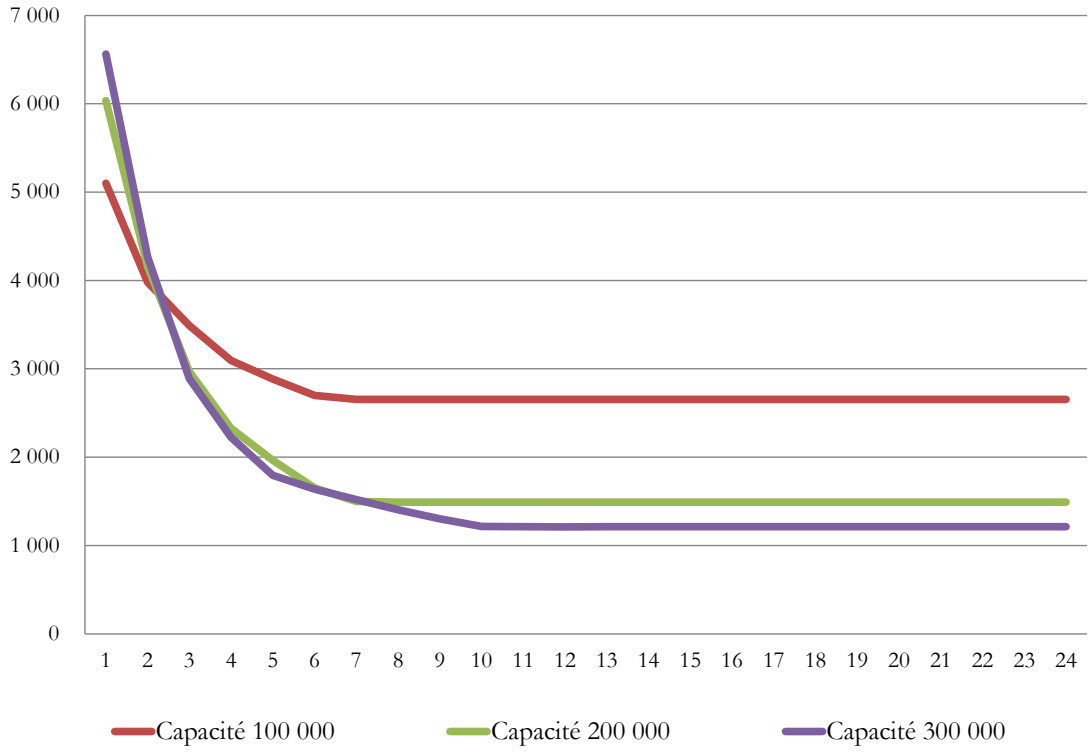


Figure V-13 : Evolution du nombre de victimes non secourues versus capacités global.

En ce qui concerne les coûts logistiques, les courbes sont parfaitement corrélées. L'indice de corrélation est de 97,6 % entre les courbes de capacité de 100 000 et 200 000 kits et de 99 % entre 200 000 et 300 000 kits.