Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes " naturelles ": contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones)

Frédéric Leone

▶ **To cite this version:**

Frédéric Leone. Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes " naturelles ": contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones). Géographie. Université Paul Valéry - Montpellier III, 2007. tel-00276636

HAL Id: tel-00276636
https://theses.hal.science/tel-00276636

Submitted on 30 Apr 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE PAUL VALERY – MONTPELLIER III

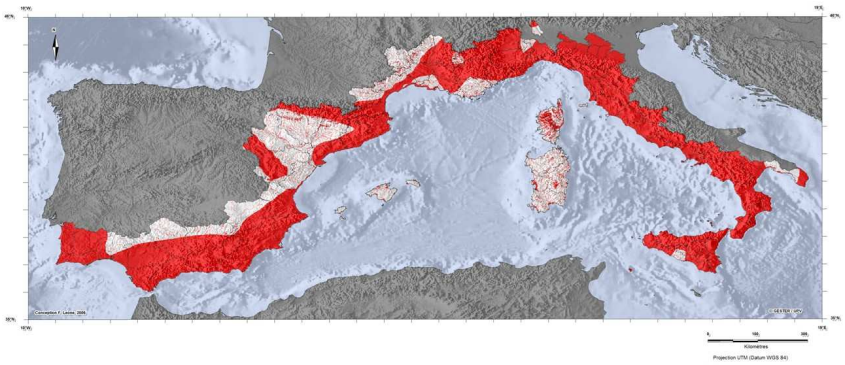
HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

(SECTION 23 : GEOGRAPHIE PHYSIQUE, HUMAINE, ECONOMIQUE ET REGIONALE)

VOL.2 – MEMOIRE

Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes « naturelles » : contribution à une évaluation géographique multirisque

(Mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones)



Frédéric Leone

Maître de conférences
Département de Géographie-Aménagement & Laboratoire GESTER
Université Paul Valéry – Montpellier III

Composition du jury

Maurice Burac	(Professeur, Université des Antilles et de la Guyane)
Gilles Hubert	(Professeur, Université Cergy-Pontoise)
David Lefèvre	(Professeur, Université Paul Valéry – Montpellier III)
Jean-Claude Thouret	(Professeur, Université Blaise Pascal – Clermont-Ferrand)
Pierre Usselmann	(Directeur de recherche émérite, CNRS)
Yvette Veyret	(Professeur, Université Paris X – Nanterre)

SOUTENUE LE 29 NOVEMBRE 2007

Présentation de l'auteur :

Frédéric Leone est Maître de Conférences (HDR) au Département de Géographie de l'Université Paul Valéry - Montpellier III et membre du laboratoire GESTER (Gestion des Territoire et des Risques).

Ses recherches portent sur la reconstitution et la modélisation spatiale des impacts physiques et socio-économiques des catastrophes naturelles (séismes, éruptions volcaniques, tsunamis, glissements de terrain, cyclones). Il développe également des applications cartographiques pour la prévention et l'évaluation des risques naturels. Il a participé à de nombreuses missions de retours d'expérience dans la Caraïbe, en Asie du Sud-Est et en Méditerranée.

Il co-dirige le master professionnel en Gestion des Catastrophes et des Risques Naturels de l'Université Montpellier III en collaboration avec Freddy Vinet. Ses activités contribuent plus généralement à la promotion d'une géographie des risques appliquée, en particulier dans les pays en développement.

CV : http://recherche.univ-montp3.fr/gester/
Email : Frederic.Leone@univ-montp3.fr
Master pro. GCRN : http://www.univ-montp3.fr/gcrn/

Citation du mémoire :

Leone F. (2007) – *Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes « naturelles » : contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones)* – Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), Section 23 (Géographie), Université Paul Valéry – Montpellier III, Laboratoire GESTER, Montpellier, 245 p. + Annexes.

Mémoire téléchargeable sur : http://recherche.univ-montp3.fr/gester/

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS **3**

INTRODUCTION : LA VULNERABILITE, DEFINITION D'UN CONCEPT CLE POUR L'EVALUATION DU RISQUE . **7**

PARTIE 1 : DEMANDE SOCIALE ET DISPONIBILITE DES DIFFERENTES APPROCHES D'EVALUATION DES VULNERABILITES **15**

1.1. Demande sociale et recherche sur les risques naturels : quelle adéquation ? ... **16**
1.1.1. Présentation *16*
1.1.2. L'analyse de la demande sociale *16*
1.1.3. Thèmes et interrogations scientifiques soulevés par la demande sociale *17*
1.1.4. Inventaire des grands programmes de recherche *19*
1.1.5. Analyse de la production scientifique relative au risque inondation *20*
1.1.6. Conclusion *22*
1.2. Un aperçu de la diversité des approches scientifiques sur les vulnérabilités **24**
1.2.1. Analyse de la production scientifique *24*
1.2.2. Synthèse des approches d'évaluation des vulnérabilités *29*
1.2.3. Disponibilité des approches *32*
1.3. Conclusion **34**

PARTIE 2 : APPORTS DES RETOURS D'EXPERIENCE ET DIAGNOSTICS DE RISQUE **37**

2.1. Le retour d'expérience : diversité des approches et des apprentissages **38**
2.1.1. La demande de retour d'expérience *38*
2.1.2. Les fondements de la démarche *39*
2.1.3. Différentes formes de retour d'expérience *40*
2.1.4. Différentes pratiques du retour d'expérience *41*
2.1.5. Bilan synthétique de nos retours d'expérience *54*
2.2. Le diagnostic de vulnérabilité : analyses de cas **59**
2.2.1. Le système vulnérable et ses facteurs *59*
2.2.2. Vulnérabilité des populations exposées aux lahars: le cas du Pinatubo *62*
2.2.3. Diagnostic de vulnérabilité humaine et territoriale : le cas de la Martinique *65*
2.3. Conclusion **99**

PARTIE 3 : L'INTEGRATION DE LA VULNERABILITE DANS LA MESURE DU RISQUE : APPROCHE QUANTITATIVE 101

3.1. Essai de formalisation analytique de la mesure du risque 102
3.1.1. Le risque au sens commun 102
3.1.2. Risque spécifique et risque global 103
3.1.3. La mesure de l'endommagement : indicateur de vulnérabilité 106
3.1.4. Risque et décision 109
3.2. Contribution à la modélisation prédictive des dommages multi-phénomènes .. 110
3.2.1. Les composantes d'un scénario de pertes spatialisé 110
3.2.2. Processus d'endommagement, critères et échelles de magnitude 111
3.2.3. Classes de vulnérabilité et indicateurs de valeurs des éléments exposés 127
3.2.4. Modalités d'endommagement structurel et échelles d'intensité 135
3.2.5. Disponibilité des matrices et courbes d'endommagement 145
3.3. Conclusion 156

PARTIE 4 : INDICATEURS GEOGRAPHIQUES DU RISQUE : APPROCHES MULTI-SCALAIRES 157

4.1. Utilité et disponibilité des indicateurs de risques 158
4.1.1. La notion d'indicateur et son utilité 158
4.1.2. Disponibilité internationale des indicateurs de risque naturel 159
4.2. Spatialisation des dommages potentiels : applications en Martinique 162
4.2.1. La mesure du risque 162
4.2.3. D'indispensables approximations 165
4.2.4. Une cartographie fine mais perfectible du risque de dommages 167
4.3. Diversité des indicateurs de risques : illustrations en Méditerranée 168
4.3.1. Présentation 168
4.3.2. Disponibilité et validation des données du SIG RINAMED 168
4.3.3. Choix des données et des zonages de référence 175
4.3.4. Construction des indicateurs géographiques 178
4.3.4. Perspectives et outils d'appropriation des indicateurs de risque 193
4.4. Conclusion 196

CONCLUSION : BILAN ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE 197

REFERENCES 205

REMERCIEMENTS 235

LISTE DES FIGURES 237

LISTE DES TABLEAUX 241

LISTE DES ANNEXES 243

ANNEXES 245

AVANT-PROPOS

Ce mémoire présente à la fois un état des lieux de la recherche scientifique sur le sujet, en réponse à une certaine demande sociale, une synthèse de notre propre activité, et un positionnement scientifique dans le champ de la géographie des risques. Il est alimenté par des réflexions théoriques et méthodologiques plus ou moins abouties, mais illustrées par des résultats concrets issus de nos recherches. Il laisse le champ à des questionnements scientifiques à portée opérationnelle et à des perspectives de recherche visant à mieux caractériser les systèmes de vulnérabilité aux catastrophes naturelles et faciliter ainsi les modes d'évaluation intégrée et spatialisée des risques naturels. Evaluation Intégrée, car la vulnérabilité y est appréhendée selon des approches multi-critères propres à caractériser les multiples facettes et facteurs qui la déterminent. Evaluation spatialisée, car le risque est mis en carte, de différentes façons et à différentes échelles, toujours selon une démarche intégrée où se combinent, critères de vulnérabilité, enjeux et aléas.

L'introduction pose les définitions des concepts clés inhérents à la science des risques et de leur évaluation. Ainsi sont posées les définitions générales et communément admises du risque, de la catastrophe, de la vulnérabilité, de la résilience et du territoire. La vulnérabilité, ou propension à l'endommagement, y est définie comme un système complexe faisant l'objet de plus en plus de préoccupations de la part des géographes travaillant sur le risque. Elle est composée d'une multitude de facteurs en interactions et demeure très liée à la notion d'acceptabilité du risque. Elle apparaît comme une problématique de recherche à part entière mais dont les approches et méthodes d'évaluations ne sont pas encore très bien formalisées ni structurées. Notre recherche s'est efforcée de développer ces approches et de les illustrer pour différents aléas naturels et en différents lieux, dans le cadre d'une Géographie qui se veut appliquée et selon des protocoles méthodologiques transposables.

La première partie est consacrée à une analyse comparée entre l'offre scientifique et la demande sociale en matière d'évaluation des risques depuis une dizaine d'année. Ce questionnement permet, à travers le cas des inondations, de justifier et d'orienter la recherche scientifique sur les risques pour les années à venir. Ensuite nous développons un bilan des méthodes d'évaluation des vulnérabilités aux catastrophes naturelles telles qu'elles sont pratiquées depuis une dizaine d'année dans le Monde. Sans prétendre à l'exhaustivité, cette analyse permet de déboucher sur une synthèse des différentes approches d'évaluation des vulnérabilités et d'esquisser le niveau de disponibilité des méthodes afférentes. Cette synthèse permet de positionner nos propres apports méthodologiques dans un champ de recherche en pleine émergence et de dégager par défaut des lacunes. Cette partie fait office de positionnement scientifique de notre propre recherche pour la discipline et de justification de cette recherche au regard d'une certaine demande sociale et institutionnelle sur la question des risques d'origine naturelle. Elle est basée en partie sur des travaux menés dernièrement pour le compte de différents ministères (Environnement et Equipement) en réponse ou en préparation de programmes de soutien à la recherche sur les risques naturels (programmes RIO, EPR et RDT).

La seconde partie rentre précisément dans une des approches de l'évaluation des vulnérabilités, celle rétrospective, avec le retour d'expérience. Après une présentation des différentes pratiques du retour d'expérience, on présente plusieurs exemples pour différentes catastrophes d'origine sismique (Colombie, Martinique, Maroc), mouvement de terrain (Equateur), volcanique (Philippines), cyclonique (Antilles) et tsunami (Indonésie). Ces analyses viennent éclairer plusieurs aspects de la vulnérabilité, considérée sous des acceptions diverses : physique (technique), humaine, organisationnelle et territoriale. Les enseignements portent aussi bien sur les modalités pratiques, spatiales, temporelles et méthodologiques de mise en œuvre de ces retours d'expérience, que sur les résultats qui en sont tirés pour forger la capacité d'expertise du chercheur. Il s'en suit un essai de synthèse, à portée opérationnelle, des principaux facteurs et critères de vulnérabilité pouvant être pris en considération dans le cadre de diagnostics de risque, c'est-à-dire en situation pré-crise selon une approche prospective. De tels diagnostics de vulnérabilité humaine et territoriale relèvent d'approches socio-géographiques classiques multi-critères. Ils sont développés et illustrés principalement sur la Martinique, petit territoire insulaire faisant office de laboratoire d'étude sur les risques naturels, et plus modestement sur les flancs du volcan Pinatubo aux Philippines. Ces approches permettent en particulier de mieux qualifier, voir quantifier, les différents degrés et déterminants de la représentation collective des risques naturels et d'attirer l'attention des décideurs sur certaines carences du système de prévention. Elles ont nécessité, au même titre que les retours d'expérience, de développer et valider des questionnaires d'enquêtes dont les perspectives d'applications sur d'autres sites sont nombreuses. En Martinique, le diagnostic territorial a été complété par une proposition officielle de zonage réglementaire du risque volcanique. Il est le résultat d'un compromis entre la recherche d'un certain niveau de protection collectivement acceptable et la nécessité de développer des secteurs à haute valeur touristique et environnementale.

La troisième partie pose le cadre d'un essai de formalisation analytique du risque en vue de sa quantification et de sa spatialisation au moyen d'indices de pertes potentielles combinant dans le meilleur des cas l'aléa, les enjeux et leurs vulnérabilités. La vulnérabilité y est traitée en tant qu'expression d'un endommagement potentiel dont les valeurs sont données par des matrices, des courbes ou des fonctions d'endommagement. Cette approche *a priori* de la vulnérabilité entre dans la notion de scénario de risque et de modélisation des pertes potentielles. Elle trouve son origine dans les nombreux travaux menés pour les séismes ces dernières décennies. Cette démarche quantitative suppose de définir au préalable les processus d'endommagement spécifiques à chaque phénomène, les critères physiques de leur magnitude et les modes et niveaux d'endommagement d'une série d'éléments exposés. Cette réflexion est menée pour les principaux aléas majeurs connus mais avec une analyse plus poussée pour les mouvements de terrain et les tsunamis. Elle conduit à proposer des échelles de magnitude, des typologies des éléments vulnérables et des échelles d'intensité des dommages adaptées à une évaluation quantitative, locale et spatiale du risque encouru.

La quatrième partie met en application les considérations théoriques et méthodologiques précédentes sur le territoire de la Martinique, pour les risques sismique, mouvements de terrain et volcanique. On y développe des expérimentations cartographiques qui sont basées sur le calcul d'indices de risque intégrant une modulation des dommages potentiels en fonction du niveau d'aléa et de la nature des enjeux présents (bâti). Ces applications cartographiques, largement perfectibles, posent les limites de la démarche mais laissent entrevoir des perspectives d'aide à la décision en offrant une évaluation spatialisée assez fine des pertes potentielles. Les évolutions futures de ces cartographies automatisées du risque vont dépendre du niveau de renseignement et de précision spatiale des systèmes d'information géographique

qu'elles utilisent. Un tel système d'information sur les risques naturels est en cours de constitution sur la Méditerranée (SIG RINAMED). Il est le fruit d'un important travail de collecte, de validation et d'harmonisation de plusieurs sources de données sur les aléas, les enjeux et les témoignages de catastrophes. La disponibilité de ces multiples jeux de données et une certaine demande institutionnelle permettent d'élargir la réflexion sur la notion d'indicateur géographique du risque appliqué au diagnostic territorial. On définit trois types d'indicateurs (simples, synthétiques et composites) appartenant à 7 grandes familles. La construction de ces indicateurs fait appel à différents protocoles méthodologiques en fonction des données utilisées et des échelles spatiales de l'affichage. Plusieurs exemples sont ainsi proposés sur la Méditerranée, à différentes échelles : maille géométrique uniforme, ville, découpage NUTS3, Etats. Cette nouvelle information géographique, *a priori* pertinente pour l'identification et la comparaison des territoires à risques, pose aussi la question des moyens de sa communication. C'est dans cet objectif qu'est développée une application cartographique en ligne, support du futur Atlas interactif sur les Risques Naturels en Méditerranée.

INTRODUCTION

LA VULNERABILITE, DEFINITION D'UN CONCEPT CLE POUR L'EVALUATION DU RISQUE

Le risque se définit au sens commun comme « un péril dans lequel entre l'idée de hasard » (Littré). De cette situation virtuelle, peut naître l'endommagement, expression concrète du risque pouvant conduire à la catastrophe. Cette dernière résulte donc de l'impact, humain, socio-économique, environnemental, psychologique, etc., de phénomènes naturels ou autres, sur les sociétés et leurs territoires. C'est une notion très relative en fonction du lieu d'où est perçu l'événement jugé catastrophique, une construction psychosociale dont la cause « naturelle » est souvent à rechercher bien loin des effets constatés (Gaillard, 2001). Pour les spécialistes de l'approche systémique, la catastrophe se définit comme la « rupture dans une trajectoire, dans la reproduction d'un système (...) suivie par l'émergence ou la bifurcation d'une nouvelle trajectoire et la mise en place d'un nouveau système » (Brunet et al., 1993). On conçoit dès lors que cette notion est très liée à la notion de seuil d'endommagement et que le franchissement ou non de ces seuils est largement conditionné par la capacité de réponse et de relèvement des sociétés concernées, autrement dit leur résilience (Tobin, 1999 ; Klein et al., 2003 ; Walker et al., 2004), ou par opposition, leur vulnérabilité.

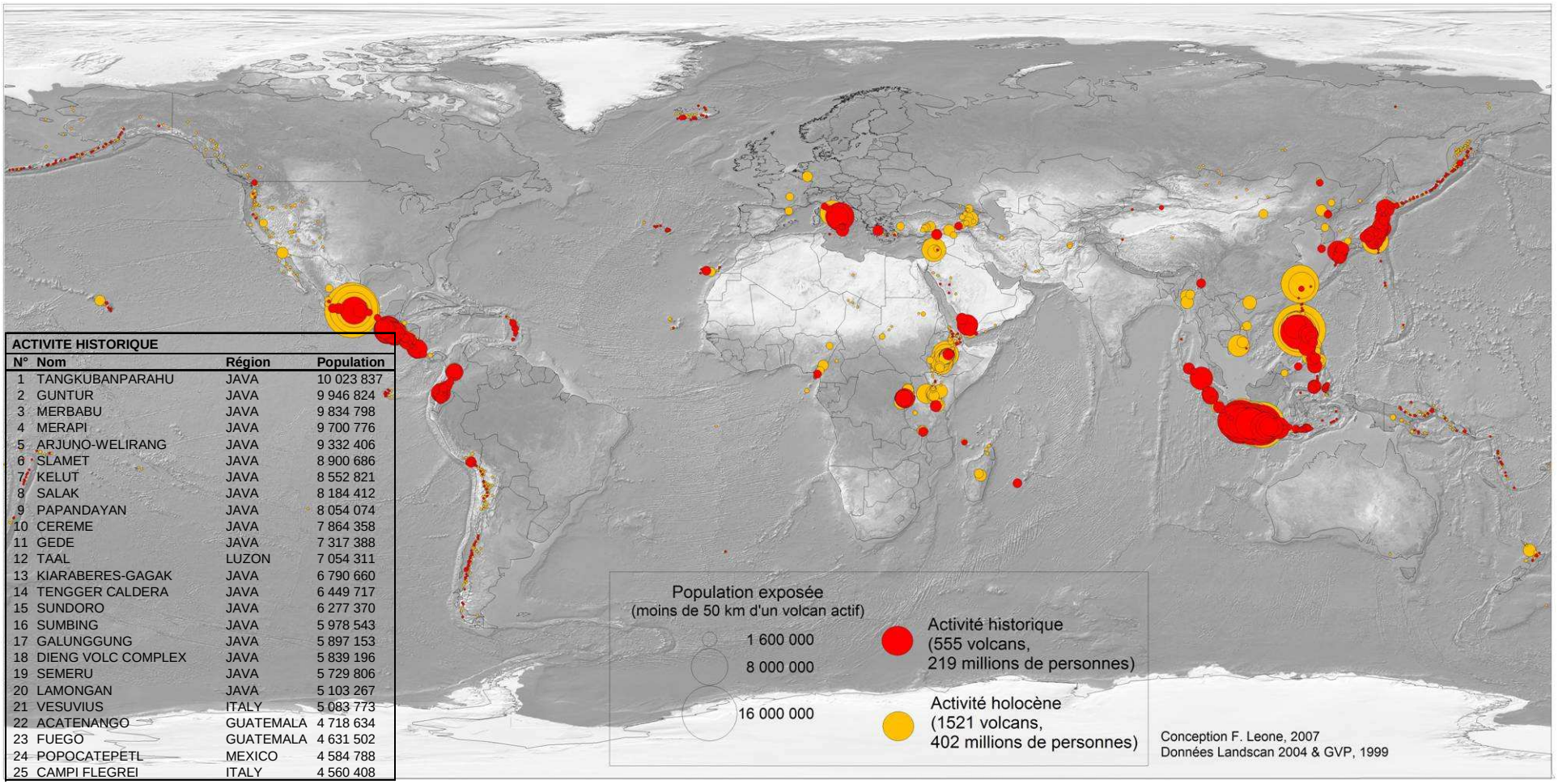
Les bilans socio-économiques et les nombreux retours d'expérience menés ces dernières années, nous enseignent que les catastrophes sont de véritables révélateurs de vulnérabilités humaines et territoriales au sein des communautés et sociétés frappées. En analysant par exemple la distribution socio-géographique des victimes mondiales de catastrophes naturelles sur la période 1973-2002 (Thouret & Leone, 2003), il apparaît des différences très significatives suivant l'état de pauvreté des pays touchés. Les pays les moins développés et les plus pauvres, présentant un Indice de Développement Humain (IDH) inférieur à 0,8 (= Mexique), ont enregistré sur cette période de 30 ans 96 % des décès imputables à des phénomènes naturels, ce qui fait indiscutablement de la pauvreté la première cause profonde de vulnérabilité. Près de 97% des individus ayant perdu la vie au cours de désastres en 2005 proviennent d'Asie, d'Océanie, d'Amérique Latine, de la Caraïbe et d'Afrique. Rapporté à la population totale des pays concernés, le nombre de personnes affectées (blessés, sans-abri ou ayant perdu leurs moyens de subsistance) et décédées est considérable. En Afrique et en Asie, entre 1974 et 2003, on recense souvent plus de 5000 individus ayant été victimes d'un désastre pour 100 000 habitants. L'impact économique des catastrophes rapporté aux ressources des états concernés est également beaucoup plus sévère au Sud qu'au Nord. Abramovitz (2001) note ainsi que le total des pertes économiques des pays du Sud pour la période 1999 et 2001 dépasse 13% du Produit Intérieur Brut des Etats concernés contre seulement 2% pour les pays du Nord.

Mais les dégâts du cyclone Katrina sur les Etats-Unis ont montré que le développement technologique et la richesse, s'ils permettaient de réduire l'exposition de nos sociétés aux risques majeurs, ne mettent pas à l'abri de catastrophes de grande ampleur. La vulnérabilité n'est donc pas la stricte fonction inverse du degré de développement économique et ses racines sont à rechercher également dans d'autres causes, directes ou indirectes, structurelles ou héritées, locales ou globales, collectives ou individuelles…

A l'échelle mondiale, la densification des enjeux dans les zones de danger apparaît comme un autre grand catalyseur de vulnérabilités. Il s'agit d'un processus très rarement réversible dont les causes premières sont à rechercher dans une attirance pour certains territoires fertiles ou stratégiques, mais à risque élevé, tels que les volcans, les littoraux, les deltas, les vallées, les cônes de déjection et parfois même les replats de glissements de terrain anciens. La croissance démographique, souvent couplée à un exode rural massif et encore actif dans certains pays en développement, a contribué à urbaniser de plus en plus ces sites à risque. A titre d'exemple, on estime actuellement à 402 millions le nombre de personnes vivant à moins de 50 km des 1521 volcans actifs émergés du globe (**figure I.1**). De nombreuses agglomérations multimillionnaires, comme Arequipa, Quito, Managua, Kagoshima ou Naples, se situent à moins de 25 km de volcans en activité (Chester et al, 2001).

Depuis une dizaine d'années, les géographes ont définitivement investi le champ des risques naturels. Cela s'est traduit par l'émergence de cette question dans les programmes des concours de l'enseignement secondaire et sa percolation progressive dans les manuels scolaires. Pourtant la visibilité du concept de risque dans la bibliographie géographique et dans la société en général s'accompagne d'un double mouvement. D'un côté, le succès de termes comme risque, vulnérabilité, résilience est tel qu'ils sont parfois galvaudés et entendus dans un sens large qui sape toute tentative de clarification sémantique. De l'autre, des concepts jadis flous (vulnérabilité) font l'objet de définitions de plus en plus claires et intégrées. Ainsi s'élabore lentement mais sûrement un corpus théorique, terminologique et méthodologique propre à la géographie du risque où les concepts ont un sens bien précis (Dauphiné, 2001 ; Veyret, 2004 ; Pigeon, 2005).

Si le terme d'aléa est réservé aux phénomènes naturels, les géographes français, dans la foulée des géographes américains de l'école de Chicago (*cf.* Barrows, 1923 ; White, 1973, 1974 ; White & Haas, 1975) se sont appropriés celui de vulnérabilité pour le développer et lui donner une dimension plus large que la simple vulnérabilité physique qui prévalait jusque-là (Veyret & Reghezza, 2007). En revanche, il convient de bien distinguer les enjeux de leur vulnérabilité alors qu'une tendance à la confusion englobait tout ce qui ne relevait pas de l'aléa sous le vocable « les vulnérabilités ». De même, exposition et vulnérabilités, parfois confondues, sont théoriquement indépendantes. L'exposition est la coïncidence spatiale entre les enjeux et l'aléa d'où la notion de zone à risque. Mais un bien, une usine par exemple peut être vulnérable aux inondations sans y être exposée si la route qui l'alimente en pièces détachées ou en matières premières est coupée par le débordement d'un cours d'eau. L'exposition peut être entendue au sens temporel notamment pour les phénomènes saisonniers comme les cyclones. Les enjeux sont exposés aux aléas cycloniques lors d'une certaine période de l'année variable selon les lieux. La vulnérabilité ne se limite donc pas aux zones exposées. L'analyse de la vulnérabilité ne doit donc pas s'arrêter aux espaces directement touchés par l'aléa. L'exemple de l'usine située hors zone inondable mais affectée par l'inondation démontre l'intérêt d'une approche territorialisée du risque où le territoire vulnérable ne se confond pas avec l'espace touché par l'aléa.



ACTIVITE HISTORIQUE

N°	Nom	Région	Population
1	TANGKUBANPARAHU	JAVA	10 023 837
2	GUNTUR	JAVA	9 946 824
3	MERBABU	JAVA	9 834 798
4	MERAPI	JAVA	9 700 776
5	ARJUNO-WELIRANG	JAVA	9 332 406
6	SLAMET	JAVA	8 900 686
7	KELUT	JAVA	8 552 821
8	SALAK	JAVA	8 184 412
9	PAPANDAYAN	JAVA	8 054 074
10	CEREME	JAVA	7 864 358
11	GEDE	JAVA	7 317 388
12	TAAL	LUZON	7 054 311
13	KIARABERES-GAGAK	JAVA	6 790 660
14	TENGGER CALDERA	JAVA	6 449 717
15	SUNDORO	JAVA	6 277 370
16	SUMBING	JAVA	5 978 543
17	GALUNGGUNG	JAVA	5 897 153
18	DIENG VOLC COMPLEX	JAVA	5 839 196
19	SEMERU	JAVA	5 729 806
20	LAMONGAN	JAVA	5 103 267
21	VESUVIUS	ITALY	5 083 773
22	ACATENANGO	GUATEMALA	4 718 634
23	FUEGO	GUATEMALA	4 631 502
24	POPOCATEPETL	MEXICO	4 584 788
25	CAMPI FLEGREI	ITALY	4 560 408

Figure I.1. Localisation des 402 millions de personnes vivant à moins de 50 km d'un des 1521 volcans actifs émergés du globe (activité au cours de l'Holocène) (54 % au pied de volcans ayant eu une période d'activité historique)

S'il est désormais admis que le risque naît de la conjonction d'une menace (l'aléa) et d'enjeux plus ou moins vulnérables, la prise en compte des vulnérabilités comme composante fondamentale du risque au même titre que l'aléa tarde à entrer dans les mœurs. En effet le risque a été longtemps étudié sous l'angle de l'aléa. Tant pour les risques sismique qu'hydroclimatiques, l'opinion des décideurs, les financements et le savoir faire scientifique se sont longtemps tournés vers l'aléa (modélisation hydraulique et sismique en particulier). En géographie, les spécialistes de la géographie des risques se sont pour la plupart formés au départ sur les aléas (géoclimatologues, géomorphologues, hydrologues). Ils ont « glissé » vers une approche plus globale, parfois anthropocentrée de la notion de risque.

La vulnérabilité des territoires et des sociétés exposées aux menaces d'origine naturelle est pourtant une composante fondamentale de l'appréciation du risque sur laquelle doit porter l'effort d'évaluation et de mitigation. Nombreuses sont les définitions, officielles ou non, de la vulnérabilité. Elles sont influencées par les différentes écoles de pensées et les différentes disciplines impliquées dans son évaluation (sociologie, ingénierie, géologie, climatologie ou géographie). Une brève revue (**tableau I.1.**), montre que ses définitions reposent soit sur l'étymologie du terme (la vulnérabilité en tant qu'état), soit sur sa mesure (la vulnérabilité en tant que conséquence), soit sur ses facteurs (les causes de la vulnérabilité), soit sur une combinaisons des trois.

Mais en règle générale, deux grandes tendances apparaissent selon que l'on appréhende la vulnérabilité d'un point de vue social, en tant que propension à subir ou résister à l'endommagement, ou d'un point de vue technique, en tant que mesure de l'endommagement (D'Ercole, 1994 et 1996a ; Reghezza, 2006). Le problème des définitions « techniques » est qu'elles confondent le sens même de ce concept avec ses modalités d'évaluation. Aussi, pour éviter cette confusion, la définition qui nous semble la plus appropriée est celle *« d'une propension à l'endommagement ou au dysfonctionnement de différents éléments exposés (biens, personnes, activités, fonctions, systèmes) constitutifs d'un territoire et d'une société donnés »*. C'est cette définition, non réductrice, dépouillée de toute considération méthodologique et la plus proche de l'étymologie du terme, que l'on adoptera au fil de nos développements. L'endommagement y est donc défini comme un indicateur, ou un marqueur de vulnérabilité.

Une approche analytique déclinera la vulnérabilité par nature d'enjeux exposés (ou éléments vulnérables) à différents aléas naturels (Dauphiné, 2004). Cette typologie répond directement au besoin de recherche des facteurs et causes de vulnérabilité, avec pour objectif essentiel d'expliquer plutôt que de modéliser. Ainsi on peut distinguer différentes formes de vulnérabilités suivant la nature des éléments exposés :

- physique, pour les infrastructures physiques (bâti, réseaux physiques, ouvrages d'arts, etc.) ;
- corporelle, pour les personnes physiques ;
- humaine ou sociale pour les populations (approches sociale ou psycho-sociales) ;
- organisationnelle ou institutionnelle, pour les actions menées par des organismes privés ou publics ;
- environnementale, pour les composantes du milieu naturel (végétation, ressources en eau, etc.) ;
- fonctionnelle, pour les fonctions et activités (économiques notamment) supportés par les éléments précédents.

Tableau I.1. Différentes définitions de la vulnérabilité dans le champ de l'évaluation des risques d'origine naturelle

Définitions de la vulnérabilité	Source	Date	Références		
			ETYMO.	FACT.	METHO.
D'institutions impliquées dans la gestion du risque					
The characteristics of a person or group in terms of their capacity to anticipate, cope with, resist and recover from the impact of a natural or man-made hazard.	IFRC	1999		X	X
Degré de perte (de 0% à 100%) résultant d'un phénomène susceptible d'engendrer des victimes et des dommages matériels.	ONUG-DHA	2000			X
The degree to which a system is susceptible to, or unable to cope with, adverse effects of climate change, including climate variability and extremes. Vulnerability is a function of the character, magnitude, and rate of climate variation to which a system is exposed, its sensitivity, and its adaptive capacity."	IPCC	2001	X	X	X
A set of conditions and processes resulting from physical, social, economical, and environmental factors, which increase the susceptibility of a community to the impact of hazards. Positive factors, that increase the ability of people and the society they live in, to cope effectively with hazards, that increase their resilience, or that otherwise reduce their susceptibility, are considered as capacities	ISDR (ONU)	2002		X	
La vulnérabilité définit la mesure dans laquelle un système peut être dégradé ou endommagé par l'évolution du climat. Elle dépend non seulement de la sensibilité, mais aussi de l'adaptabilité du système à de nouvelles conditions climatiques.	AGORA 21 (climat)	?	X	X	X
La vulnérabilité indique la fragilité des éléments à risque par rapport à l'occurrence d'un événement. Quantifier la vulnérabilité reviendrait à estimer un coefficient où une valeur de 1 représenterait une vulnérabilité maximale et une valeur de 0 une vulnérabilité nulle.	MRM-Genève	?	X		X
La vulnérabilité, c'est l'ignorance des risques, c'est le manque de préparation, de prévention. C'est vivre dans des constructions non adaptées et dans des zones dangereuses. C'est aussi l'immobilisme des institutions politiques et administratives, la non-transmission des connaissances, l'absence de formation et d'information.C'est enfin exploiter les ressources naturelles sans en assurer ni le renouvellement et ni le contrôle	AUI-ONG	?		X	
The extent to which a community, structure, service or geographic area is likely to be damaged or disrupted by the impact of a particular hazard.	USAID-OAS	?	X		
Vulnerability is the susceptibility of resources to negative impacts from hazard events.	NOAA	?	X		
D'auteurs spécialistes du risque					
Caractère vulnérable, qui peut être blessé, frappé par un mal physique	Dict. Robert	1990	X		
Propension variable d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique	D'Ercole	1994	X		
The characteristics of a person or a group in terms of their capacity to anticipate, cope with, resist, and recover from the impact of a natural hazard. It involves a combination of factors thatdetermine the degree to which someone's life and livelihood is put at risk by a discrete or identifiable event in nature or society. [...] Vulnerability concept consists of two opposing forces: On one hand, the processes that cause vulnerability that can be observed; on the other hand, the physical exposure to hazards (earthquakes, storms, floods, etc.). Vulnerability develops then from underlying reasons in the economic, demographic and political spheres into insecure conditions (fragile physical environment, instable local economy, vulnerable groups, lack of state or private precautions) through the so-called dynamic processes (e.g., lack of local institutions, under-developed markets, population grovvth, and urbanization).	Blaikie et al.	1994	X	X	
Grandeur pouvant être évaluée par le niveau d'endommagement constaté ou potentiel d'un élément exposé donné, soumis à l'action d'un phénomène déclaré ou pressenti, d'intensité donnée.	Leone	1996			X
The potential for loss or the capacity to suffer harm from a hazard…can generally be applied to individuals, society, or the environment	Mitchell & Cutter	1997	X		X
The likelihood that some socially defined group in society will suffer disproportionate death, injury, loss or disruption of livelihood in an extreme event, or face greater than normal difficulties in recovering from a disaster	Handmer & Wisner	1998			X
Potential for losses or other adverse impacts. People, buildings, ecosystems or human activities threatened with disaster are vulnerable. [...] Essentially, vulnerability refers to the potential for casualty, destruction, damage, disruption or other form of loss with respect to a particular element	Alexander	2000			X
The amount of (potential) damage caused to a system by a particular climate-related event or hazard	Jones & Boer	2003			X
As a state that exists within a system before it encounters a hazard event	Allen	2003			
Vulnerability is the degree to which a system, subsystem, or system component is likely to experience harm due to exposure to hazard, either a perturbation or stress/stressor.	Turner et al.	2003			X
Vulnerability (in contrast to poverty which is a measure of current status) should involve a predictive quality: it is supposedly a way of conceptualizing what may happen to an identifiable population under conditions of particular risk and hazards. Is the complex set of characteristics that include a person's: initial well-being (health, morale, etc.); self-protection (asset pattern, income, qualifications, etc.); social protection (hazard preparedness by society, building codes, shelters, etc.); social and political networks and institutions (social capital, institutional environment, etc.)	Cannon et al.	2004		X	
An internal risk factor of the subject or system that is exposed to a hazard and corresponds to its intrinsic predisposition to be affected, or to be susceptible to damage. In other words, vulnerability represents the physical, economic, political or social susceptibility or predisposition of a community to damage in the case of a destabilizing phenomenon of natural or anthropogenic origin.	Cardona	2004	X	X	
Propension à l'endommagement ou au dysfonctionnement de différents éléments exposés (biens, personnes, activités, fonctions, systèmes) constitutifs d'un territoire et d'une société donnés	Leone	2007	X		

ETYMO : référence à l'étymologie du mot ; FACT. : référence aux facteurs de vulnérabilité ; METHO. : référence à la méthode d'évaluation
Autres recueils de définitions : Quarantelli, 1985 ; Porfiriev, 1995 ; Rosentahl, 1998 ; DERC, 1998 ; FEMA, 1990 ; ONU/DHA, 2000 ; Griot & Ayral, 2002 ; ISDR, 2002 (annexe 1)

Mais comme nous l'enseigne l'approche systémique (Pigeon 2005), la vulnérabilité d'un territoire n'est pas réductible à la somme des vulnérabilités des enjeux exposés. Une approche holistique de la vulnérabilité s'impose pour décrire et analyser les systèmes complexes (territoriaux, sociaux, organisationnels, institutionnels, etc.) supportés par l'ensemble des éléments précédents. On parlera dans ce cas là de vulnérabilité systémique ou territoriale, en définissant le territoire comme un espace de vie plus ou moins approprié et organisé par l'homme qui se décline à différentes échelles. Ces différentes formes de vulnérabilité s'identifient donc dans des échelles de temps et d'espace, qui leur sont propres suivant la nature des éléments vulnérables, leur niveau d'organisation, leur implantation géographique et la période analysée (avant, pendant ou après une crise). Il apparaît donc clairement que la vulnérabilité est un système dynamique et complexe, aux causes multiples et articulé autour d'une multitude de facteurs directs et indirects, en interaction souvent complexe et difficile à modéliser (**figure I.2**).

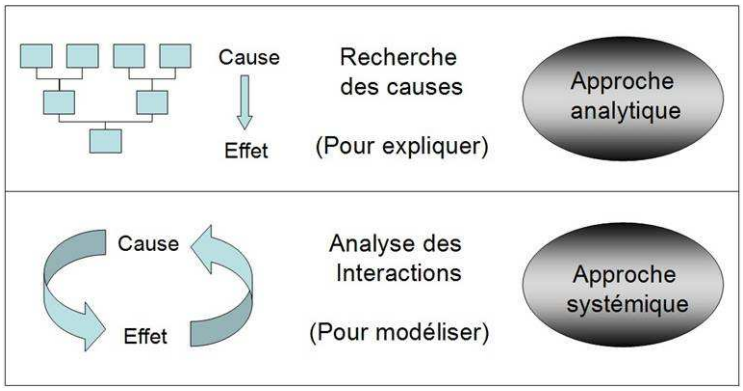


Figure I.2. Deux grandes approches d'évaluation des vulnérabilités

La notion d'acceptabilité du risque est peu débattue chez les géographes. Pourtant, la notion d'acceptabilité est selon nous au cœur du débat sur les risques en tant que variable d'ajustement du seuil de réduction du risque et donc des vulnérabilités. Elle est en quelque sorte une mesure en creux de la vulnérabilité. La question politique de premier ordre est bien celle du niveau de risque que les populations exposées sont prêtes à supporter. Une des approches de la vulnérabilité consisterait à déterminer le degré d'acceptation d'un risque par une population donnée afin d'en déduire la vulnérabilité. La méthode « Inondabilité » développée par le Cemagref réduit d'ailleurs la mesure de la vulnérabilité à l'acceptabilité de l'aléa. La « vulnérabilité » y est définie par un niveau d'aléa acceptable exprimé en intensité et période de retour pour chaque type d'enjeu (Gendreau, 1999). Le problème est que ce niveau d'acceptabilité de l'aléa ou du niveau de risque en général dépend de facteurs difficilement quantifiables comme l'ont montré les psychosociologues et sociologues et que sa quantification est difficile (Peretti-Watel, 2001). Dauphiné (2001) esquisse un tableau des facteurs de perception des risques naturels : compréhension du phénomène, concentration spatiale et temporelle des victimes…, pour ne retenir que quelques exemples. Le contrôle personnel (réel ou perçu) est un facteur de plus grande acceptabilité du risque. Ainsi les homicides ou les accidents de la route, infiniment plus meurtriers que les catastrophes naturelles sont mieux tolérés. Pour Theys (1991), l'acceptabilité du risque est étroitement liée aux valeurs associées au danger et aux enjeux. En ce sens, la perte de considération pour les valeurs véhiculées par l'ancienne société rurale expliquerait l'intolérance croissante des populations pour les excès (sécheresse, inondations, avalanches) d'une nature qui ne fait plus partie des valeurs quotidiennes mais relégués dans les horizons ludiques de sociétés de plus en plus urbanisées. A contrario, la valeur croissante accordée aux enjeux (matériels et humains) abaisse le niveau d'acceptabilité et rend plus intolérable toute perturbation venant d'une nature dont de moins en moins de personnes tirent directement leur subsistance. L'acceptabilité d'un aléa est liée à la perception de l'aléa et des vulnérabilités elles-mêmes par les populations potentiellement sinistrées. Par exemple la non perception de leur propre vulnérabilité par des populations exposées à des risques naturels est elle-même un facteur de vulnérabilité qui va contrarier la mise en place de mesures de préventions. Dans leur approche des risques, les Suisses (Planat, 2003) distinguent l'analyse des vulnérabilités de leur évaluation.

En effet, au-delà de l'analyse des vulnérabilités il convient dans une démarche opérationnelle de déterminer le niveau de vulnérabilité acceptable ou par défaut les vulnérabilités inacceptables sur lesquelles se portera prioritairement la prévention. La vulnérabilité physique peut être considérée comme indépendante de l'acceptabilité du risque mais la vulnérabilité politique et sociale est très liée à l'acceptabilité du risque. C'est ce qui rend la vulnérabilité d'une société dans son ensemble difficilement quantifiable et « modélisable ». L'acceptabilité du risque est liée à l'aléa et ses paramètres de fréquence, magnitude… mais aussi et surtout à l'état de la société qui désigne la capacité d'un organisme, d'un être, et par extension d'un groupe social à dépasser une épreuve voire à s'appuyer dessus pour progresser et reconstruire (Leone & Vinet, 2006).

On comprend dès lors que la réduction des risques, faute de pouvoir contenir la plupart des phénomènes en cause, est avant tout une question de réduction des enjeux exposés et des facteurs qui font les vulnérabilités, qu'ils soient d'origine démographique, institutionnelle, organisationnelle, politique, conjoncturelle, technique, socio-économique, culturelle ou psycho-sociale (D'Ercole, 1994). Mais cette réduction passe préalablement par la maîtrise d'un concept émergeant, encore très débattu et aux acceptations différentes, et la mise à disposition de méthodes d'évaluation jusqu'alors trop dispersées. Depuis dix ans, notre recherche s'est nourrie de ce concept clé pour l'évaluation et la maîtrise des risques, en tentant d'en formaliser davantage les approches, les acceptions et les caractéristiques, dans une discipline, la Géographie, offrant tous les atouts méthodologiques, techniques, et les savoirs pour cela.

PARTIE 1

DEMANDE SOCIALE ET DISPONIBILITE DES DIFFERENTES APPROCHES D'EVALUATION DES VULNERABILITES

1.1. Demande sociale et recherche sur les risques naturels : quelle adéquation ? Le cas des inondations en France.

1.1.1. Présentation

Dans le cadre de cette réflexion qui pose directement la question de l'utilité de la recherche sur les risques naturels en France, et indirectement celle du niveau d'acceptabilité collective de ces risques, la demande sociale a été entendue comme l'expression par une partie de la société française (populations exposées ou sinistrées, élus des territoires à risque, responsables techniques ou politiques engagés dans la gestion du risque) de questionnements et de revendications sur le thème des inondations et de leur gestion. Cette demande sociale a été abordée par l'analyse de sources écrites, publiées au cours de la décennie écoulée, de portée générale (réflexion nationale) ou traitant d'un cas (une catastrophe, un projet de prévention) suffisamment exemplaire et de grande ampleur pour être généralisable. Les sources sélectionnées ont fait l'objet d'une diffusion suffisamment large pour avoir nourri le « débat public ». Il s'agit de rapports de parlementaires rédigés à la suite des catastrophes majeures récentes, de comptes rendus de débats parlementaires, de rapports de missions de retour d'expérience, de rapports d'évaluation, etc.

1.1.2. L'analyse de la demande sociale

Les rapports des parlementaires

Les élus – députés et sénateurs – se sont emparés, au cours de la décennie passée, de la question des inondations. Ils l'ont fait principalement par deux voies : le vote de la « loi Barnier » (1995) et le travail en commissions d'enquête (3 en 8 ans). Ce travail en commission permet notamment de mettre en forme les interrogations et les réflexions qui foisonnent, de manière anarchique, au lendemain des catastrophes. La volonté des parlementaires est clairement de participer à la définition de la politique de prévention des inondations et d'orienter les choix en la matière. La réflexion des parlementaires aborde souvent la question de la recherche d'un cadre précis pour choisir le niveau de risque acceptable à l'échelle locale. Par exemple, le rapport de M. Dauge (1999) juge indispensable qu'une politique locale de gestion du risque repose sur la fixation d'un risque de référence à l'issue d'un débat public. Cette idée constitue l'un des apports essentiels de ce rapport au débat public. Déjà émise par le rapport de MM. Mathot & Mariani (1994), elle sera reprise dans les deux rapports ultérieurs des parlementaires (2001-2002), mais sans que ceux-ci n'aillent aussi loin dans la description du dispositif susceptible d'encadrer le débat public et les décisions relatives au risque acceptable. Les thèmes communs et récurrents de ces rapports portent notamment sur la part des causes anthropiques dans ce qui est de plus en plus perçu comme une aggravation des phénomènes naturels (ampleur, fréquence), sur le système d'indemnisation (globalement satisfaisant mais devant évoluer pour être plus incitatif en matière de prévention) et sur le souci d'une répartition des compétences plus claires entre l'Etat et les collectivités.

Les rapports de missions de retour d'expérience

Ce qui est marquant dans la période récente, c'est la systématisation de véritables démarches de retour d'expérience pour les catastrophes – certes majeures – de ces dernières

années (pas seulement inondations d'ailleurs), les moyens importants affectés à ces missions, ce qui se traduit par des rapports extrêmement complets et fouillés, et enfin par la diffusion large et immédiate de ces rapports (via Internet). On peut même constater une certaine propension à la pédagogie de ces rapports, le niveau de rédaction se voulant visiblement accessible à un public très large.

La politique gouvernementale

Quelques initiatives gouvernementales qui ont fortement relancé, au milieu des années 90, la prévention des inondations, ont été retenues dans l'analyse. Ces initiatives traduisent le constat d'une certaine inefficacité des politiques précédentes, sous la pression notamment des événements catastrophiques des années antérieures. L'une d'elles traduit également le souci d'impliquer localement l'Etat dans une politique concertée et reposant sur des bases techniques et scientifiques sérieuses : le plan Loire grandeur nature. Dans le cadre de ce plan, de fortes demandes sociales font l'objet d'études approfondies afin d'apporter des réponses opérationnelles : aider à la décision sur la base d'une meilleure connaissance du risque (dont les enjeux exposés et leurs vulnérabilités), disposer d'une meilleure information en temps de crise, mieux comprendre les comportements des habitants…

1.1.3. Thèmes et interrogations scientifiques soulevés par la demande sociale

Cette analyse a identifié une dizaine de grandes catégories d'interrogations, d'attentes et de revendications de la société française, récurrentes au cours des 10 années écoulées. Nous avons choisi de les exposer dans un ordre présentant une certaine cohérence temporelle : la demande sociale s'exprime de manière particulièrement exacerbée au lendemain des catastrophes, et les thèmes abordés sont globalement identiques et évoqués dans un ordre très proche d'une situation à l'autre.

La première grande interrogation porte sur **les causes des inondations**. Ceux qui la posent partent d'une idée acquise, d'un constat qu'ils disent faire : les inondations sont plus fréquentes et plus importantes que par le passé, elles ont changé de nature. Les questions qui en découlent portent, d'une part, sur la qualification de l'événement (est-il bien « naturel », quelle est sa fréquence ?) et, d'autre part, la recherche de responsabilité : à qui peut-on attribuer l'ampleur des dommages, l'aggravation des phénomènes d'inondation (dans leur fréquence, leur durée, leur modalité d'apparition) ? On peut identifier quatre causes générales qui sont les plus souvent invoquées, dans l'immédiat après catastrophes. Il s'agit des pratiques agricoles, de l'urbanisation (ruissellement urbain), de la gestion des rivières, des aménagements sur les cours d'eau. Depuis plusieurs années, une cinquième cause est de plus en plus évoquée, sous forme interrogative : les changements climatiques.

Les interrogations sur les causes des inondations renvoient à une interrogation sur **les responsabilités**, notamment dans le partage entre causes naturelles et causes humaines. Cette recherche de responsabilité ne se traduit pas systématiquement, loin de là, par une dimension contentieuse. Certaines catastrophes – celles avec des accidents mortels – donnent toutefois lieu à des poursuites judiciaires. Les préoccupations sur les responsabilités juridiques émanent essentiellement des élus mais aussi des fonctionnaires des services déconcentrés de l'Etat et des Préfets. Elles portent autant sur les responsabilités au moment de la crise que sur celles relative à la prévention.

Les interrogations sur la **gestion des secours** constituent le troisième thème : à chaque catastrophe, c'est toute la chaîne d'alerte qui fait l'objet de critiques et d'interrogations : l'alerte météorologique, l'annonce des crues, l'alerte des autorités, l'alerte des maires et l'alerte des populations.

La question de **l'impact économique des inondations** se pose principalement à deux « moments » : au lendemain de la catastrophe d'une part, en préalable à des choix d'actions de prévention ou de protection d'autre part. Ces deux « temps » du questionnement sur les impacts économiques n'ont pas les mêmes objectifs ni les mêmes contraintes méthodologiques pour y répondre.

Les demandes pour « **lutter contre les inondations** » sont évidemment récurrentes et insistantes. Néanmoins, on constate qu'avec le temps ces demandes évoluent vers, ou englobent, la nécessité d'entretenir les milieux, d'éviter l'artificialisation des rivières, de mieux gérer les petits ouvrages hydrauliques existants. Ces attentes ne sont pas seulement celles de services de l'Etat dont les doctrines ont évolué mais aussi celles de riverains ou d'élus, de plus en plus conscients de la nécessité de changer les modes d'aménagement des cours d'eau.

Les thèmes de **la mémoire et de la culture du risque** sont devenus récurrents au cours des années récentes dans toutes les analyses a posteriori des catastrophes provoquées par les inondations et dans tous les discours ayant trait à la prévention de ce risque. Les causes des catastrophes et les difficultés à mettre en œuvre des politiques de prévention sont attribuées de plus en plus, en partie, à la perte ou l'absence de mémoire et de culture de prévention.

Depuis longtemps déjà, **le fonctionnement du régime d'indemnisation** des catastrophes naturelles est un sujet récurrent lorsque l'on parle de la gestion des risques naturels en France. Aujourd'hui, même si la demande est toujours forte pour que le monde de l'assurance mette plus facilement à disposition ses informations, le débat porte surtout sur l'opportunité de faire évoluer le système afin de le rendre encore plus équitable et surtout de le rendre plus incitatif à la prévention.

La dernière grande attente est celle d'**une plus grande concertation et de la recherche d'un risque acceptable**, socialement et économiquement. La notion de risque acceptable – surtout sollicitée par les élus – est évoquée principalement dans deux situations : lors de l'élaboration des PPR, d'une part, lors des études préalables aux choix des ouvrages de protection, d'autre part.

Pour chacune des interrogations précédentes de la société française sur le thème du risque inondation, nous avons identifié les questionnements scientifiques auxquels ces interrogations – de manière implicite ou explicite – renvoient. L'analyse n'a pas porté de regard critique sur le bien fondé scientifique de cette demande sociale – la recherche ne fournit-elle pas déjà des réponses à certaines des questions soulevées ? – mais a cherché à exprimer le plus objectivement et le plus exhaustivement possible les questionnements et les attentes de la société française vis-à-vis du risque inondation et de sa gestion.

Néanmoins, force est de constater que ces interrogations ne renvoient pas seulement à des questions scientifiques, mais aussi à des problématiques techniques, organisationnelles ou politiques. Les questionnements sont d'ordre scientifiques lorsque les connaissances sont insuffisantes pour répondre à des questions précises (dans quelle proportion le remembrement est-il responsable de l'aggravation des crues ?). Mais ils sont parfois d'ordre technique lorsque les connaissances sont insuffisantes par manque d'études et non par manque de méthode

(exemple : la cartographie des zones inondables), ou parfois d'ordre organisationnelle (exemple : rationalisation des réseaux de mesures pour la prévision et l'annonce de crue, création d'un service hydrométéorologique).

Enfin, les questions sont d'ordre politique lorsqu'il s'agit, pour répondre à la demande sociale, de décisions politiques (par exemple : faire de l'annonce des crues une compétence juridique obligatoire de l'Etat).

L'état des lieux de la recherche française sur le thème du risque inondation a été conduit selon trois axes :

– Un inventaire des grands programmes cadres de recherche intégrant le risque inondation.
– Un inventaire des principales équipes de recherches engagées sur le risque inondation.
– Un recensement et une analyse de la production scientifique des dix dernières années relative au risque inondation (projets de recherche collectifs, thèses, contrats de recherche).

1.1.4. Inventaire des grands programmes de recherche

L'inventaire des programmes qui structurent la recherche en matière de risque inondation, et plus généralement de risques naturels, met en évidence deux tendances lourdes : l'hégémonie de la recherche fondamentale au détriment d'une recherche plus finalisée, d'une part, la prédominance des sciences dures (sciences de l'univers, sciences de l'ingénieur) mobilisées pour travailler sur les aléas, d'autre part. Dans le domaine de la prévision hydrologique et de la modélisation hydrodynamique des crues notamment, le Programme National de Recherches en Hydrologie (PNRH) du CNRS a joué un rôle majeur. On observe au sein des programmes un intérêt croissant pour la question des aléas extrêmes et une mobilisation forte sur l'utilisation de l'imagerie spatiale. Néanmoins, on constate également deux autres tendances, qui ont probablement vocation à se renforcer dans l'avenir : l'incitation au caractère multidisciplinaire (ou pluridisciplinaire selon la terminologie des programmes) et la mobilisation des sciences humaines et sociales. La multidisciplinarité est recherchée soit dans les programmes mobilisant les sciences dures (certaines « Actions Concertées Incitatives » du ministère de la recherche notamment), soit dans ceux, plus rares, recherchant des ponts avec les disciplines humaines et sociales.

L'émergence d'une mobilisation des sciences humaines et sociales se traduit par exemple avec le projet « vulnérabilité socio-économique et définition des politiques publiques » de l'action concertée incitative (ACI) du Ministère de la Recherche « Prévention des catastrophes naturelles ». Le programme national « Risques Collectifs et Situations de Crise » du CNRS, plus ancien, traduit à la fois la mobilisation interdisciplinaire et celle des sciences humaines et sociales. De plus, ce programme a cherché à nouer des relations de partenariat avec « l'extérieur » (administrations, organismes publics, entreprises), fait plutôt rare. L'histoire est une des disciplines qui s'est tout particulièrement mobilisée. Le programme « Evaluation et Prévention des Risques » (EPR) du MEDD a cherché à renforcer cette dynamique, en retenant des projets portant sur le droit, les politiques publiques, l'économie ou encore la psycho-sociologie, projets voulus fortement finalisés.

La dernière tendance est celle du renforcement de la place des programmes européens. Si un certain nombre d'entre eux cherchent à mobiliser les sciences humaines (économie et histoire notamment), la majorité reste sur des problématiques aléas.

1.1.5. Analyse de la production scientifique relative au risque inondation

La recherche scientifique a été recensée et analysée sur la base de 3 types de productions : des projets de recherche collectifs, des projets individuels (post-DEA ou diplômes d'ingénieur) et des contrats de recherche. A l'issue de l'enquête, 95 références exploitables ont été retenues pour servir de support à notre analyse (*cf*. **annexe 1**).

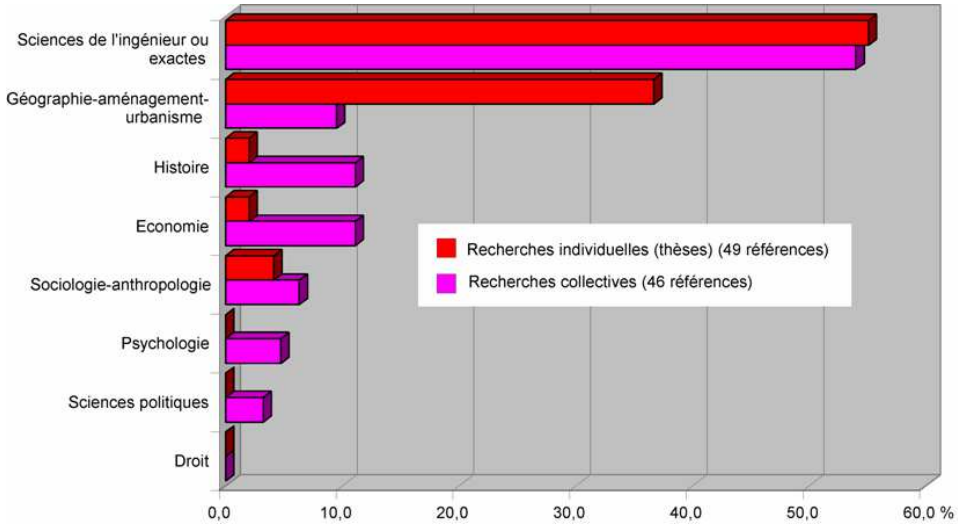


Figure 1.1. Répartition des références exploitées en fonction des disciplines impliquées par type de recherche (individuelle ou collective) (Ledoux & Leone, 2002).

La recherche collective représente 48 % de ces références, la recherche individuelle (principalement des thèses) représentant 52 %. Le classement de ces références par disciplines (8 grands types au total, des sciences de l'ingénieur à la psychologie) fait apparaître que la recherche française sur les inondations est avant tout une préoccupation de scientifiques issus des sciences de l'ingénieur ou plus rarement des sciences mathématiques et physiques (**figure 1.1.**). Les autres disciplines mobilisées de manière importante sont la géographie, l'aménagement et l'urbanisme (regroupé en un type). Les autres disciplines sont très peu représentées : histoire, économie, sociologie, psychologie, sciences politiques ou carrément absente (droit). Lorsque l'on répartit les travaux en fonction des disciplines impliquées et par nature de la recherche (individuelle ou collective), on constate que la recherche collective mobilise davantage des disciplines comme l'histoire, l'économie, la sociologie, la psychologie et les sciences politiques que la recherche individuelle. La répartition entre recherche collective et individuelle est équivalente pour les sciences de l'ingénieur et sciences exactes, alors que la seconde domine très nettement en géographie.

Lorsque l'on s'intéresse à l'objet de la recherche, on constate que 60% des références traitent de thèmes relatifs à la connaissance des aléas alors que 40% se focalisent de manière plus générale sur le risque, c'est-à-dire en s'intéressant à d'autres de ses aspects : socio-économiques, psychosociologiques, préventifs, organisationnels, réglementaires, historiques et aux différentes formes de vulnérabilité des territoires, des organisations et des communautés humaines qui y sont exposées. Pour affiner la description de cette recherche, les travaux ont été analysés sur la base d'une typologie des thèmes de recherche, d'abord selon une classification en 23 thèmes (**figure 1.2.**), puis selon une classification simplifiée en 11 thèmes.

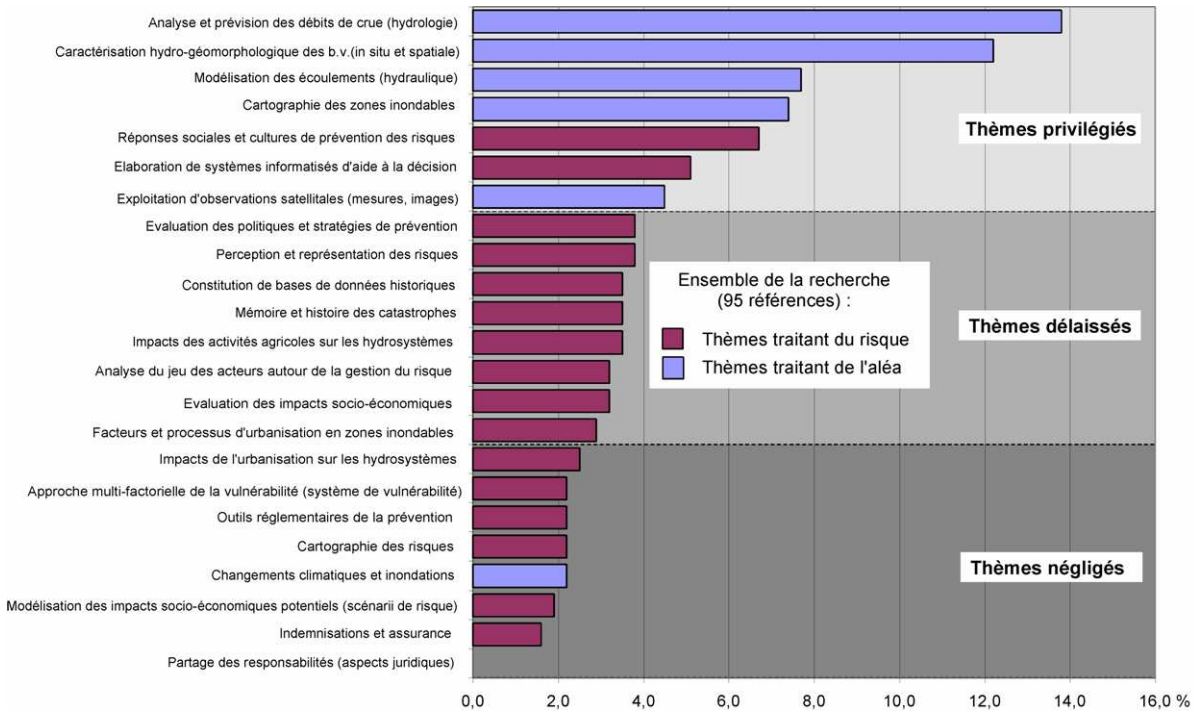


Figure 1.2. Répartition des références en fonction des thèmes qui y sont traités (Leone & Ledoux, 2003).

L'analyse sur la base des 23 thèmes montre que 82 % des travaux n'abordent qu'1 à 4 thèmes – le plus souvent associés autour de l'analyse de l'aléa – alors que les 18 % restants en abordent 5 à 11. Ce constat peut s'interpréter, avec prudence, comme une prédominance d'une recherche sur les inondations très sectorielle, manquant d'approches globales. En classant ces thèmes suivant leur pourcentage d'occurrence (de citation) sur l'ensemble des travaux étudiés, on distingue :

– Deux thèmes privilégiés, relevant de l'étude de l'aléa (« Analyse et prévision des débits de crues » et «Caractérisation hydro-géomorphologique des bassins versants»).

– Cinq thèmes moins fréquemment traités, dont deux relèvent de l'étude du risque (« Réponses sociales et cultures de prévention des risques » et « Elaboration de systèmes informatisés d'aide à la décision »).

– Les autres thèmes, peu à très peu traités ; ces thèmes correspondent soit à des sujets plutôt délaissés par le milieu de la recherche sur les inondations, soit à des sujets émergents au moment de cette enquête (notamment le thème « changements climatiques et inondations »). Excepté ce dernier, ils relèvent tous de disciplines non issues des sciences exactes et ils se rapprochent directement des problématiques du risque et non de l'aléa en intégrant une dimension socio-économique.

– Un thème ne compte aucune référence : « partage des responsabilités ».

L'analyse sur la base d'une typologie simplifiée en 11 thèmes conforte la vision d'une recherche très sectorielle et la faiblesse des approches globales : 74 % des références n'abordent qu'1 à 2 thèmes et 26% 1 à 4 thèmes. Sur la base de cette typologie simplifiée, quatre groupes peuvent être distingués. Le premier représente 46% et ne concerne que l'aléa

(« caractérisation des bassins versants », « prévision et modélisation des phénomènes »). Le deuxième (« politique de prévention et aide à la décision », « perception et culture locale de prévention ») et le troisième groupe (« Evaluation des risques », « Mémoire et histoire des catastrophes », « Analyse des impacts anthropiques », « Evaluation des vulnérabilités ») concernent le risque et représentent chacun un quart des thèmes traités. Le quatrième groupe rassemble deux thèmes très peu traités et qui n'ont pas fait l'objet d'une agrégation avec d'autres thèmes entre les deux typologies (23/11 thèmes), en raison de leur particularisme : « changements climatiques et inondations » et « indemnisations et assurances ».

La recherche française présente avant tout un caractère finalisé et opérationnel au service de la réduction des risques. Elle reste néanmoins très sectorielle, peu pluridisciplinaire au niveau de ses projets et est pilotée principalement par les sciences exactes. Cette recherche privilégie donc majoritairement les travaux sur les aléas, c'est à dire sur les phénomènes en cause (crues et inondations). Les programmes cadres ne favorisent guère les sciences humaines, politiques, juridiques ou économiques prompts à travailler sur les autres aspects du risque (enjeux, vulnérabilités, systèmes de gestion et de prévention, comportements humains, etc.).

1.1.6. Conclusion

Le rapprochement entre l'analyse de la « demande sociale » et l'état de la recherche française dans le domaine des inondations est un exercice délicat, compte tenu du niveau d'investigation de cette étude – qui se veut un premier défrichage plutôt qu'une analyse exhaustive et définitive – et est donc largement perfectible. De plus, nous n'avons pas, dans le cadre de cette analyse, porté de regard critique sur les questionnements de la société : la recherche scientifique a déjà en partie répondu à certains points de la demande sociale telle que nous avons pu l'identifier, notamment sur la compréhension des causes des phénomènes. Le problème soulevé est donc plutôt celui de l'information du public et de la crédibilité des discours scientifiques.

Le **tableau 1.1.** propose une corrélation entre les principaux thèmes de la « demande sociale » et ceux de la recherche. L'importance des travaux scientifiques se réfère à la typologie des thèmes de recherche élaborée pour analyser les 95 références retenues.

Il est clair que des questionnements sont largement pris en compte par la recherche et que d'autres sont peu traités. C'est en particulier le cas de l'évaluation des différentes formes de vulnérabilités, thème qui nous préoccupe et pour lequel nous allons élargir la recherche à d'autres natures de risques. Il serait néanmoins nécessaire d'affiner l'analyse, notamment sur le contenu précis des programmes de recherche et des travaux pour mieux apprécier les convergences et les lacunes. L'analyse semble néanmoins mettre en évidence une grande dispersion de la recherche. Celle-ci pourrait bien être liée à une absence de programmes réellement structurants et correctement cadrés vis-à-vis des besoins des praticiens. Il faut alors s'interroger sur la cause d'un tel constat : est-ce lié à l'absence d'analyse critique de la « demande sociale » par le monde scientifique et/ou à l'absence d'un cadrage politique clair sur les objectifs que la société française se fixe en matière de réduction du risque inondation sur le territoire national ? Quoi qu'il en soit, il semblerait nécessaire de se doter des moyens d'un tel recadrage de la recherche. Cette analyse souhaite avoir initié le débat.

Interrogations de la société	*Champs de la recherche concernés*	*Importance des travaux scientifiques*	*L'apport du programme RIO 1*
Les interrogations sur les causes des inondations	Changements climatiques et inondations	▪	Pas du ressort de RIO
	Analyse des impacts anthropiques	■	Quelques travaux aux conclusions mitigées
	Caractérisation des BV	■	Quelques travaux
Comment agir sur les causes	Analyse des impacts anthropiques	■	Cf. plus haut
Les responsabilités juridiques	Partage des responsabilités (aspects juridiques)		Un apport significatif
Des interrogations sur la gestion des secours : l'alerte	Prévision et modélisation des phénomènes	■	Apports significatifs
	Perception et culture locale de prévention	■	Pas traité comme tel par RIO. Une étude aborde néanmoins cet aspect
Des interrogations sur l'impact des inondations	Evaluation des risques (approches monétaires)	■	Une seule référence
	Evaluation des vulnérabilités	■	1 référence significative mais dans l'ensemble peu d'avancée
Comment « lutter contre les inondations » : mesures structurelles			Pas du ressort de RIO
Comment « lutter contre les inondations » : action sur les champs d'expansion, RD	Prévision et modélisation des phénomènes	■	Apports significatifs
	Caractérisation des BV et imagerie	■	1 référence importante
Comment développer la culture et la mémoire des inondations ?	Mémoire et histoire des catastrophes	■	Pas de travaux
	Perception et culture locale de prévention	■	Pas de travaux
Tirer les enseignements des événements historiques	Mémoire et histoire des catastrophes	■	Pas de travaux
Un ajustement du régime d'assurance	Indemnisation et assurance	▪	Pas de travaux
Une plus grande concertation et la recherche d'un risque acceptable	Politique de prévention et aide à la décision	■	Des travaux, mais plutôt à démarche *ex post*

Importance des travaux scientifiques	*Pourcentage d'occurrence du thème considéré sur l'ensemble des références étudiées*
■	20-25%
■	10-15%
■	5-7%
▪	2%

Tableau 1.1. Correspondances entre la demande sociale et la production scientifique en matière de risque inondation. Synthèse. (Ledoux & Leone, 2002).

1.2. Un aperçu de la diversité des approches scientifiques sur les vulnérabilités

1.2.1. Analyse de la production scientifique

Face au constat précédent d'une relative pauvreté de la production scientifique française sur la question de l'évaluation des vulnérabilités, cette partie tente de dresser un premier bilan, non exhaustif, des travaux et des recherches internationales portant sur les vulnérabilités aux catastrophes naturelles en élargissant notre analyse à d'autres aléas. Cette synthèse repose sur une analyse bibliographique détaillée dont le contenu et les références sont présentés dans une étude effectuée pour le compte du Ministère de l'Equipement, du Transport et du Logement (Leone, 2003).

Les travaux sur les vulnérabilités ont été analysés selon différents critères (type d'approche, nature des éléments vulnérables, nature des aléas, types de traitements cartographiques, nature des critères de vulnérabilité retenus, disciplines mobilisées, région géographique étudiée, échelle d'analyse, mise au point de protocoles méthodologiques transposables, outils utilisés, etc.). L'objectif principal de cette analyse a été d'estimer le niveau de disponibilité opérationnelle des méthodes d'évaluation des vulnérabilités aux menaces naturelles. Dans les lignes qui suivent nous retranscrivons quelques conclusions de cette analyse qui a porté sur près de 250 références bibliographiques ne traitant que de vulnérabilité à des phénomènes naturels.

La vulnérabilité structurelle et corporelle

Les travaux la concernant sont les plus abondants, tant à travers les retours d'expérience (*cf.* **annexe 2**), que les diagnostics de vulnérabilité qui font partie intégrante des très nombreuses simulations de dommages fournies par la littérature en différents points du globe. C'est majoritairement le bâti qui est concerné et en particulier au regard des séismes. Il sert généralement de base à l'élaboration des scénarios d'endommagement. Les réseaux physiques font quant à eux l'objet de nombreux constats d'endommagement après sollicitation sismique. Pour les aspects techniques, les recherches sont souvent menées par les architectes, notamment ceux de l'*Institute for Research in Construction* au Canada et du CSTB en France (Salagnac & Bessis, 2006) ou l'Université de Cambridge en Grande-Bretagne (Kelman & Spence, 2002). L'objectif de ces études est de déterminer les fragilités techniques des bâtiments ou d'autres infrastructures face au risque inondation afin d'en diminuer la vulnérabilité ou celle de leur occupants en cas de sinistre. Le programme européen EUROFLOOD II (1994-1997) avait pour but de déterminer des fonctions de dommage dues aux inondations pluviales urbaines. Dans les Etats participants (Royaume-Uni, France…) des méthodes ont émergé de ce programme comme la méthode « Inondabilité » en France qui n'est que partiellement centrée sur la vulnérabilité comme nous l'avons vu plus haut.

La vulnérabilité corporelle est prise en compte surtout dans le cadre des scénarios sismiques dont le but est aussi d'estimer les pertes humaines potentielles en fonction du niveau d'endommagement du bâti (vulnérabilité structurelle).

La vulnérabilité humaine

Elle est essentiellement traitée sous la forme de retours d'expérience sur les réponses, les adaptations, les comportements face aux évènements dommageables et leurs conséquences socio-économiques (*cf.* **annexe 3**). Les recherches la concernant s'inscrivent aussi dans une démarche d'évaluation des risques lorsque les auteurs cherchent à diagnostiquer la vulnérabilité humaine en étudiant la qualité de la perception des menaces ou de la mémoire, la connaissance des moyens de protection, les types de comportements potentiels, etc. Ces études conduisent assez souvent, pour ce qui est des équipes françaises, à des cartographies utiles pour définir des stratégies de prévention prenant en compte la dimension psycho-sociale des risques. De tels travaux, basés sur des campagnes d'enquêtes, ont notamment été menés par des géographes français en Equateur, aux Philippines, en Colombie et aux Antilles. Ils suivent tous des protocoles méthodologiques similaires impulsés par le géographe Robert D'Ercole lors de sa thèse sur le volcan Cotopaxi (D'Ercole, 1991). Dans ce domaine de la cartographie des « facteurs de vulnérabilités humaines », on peut réellement parler « d'école française ».

La vulnérabilité institutionnelle

Les travaux apparaissent essentiellement dans le cadre des retours d'expérience avec pour thème principal l'analyse de la capacité de réponse des institutions face à la crise. Notons qu'ils sont très liés à ceux traitant de vulnérabilité humaine ou sociale, la vulnérabilité institutionnelle étant un facteur indirect de cette dernière. Des travaux de cette nature ont été menés par des équipes françaises en France (Gilbert, 1992) notamment par le retour d'expérience (Gilbert, 1999 ; Gilbert & Bourdeaux, 1999), mais aussi au Japon, aux Philippines, en Colombie, au Salvador, aux Antilles, en Equateur.

La vulnérabilité environnementale et patrimoniale

Ils concernent majoritairement l'analyse des dommages sur la végétation, les cultures, les sols et la faune provoqués par les éruptions volcaniques, les tempêtes ou les inondations. Ces approches restent pour l'essentiel qualitatives, avec une simple description de dommages. Notons également une référence sur les effets des tornades sur les forêts du Minnesota (USA). Des travaux similaires existent suite aux tempêtes qui se sont abattues sur l'Europe de l'Ouest en décembre 1999. Cependant, il apparaît clairement qu'au regard des impacts environnementaux et agricoles, ce sont les éruptions volcaniques qui offrent la plus grande diversité de modes d'endommagement. Par contre, rares sont les références portant sur l'endommagement potentiel des ressources naturelles (eau, minerais, etc.). En Italie, les études portant sur la vulnérabilité patrimoniale partent des retours d'expérience effectués suite aux grandes inondations de l'Arno à Florence en 1966 (Avramidou, 2003).

La vulnérabilité fonctionnelle et économique

L'analyse des dysfonctionnements divers, notamment des activités économiques, souvent consécutifs aux ruptures des réseaux de communication, a surtout fait l'objet de recherches post-sismiques, par exemple à Los Angeles (1994) et à Kobe (1995). Des travaux concernent des secteurs d'activité particuliers. C'est le cas par exemple du secteur touristique après le séisme d'Italie de 1998, dont la baisse d'activité a été évaluée à travers une modélisation à posteriori de la baisse de fréquentation (Mazzochi & Montini, 2001).

La modélisation de ces dysfonctionnements dans le cadre d'évènements futurs est quant à elle beaucoup moins développée et suit généralement l'approche classique des modèles « *input-output* » des économistes servant à évaluer les pertes potentielles indirectes en se basant sur l'analyse des liaisons économiques entre les différents secteurs d'activité. Là encore, c'est essentiellement dans le domaine du sismique que l'on a pu identifier des travaux, menés au Japon, aux Etats-Unis, en Russie et en France dans les régions de Lambesc et de Nice.

L'approche des vulnérabilités (ou plutôt des enjeux) par le coût potentiel des catastrophes est pratiquée depuis longtemps. Dès la fin des années 1950 des auteurs se posent la question des mesures de protection à envisager pour diminuer les enjeux exposés. En France, les études d'estimation des coûts des inondations existent au moins depuis les années 1960. Dans les années 1970, des bureaux d'étude avaient entrepris la mesure des impacts économiques des inondations dans différentes régions françaises. Après l'échec de leur prise en compte (Ledoux consultant, 1995 ; Hubert et al, 2001), une nouvelle génération d'études a vu le jour et tend à être généralisée. Il s'agit notamment de celles menées par l'équipe pluridisciplinaire Plan Loire (De Blois & Wind, 1996 ; Barbut et al., 2004). Les grands bassins versants européens (Loire, Rhin) ont également fait l'objet d'études d'enjeux et de vulnérabilités.

Les approches de simulation de dommages sont assez nombreuses pour les entreprises. Le MEDD a financé des programmes de recherche visant à définir des méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité des PME/PMI. Le plan Loire grandeur nature reprenant les travaux de Ledoux Consultant & Sageris (2001), a mené de nombreuses évaluations de la vulnérabilité des entreprises face au risque d'inondation qui sont reprises par d'autres structures de bassin versant dans une optique de réduction de cette vulnérabilité.

Les difficultés d'une approche globale et systémique de la vulnérabilité

L'étude de la vulnérabilité face aux risques naturels a d'énormes difficultés à sortir des diagnostics sectoriels. Ces approches sectorielles se font généralement dans le cadre de recherches appliquées destinées à dégager des mesures de prévention possibles de la vulnérabilité désignées sous le terme de « mitigation » par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. Rares sont les études approchant la vulnérabilité sous l'angle de la systémique, c'est-à-dire en travaillant simultanément sur les dommages structuraux, socio-économiques et fonctionnels et donc sur toutes les réactions en chaîne induites par l'impact initial d'un phénomène naturel ; ce qui nécessite de considérer simultanément de multiples enjeux.

Parmi les objets d'étude pouvant justifier une telle approche, le système territorial, notamment urbain, semble le plus approprié. A ce titre et au regard de l'évaluation des risques (diagnostics suivis de scénarios), quelques travaux s'inscrivent dans cette démarche : ceux menés par le BRGM sur Nice (Lutoff, 2000) dans le cadre du programme Gémitis (risque sismique) et ceux menés par l'IRD sur le District Métropolitain de Quito (Equateur) dans le cadre de l'élaboration d'un « système d'information et risques » (volcaniques notamment) (D'Ercole & Metzger, 2004). La vulnérabilité des systèmes urbains face aux risques naturels, technologiques ou sociaux a fait l'objet d'autres études (Chardon, 1996 ; Mitchell, 1999a ; Hardy, 2003 ; Bonnet, 2005 ; Reghezza, 2006).

Cependant, d'autres travaux, s'inscrivant quant à eux dans le cadre de retours d'expérience, ont tenté d'évaluer la vulnérabilité de systèmes urbains et territoriaux en s'intéressant d'une part à la notion de chaîne de dommages, notamment induite par les ruptures de réseaux après séisme (Kobe, Japon, 1995) ou éruption volcanique (Quito, 1999), d'autres part aux recompositions territoriales consécutives à une catastrophe comme celle du Pinatubo (Gaillard, 2001).

Les territoires étudiés et leur contexte socio-économique

Dans le cadre des diagnostics de vulnérabilité humaine ou sociale, l'essentiel des travaux concerne des communautés appartenant à des pays en développement. Les raisons de ces choix sont directement déterminées par les objectifs poursuivis par ces études, à savoir la réduction des risques par la réduction des vulnérabilités, notamment sociales et institutionnelles, particulièrement exacerbées dans ces pays.
Pour les mêmes raisons, les scénarios sismiques semblent se développer de plus en plus dans ces régions pauvres, notamment dans le cadre du programme Radius de l'ISDR (Ethiopie, Chili, Equateur, Indonésie, Turquie, Ouzbékistan, Chine, Mexique). On semble donc assister à un véritable transfert d'expériences dans ce domaine après plusieurs décennies de scénarios sismiques menés dans les pays industrialisés depuis le début des années 1970.

Les échelles spatiales de l'analyse

Les études consultées se font généralement à l'échelle locale (urbaine, bassin de risque) et plus rarement à l'échelle régionale (volcan, région). Notons cependant que quelques réflexions et tentatives d'évaluation à des échelles nationales (Turquie, Chine), internationales (Amérique centrale), voire mondiales, ont été engagées en particulier dans le domaine de scénarios sismiques. Elles sont basées sur le calcul des pertes économiques potentielles exprimées en réduction de PIB ou de PNB des pays ou régions concernées. A la même échelle, mais sous l'angle du diagnostic, certains auteurs ont tenté de hiérarchiser la vulnérabilité globale de différents pays du bassin caraïbe et d'Asie à l'aide de macro-indicateurs de leur état de pauvreté (IDH), des retards en équipements (taux de croissance urbaine) et des ressources disponibles pour faire face à une crise (PIB). Il s'agit d'une approche assez classique qui peut cependant aider à définir les grandes orientations et priorités internationales en matière de prévention des risques.

La difficulté réside dans le choix de l'échelle d'analyse. La solution de facilité est souvent de ne considérer la vulnérabilité que sur les espaces directement touchés par l'aléa. Or, on sait que les catastrophes naturelles n'ont pas seulement des répercussions dans la zone d'aléa mais aussi par ricochet dans les zones voisines, sans parler de téléconnexions à l'heure de la globalisation des risques. Il existe donc des territoires de vulnérabilité qui ne se confondent pas forcément avec l'espace du phénomène naturel. L'exemple du tsunami du 26 décembre 2004 en Asie a montré que la Suède est très vulnérable face à ce type d'aléa par l'intermédiaire du tourisme exotique. Ce pays fut l'un de ceux qui ont enregistré le plus de victimes proportionnellement à la population totale. Il en est de même pour les répercussions des catastrophes naturelles sur les marchés financiers comme l'a montré le cas du cyclone Katrina dans un marché pétrolier très tendu.

Les outils d'évaluation utilisés

Dans le cadre des approches prospectives d'évaluation des risques, les procédures de modélisation des dommages et des pertes sont désormais systématiquement assistées par ordinateur et font partie intégrante de SIG à vocation plus ou moins préventive. Cependant, certaines équipes ont développé des outils de simulation évoluant dans un environnement SIG. On peut citer notamment les logiciels de simulation des pertes potentielles développés par la FEMA américaine pour les inondations, les vents forts (cyclones et tempêtes) et les séismes (méthode HAZUS-MHTM), par la société française GIPEA Consultants pour les mouvements de terrain (EVARISK), par la société américaine EQECAT qui développe des produits pour les grands assureurs et les institutions (WORLDCAT^{TM}, JAPANCAT^{TM}, CANADAQUAKE^{TM}), par certaine équipes de sismologues colombiens (PERCAL, GRAPPER) et italiens (EXPRIM), par le BRGM (ARMAGEDOM).

Dans le cadre des analyses en retour, l'imagerie spatiale semble offrir des potentialités de plus en plus fortes en matière d'estimation des dommages structuraux et environnementaux, notamment après des séismes, des inondations et des tsunamis, avec des résolutions optiques inférieures au mètre.

Sur les aspects plus sociaux, des équipes ont développé des questionnaires post-sismiques visant à mieux cerner les comportements des populations. Ce type de questionnaire fait également parti des outils communs des chercheurs travaillant sur les diagnostics de vulnérabilité humaine et au moyen desquels ils cherchent à évaluer les facteurs d'ordre perceptif, comportemental et cognitif conditionnant certaines formes de vulnérabilité humaine. De tels questionnaires ont servi de support à des travaux français menés aux Philippines (Gaillard et al., 2001), aux Antilles (Sarant et al , 2003), en Equateur (D'Ercole, 1991) et en Colombie (Chardon, 1996).

Enfin, la cartographie, pour des raisons évidentes de communication et de sensibilisation s'impose de plus en plus pour retranscrire les résultats de scénarios d'endommagement par exemple. Pour ce qui est des approches sociales, il apparaît clairement que seuls les géographes font preuve d'une certaine habilité à retranscrire sur des cartes des informations sur la vulnérabilité humaine, contrairement aux sociologues et psychologues très peu sensibilisés à la spatialisation de leurs résultats et à l'analyse des différenciations spatiales.

Les disciplines et équipes mobilisées

Dans le domaine des scénarios d'endommagement il apparaît peu surprenant de retrouver sur les questions de vulnérabilité des équipes scientifiques formées aux aléas ou aux métiers de la construction : architectes et sismologues, volcanologues, géomorphologues. Or ce champ de recherche semble de plus en plus investi par les géographes qui de par une formation relativement pluridisciplinaire sont à même de se positionner sur ces questions en assurant l'interface entre phénomènes dommageables et enjeux vulnérables, tout en maîtrisant les approches spatiales et les outils cartographiques. Ainsi les géographes semblent de plus en plus souvent sollicités par les sismologues, les vulcanologues et les géomorphologues (quand ils ne le sont pas eux-mêmes) au côtés de sociologues et quelques rares psychologues pour mener des diagnostics de vulnérabilité. En France, nombreux sont les jeunes géographes suivant cette tendance en assurant un décloisonnement bénéfique de leur propre discipline longtemps partagée entre sciences humaines et sciences naturelles.

Cependant, si des rapprochements entre disciplines semblent s'opérer, on ne peut pas encore parler de pluridisciplinarité dans ce domaine, du moins au regard des phénomènes concernés ici. Rares sont les recherches ayant mobilisé des équipes réellement pluridisciplinaires pour évaluer tous les aspects de la vulnérabilité, donc dans le cadre d'approches systémiques. En France deux recherches retiennent cependant notre attention sur ce plan : le projet « Gémitis Nice » du BRGM (Lutoff, 2000) qui a mobilisé des sismologues, des géologues, des architectes, des géographes et des sociologues, et le retour d'expérience sur le cyclone « Lenny » aux Antilles (projet EPR) qui a fait appel à une équipe de climatologues, de géographes, de socio-psychologues et de spécialistes du secours d'urgence (Sarant et al., 2003).

Précisons que les historiens semblent depuis peu s'intéresser aux vulnérabilités sociales et même à la caractérisation de l'endommagement, ce qui aura pour effet d'améliorer les bases de données historiques dont l'élaboration a longtemps été confiée à des non spécialistes des sciences historiques avec toute les erreurs d'interprétation que cela a pu entraîner. Pour la France, nous pouvons citer les thèses récentes de Quenet (2005), qui porte notamment sur le séisme de Manosque de 1708, de Cœur (2003) concernant les inondations historiques de la plaine de Grenoble, et d'Ursulet (1990) qui traite du cas de la catastrophe de 1902 à la Martinique (Montagne Pelée).

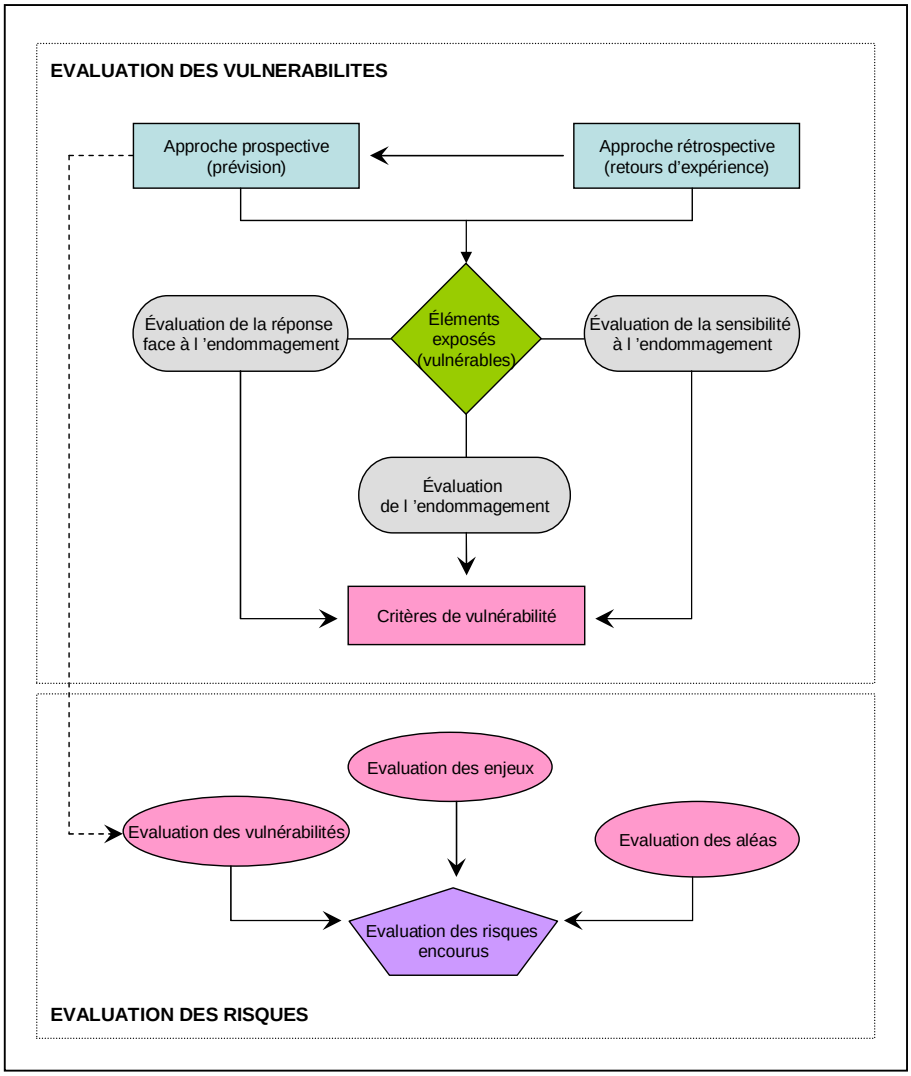
Par ailleurs quelques spécialistes de la santé, étrangers (américains, anglais et japonais), se sont spécialisés dans les dommages corporels après séismes (Peek-Asa, 2000 ; Mahue-Giangreco, 2001 ; Roces, 1992), après éruptions volcaniques (Baxter & Gresham, 1997 ; Ng Walali et al., 1999) ou inondations (Jonkman & al. 2002). Les effets psychologiques et sanitaires des inondations ont été largement étudiés par le Flood Hazard Research Center (FHRC). Le FHRC a mis en place une veille des conséquences psychologiques et sanitaires des inondations depuis les années 1980. Le programme de recherche conjoint DEFRA/FHRC a établi une grille d'évaluation du risque inondation où les critères de vulnérabilité et d'exposition sont clairement définis et tiennent une bonne place à côté de l'aléa. Les études sur les conséquences des inondations sur la santé sont innombrables. Les recherches du FHRC font autorité en la matière (Green, 1988 ; Bromet & Dew, 1995). Ces spécialisations ne semblent pas exister en France dans le milieu universitaire hormis pour la canicule (Besancenot, 2002).

1.2.2. Synthèse des approches d'évaluation des vulnérabilités

A la lumière de ce premier dépouillement bibliographique, on peut proposer une lecture nouvelle de ce concept et de son évaluation en discernant deux grandes approches complémentaires : **rétrospective** et **prospective**. L'approche rétrospective s'inscrit dans le cadre de retours d'expérience tandis que l'approche prospective est inhérente aux procédures d'évaluation des risques encourus. La première approche nourrit ainsi directement la seconde lors de la conduite de diagnostics de vulnérabilité, eux-mêmes utiles à la mise en oeuvre de scénarios (ou simulations) d'endommagement, de pertes ou de gestion de crise (**figure 1.3.**).

Pour chacune de ces deux grandes approches, qui nous renseignent respectivement sur l'endommagement déclaré et potentiel, il apparaît que la vulnérabilité peut être évaluée, de manière quantitative ou qualitative :

– soit à travers la sensibilité à l'endommagement ;
– soit à travers la caractérisation de l'endommagement ;
– soit à travers la capacité de réponse à l'endommagement.



	Rétrospective (déclaré)	Prospective (potentiel)
Sensibilité à l'endommagement		***Diagnostics de vulnérabilité***
Réponse à l'endommagement	***Constats d'endommagement***	***Scénarii de gestion de crise***
Caractérisation de l'endommagement	***Retours d'expérience***	***Scénarii d'endommagement***

Figure 1.3. Schéma de synthèse des différentes approches d'évaluation des vulnérabilités aux catastrophes naturelles.

L'évaluation de la sensibilité à l'endommagement repose généralement sur l'analyse et la recherche de facteurs intrinsèques ou extrinsèques à l'élément vulnérable et qui peuvent agir soit directement, soit indirectement. Ces facteurs constituent des causes de vulnérabilité pouvant être quantifiées au moyen d'indicateurs (socio-économiques par exemple) ou bien appréciés qualitativement par le biais de diagnostics et d'enquêtes, puis éventuellement pondérés. Cette approche s'inscrit le plus souvent dans une démarche d'évaluation des risques, donc prospective (en cartographie des risques par exemple).

La caractérisation de l'endommagement se traduit par une appréciation des dommages. C'est l'objet même des constats d'endommagement qui peuvent prendre l'aspect de simples descriptions ou bien de quantifications poussées (bilans). Dans le cadre des approches prospectives (scénarios), la caractérisation de l'endommagement revêt un caractère le plus souvent quantitatif de mesure et de prévision des dommages ou des pertes potentielles. L'endommagement est un indicateur de vulnérabilité qui s'exprime :

– soit par un taux (coefficient) d'endommagement potentiel (0-1) renvoyant à une échelle d'intensité des dommages (échelles de vulnérabilité) et qui est calculé par rapport à la valeur économique de remplacement (vénale) de l'élément exposé (fonction d'endommagement ou de vulnérabilité). Chaque taux est en général accompagné d'une description des modalités d'endommagement. (Ex. : un taux d'endommagement de 0,1 correspond à un montant économique des dommages équivalent à 10% de la valeur marchande d'une habitation donnée. Cela peut correspondre à des dégâts structurels légers).

– soit par un taux de pertes potentielles et relatives (0-100%) s'appliquant à un stock d'éléments exposés de même nature susceptible d'être affectés par un même taux d'endommagement potentiel (fonction de pertes). (Ex. : un taux de pertes de 20% correspond à la proportion du bâti concerné par un taux d'endommagement donné).

L'évaluation de la capacité de réponse face à l'endommagement passe généralement par l'analyse de l'efficacité des actions et moyens mis en œuvre pour réduire les dommages. Elle s'inscrit donc plutôt dans le cadre de retours d'expérience et est particulièrement adaptée à l'analyse des systèmes et des organisations (institutions) en intégrant à la fois les facteurs aggravant et ceux au contraire limitant la vulnérabilité (analyses de type forces/ faiblesses d'un système). On peut cependant chercher à évaluer la capacité de réponse future d'un système dans le cadre de scénarios de gestion de crise basés sur un diagnostic (approche prospective dans ce cas là).

Pour simplifier, on peut établir des correspondances entre ces combinaisons d'approches et les termes usuels s'y raccordant : constats d'endommagement, diagnostics de vulnérabilité et scénarios d'endommagement et de gestion de crise. Suivant les éléments vulnérables étudiés et les disciplines mobilisées (ingénierie, sociologie, médecine,…), les constats d'endommagement peuvent prendre des formes diverses : constats pathologiques, retours d'expériences, analyses épidémiologiques, autopsies…

1.2.3. Disponibilité des approches

Un des objectifs de ce travail est de cerner le niveau de disponibilité des différentes approches et méthodes d'évaluation des vulnérabilités aux menaces naturelles, dans une optique de transferts d'expériences mais aussi de définition des axes de recherche à développer dans le futur. Pour cela nous avons défini une classification à triple entrée (aléa / éléments vulnérables / type d'approche) renvoyant à quatre niveaux de disponibilité (**tableau 1.2**.). Les aléas retenus sont au nombre de 6 (sismique, volcanique, mouvements de terrain, cyclonique, tsunami, inondation), les éléments vulnérables définissent 7 types de vulnérabilités (corporelle, sociale, institutionnelle, structurale, fonctionnelle, économique et systèmique), et les trois grandes approches d'évaluation correspondent aux constats d'endommagement, aux diagnostics et aux scénarios.

Les niveaux et critères de disponibilité retenus sont les suivants :

1. Disponibilité opérationnelle : cela concerne les approches bien rôdées pour lesquelles existent des méthodes d'évaluation standardisées et généralement assistées par des outils pouvant même être commercialisés (logiciels et bases de données). Par définition elles sont reproductibles.

2. Disponibilité sub-opérationnelle : cela concerne des approches non standardisées mais bien décrites et généralisées avec un protocole méthodologique reproductible.

3. Disponibilité non-opérationnelle : cela concerne des approches en cours de développement/recherche, souvent inédites, mais qui devraient déboucher sur des applications futures et/ou sur des protocoles méthodologiques reproductibles.

4. Pas de disponibilité : cela concerne les approches non-identifiées dans le cadre de cette étude ou bien non-disponibles pour le moment faute de travaux engagés.

Pour chaque cellule du **tableau 1.2.** nous avons porté, soit la référence de la méthode suivie, si celle-ci est standardisée (méthode opérationnelle), soit la référence de travaux significatifs, voire exemplaires pour les niveaux de disponibilité inférieurs. Les références étrangères apparaissent en noir tandis que les références françaises sont en blanc. A titre indicatif, et afin de positionner notre recherche dans le champ international de l'évaluation des vulnérabilités, nos principales contributions sur les vulnérabilités apparaissent dans ce tableau de synthèse. La partie méthodologique des ces contributions est résumée en conclusion générale de ce mémoire (**tableau C.1**).

Tableau 1.2. Niveaux de disponibilité de différentes approches d'évaluation des vulnérabilités aux catastrophes naturelles. Les références des travaux significatifs en France sont en blanc et ceux étrangers en noir. L'échelle de disponibilité est exprimée par un code couleur.

Aléa et type d'approche	Eléments vulnérables (types de vulnérabilités)							
Sismicité	Population		Institutions	Bâtiments	Réseaux		Activités	Système urbain
	Sociale	Corporelle	Institutionnelle	Structurale	Structurale	Fonctionnelle	Economique	Systémique
Constat d'endommagement	Colbeau-Justin & de Vanssay, 1996 - Leone & Mavoungo, 2000	Mahue-Giangreco et al., 2001	Colbeau-Justin & de Vanssay, 1996	ATC-20 - AFPS	Hassani &Takada, , 1995	Chang, 1996	Mazzocchi & Montini, 2002	Menoni, 2001
Diagnostic de vulnérabilité	Mavoungo, 2006	?	?	HAZUS - ATC-88 - Gémitis	Durville & Meneroud, 1987	?	Gémitis-Nice	Gémitis-Nice (Lutoff, 2000)
Scénarii	?	HAZUS - Coburn et al., 1992	?	HAZUS - ATC-85 - Gémitis	HAZUS - ATC-91	HAZUS	HAZUS	Gémitis-Nice

Volcanisme	Population		Institutions	Bâtiments	Réseaux		Activités	Système urbain
	Sociale	Corporelle	Institutionnelle	Structurale	Structurale	Fonctionnelle	Economique	Systémique
Constat d'endommagement	de Vanssay & Colbeau-Justin, 2000	Baxter et al., 1997	Leone & Gaillard, 1999 - Voight, 1990	Spence et al., 1996	?	D'Ercole & Metzger, 2000	Gaillard, 2001	D'Ercole & Metzger, 2000
Diagnostic de vulnérabilité	D'Ercole, 1991- Dibben & Chester, 1999	?	Lesales, 2005	Pomonis et al., 1999	?	?	?	D'Ercole & Metzger, 2004
Scénarii	?	Baxter et al., 1998	?	Leone, 2004 - Pomonis et al., 1999	Stieltjes & Mirgon, 1998	?	?	Gomez-Fernandez, 2000

Mouvements de terrain	Population		Institutions	Bâtiments	Réseaux		Activités	Système urbain
	Sociale	Corporelle	Institutionnelle	Structurale	Structurale	Fonctionnelle	Economique	Systémique
Constat d'endommagement	Leone, 1996	?	?	Alexander, 1988 - Leone, 1996	Leone, 1996	Leone, 1996	Leone, 1996	?
Diagnostic de vulnérabilité	Cospar, en préparation	?	Cospar, en préparation	?	?	?	?	Finlay, 1996
Scénarii	?	Finlay, 1996 - Leone, 1996	?	Hulbergern & Carree, 1987 - Leone, 1996	Leone, 1996 - Panizza et al, 2002	Leone, 1996	Mora, 1992	Mora, 1992

Vents forts	Population		Institutions	Bâtiments	Réseaux		Activités	Système urbain
	Sociale	Corporelle	Institutionnelle	Structurale	Structurale	Fonctionnelle	Economique	Systémique
Constat d'endommagement	Sarant et al. , 2003	?	Sarant et al., 2003	Hamparian, 1999	?	?	?	?
Diagnostic de vulnérabilité	Pagney & Suédois, 1999	?	Sarant et al., 2003	Bonfanti, 2004 - HAZUS	?	?	?	?
Scénarii	?	?	?	Khanduri & Morrow, 2003 - HAZUS	?	?	Khanduri & Morrow, 2003 - HAZUS	?

Inondations	Population		Institutions	Bâtiments	Réseaux		Activités	Système urbain
	Sociale	Corporelle	Institutionnelle	Structurale	Structurale	Fonctionnelle	Economique	Systémique
Constat d'endommagement	?	Jonkman et al., 2002	?	Kelman & Spence (2004)	?	?	Torterotot, 1993	NRC, 1999
Diagnostic de vulnérabilité	DEFRA/FHRC, 2003	DEFRA/FHRC, 2003 Green, 1988	Lagadec, 1995	?	?	?	Ledoux & Sageris, 1999 Barbut et al., 2004	Hardy, 2003 Reghezza, 2006
Scénarii	?	Ruin & Lutoff, 2004	Gilbert & Bourdeaux, 1999 Lagadec, 1995	HAZUS	?	?	HAZUS	Liu Renyi & Liu Nan (2002) Islam (1997)

Légende :

1- Disponibilité opérationnelle (approche standardisée et reproductible)
2- Disponibilité sub-opérationnelle (approche non-standardisée mais reproductible)
3- Disponibilite non-opérationnelle (approche en phase de développement/recherche)
4- Non disponible ou pas de références identifiées (?)

Cette analyse, dans son état actuel, permet de tirer le bilan général suivant :

– C'est pour la sismicité et les inondations que l'on dispose le plus de méthodes opérationnelles ou quasi-opérationnelles. Cela est précisément le cas pour l'aide à l'élaboration de scénarios d'endommagement, pour la conduite de diagnostics de vulnérabilité structurelle du bâti sur lesquels reposent ces scénarios, ainsi que pour les constats pathologiques du bâti après séismes. C'est pour le volcanisme et les mouvements de terrain que l'on dispose le moins de méthodes opérationnelles. Cela est dû, d'une part à la complexité et à la diversité de ces phénomènes, pour lesquels il est très difficile de modéliser le potentiel d'endommagement (magnitude et taux d'endommagement), et d'autre par à l'insuffisance de retours d'expériences sur des catastrophes correspondantes.

– De façon générale, le champ de recherche le plus investi semble celui des vulnérabilités structurelles et en particulier du bâti ; le moins investi, celui des vulnérabilités institutionnelles. Par contre, les vulnérabilités sociales font de plus en plus l'objet de recherches, souvent conduites par des géographes et quelques sociologues, notamment pour le volcanisme et les inondations, mais beaucoup moins pour la sismicité.

– Les approches les plus développées et généralisables sont les constats d'endommagement et autres retours d'expérience, notamment pour la sismicité, les inondations et probablement pour les vents forts même si nous manquons de références sur la question.

– Les méthodes d'élaboration de scénarios d'endommagement sont très au point pour les séismes, beaucoup moins pour les mouvements de terrain et encore moins pour le volcanisme qui n'a pour l'instant jamais fait l'objet d'une recherche universitaire de fond sur la question.

– Les approches systémiques (système urbain) sont peu courantes, ce qui peut s'expliquer par l'important travail collectif et pluridisciplinaire et donc le coût important de telles recherches. Les approches systémiques sont le plus souvent conduites dans le cadre d'évaluations globales de la vulnérabilité.

– Les scénarios de gestion de crise, en prenant notamment en compte les capacités de réponse et les comportements potentiels des acteurs institutionnels, des populations et des médias mais aussi les dommages et dysfonctionnements semblent quasi-inexistants pour les phénomènes retenus dans cette étude. Cependant, les travaux menés dans le cadre du programme Gémitis Nice et surtout ceux menés sur la ville de Quito par l'IRD ou bien sur les Antilles dans le cadre du retour d'expérience sur le cyclone Lenny, permettent de préparer de telles applications.

1.3. Conclusion

A l'issue de ce bilan, il apparaît que la société française exprime nettement une demande d'analyse des causes anthropiques et des impacts des inondations. Cette problématique renvoie directement à l'analyse des différentes formes de vulnérabilité qui conditionnent la catastrophe. Or elle apparaît encore insuffisamment traitée par les milieux scientifiques français et se distingue par un manque de méthodes d'évaluation opérationnelles. Pour les autres aléas, la recherche est néanmoins active depuis quelques années mais le savoir faire français s'exprime surtout sur un plan technique dans le domaine du risque sismique avec la mise au point de scénarios de pertes ou de dysfonctionnement urbains. Toujours en France, le champ de la vulnérabilité sociale est assez bien couvert par des géographes, notamment pour le

volcanisme et les inondations. D'une façon générale et à l'échelle internationale, comparées aux méthodes d'évaluation des aléas qui sont bien standardisées, celles s'appliquant aux vulnérabilités manquent de lisibilité et de cadrage. Cela tient au caractère assez récent de ce champ de recherche, surtout en France, et à la grande diversité des types de vulnérabilités analysées. Or, la demande de méthodes d'analyse et d'évaluation des vulnérabilités, notamment humaines et territoriales, se fait de plus en plus ressentir au sein des grands appels d'offres internationaux sur les risques naturels. Cela répond logiquement aux nouveaux objectifs fixés par les institutions nationales (MEDD) ou internationales (ONU) qui ont fait de la réduction des vulnérabilités, le nouveau point focal de la prévention des risques naturels (ISDR, 2002).

PARTIE 2

APPORTS DES RETOURS D'EXPERIENCE ET DIAGNOSTICS DE RISQUE

2.1. Le retour d'expérience : diversité des approches et des apprentissages

2.1.1. La demande de retour d'expérience

De nombreuses définitions du retour d'expérience ont été proposées et sa mise en pratique, à l'origine dans le monde industriel, se traduit par différentes approches. D'une manière générale, dans une organisation le retour d'expérience est un outil de management, utilisé par l'encadrement pour identifier les causes de dysfonctionnement par l'analyse des faits (séances de débriefing, interviews, etc.) et pour en tirer des leçons (nouvelles consignes, modifications organisationnelles, etc.). Le retour d'expérience n'est pas restrictif à l'analyse des causes des dysfonctionnements, mais peut également servir pour l'analyse des activités pour en déduire les causes de bon fonctionnement par exemple. Tous les individus ont une propre expérience, plus ou moins intéressante, et tous les individus sont plus ou moins prêts à partager cette expérience.

Le retour d'expérience peut être défini très brièvement comme un processus composé de méthodes et de procédures pour tirer des enseignements des activités passées. Le retour d'expérience permet d'identifier les méthodes qui conduisent au succès, d'évaluer le chemin parcouru, de mesurer l'efficacité de son action, d'accéder à la capitalisation d'expérience en favorisant le développement et le partage des bonnes pratiques (Van Wassenhove, 2004).

En premier lieu, le retour d'expérience (REX) s'inscrit dans les traditions des sciences de l'ingénieur, dont l'approche empirique constitue encore aujourd'hui une des solutions privilégiées par les ingénieurs pour passer de la théorie des calculs et des mathématiques à la mise au point des technologies et à leur perfectionnement. Ainsi, le monde de l'industrie constate de façon régulière qu'il existe de nombreux écarts entre ce qui peut être prétendu par la théorie et la réalité de l'expérimentation. C'est en comprenant ces écarts que les industries ont pu perfectionner leurs technologies et les rendre chaque jour plus performantes (ICSI, 2005).

Depuis quelques décennies, sous des pratiques différentes et des objectifs variables, les REX se sont progressivement généralisés et diversifiés dans le champ des risques majeurs, d'origine naturelle où anthropique, dépassant largement le cadre initial des pratiques industrielles. L'un des premiers REX « cat. nat. » évènementiel réalisé en France est sans doute le travail entrepris par Alfred Lacroix au lendemain de la catastrophe de la Montagne Pelée de 1902 (Lacroix, 1904). Il marquait le début de la volcanologie moderne. D'autres REX ont suivi en France, sur diverses catastrophes, mais sans réel effort de formalisation, plus souvent dans un souci de recherche de responsabilités que d'apprentissage scientifique.

Dans le champ des risques industriels, le REX s'est historiquement développé sur l'événementiel à partir de l'accident de la centrale nucléaire de Three Miles Island aux Etats-Unis en 1979. Cet accident a provoqué une véritable prise de conscience et une évolution importante dans l'approche de la sûreté de fonctionnement des sites nucléaires car de gros efforts avaient été faits au niveau de la conception et l'idée que tout était parfait du point de vue technique s'était imposée. Cet accident a révélé l'importance du facteur humain ainsi que la nécessité de mieux exploiter le retour d'expérience. L'évènement de Tchernobyl en 1986 a également fait l'objet d'un REX dépassant le cadre de l'évènement et de ses conditions de réalisation pour intégrer ses effets induits, notamment sanitaires, bien au-delà du périmètre de

la centrale. Depuis les REX se sont multipliés, en particulier dans le secteur nucléaire (Kervern G.Y. & Wybo J.L., 2001).

En France, il faut attendre 1997 et le rapport de l'Instance d'Evaluation des Politiques Publiques de Prévention des Risques Naturels (Commissariat Général du Plan, 1997) pour voir se formaliser le retour d'expérience Cat. Nat.. Dès le 19 juin 1998, la MISE (aujourd'hui l'IGE, Inspection Générale de l'Environnement) a été chargée par le ministre de l'Environnement de réaliser une mission de réflexion et de propositions sur l'organisation du retour d'expérience dans le domaine des risques naturels. Il s'agissait d'examiner les bénéfices que pourrait apporter une systématisation du retour d'expérience et la pertinence de la distinction entre événements de portée nationale ou locale. La mission était chargée de la préparation d'un guide, accompagné de la définition des indicateurs statistiques pertinents dans le cadre d'une organisation de retour d'expérience nationale. Le rapport de la mission d'Inspection Spécialisée de l'Environnement (Barthelemy et al., 1999) a été remis en mai 1999.

Dans ses recommandations, l'Instance d'Evaluation suggérait que « l'Agence de retour d'expérience », spécialisée et indépendante, utilise deux types d'approches : **une approche technique** (ou **approche experte)** et **une approche à caractère plus sociologique** : sociologie des organisations pour étudier les interactions entre les différents services et psychologie sociale pour cerner les représentations du risque par les citoyens ou les responsables. A la suite des recommandations de la mission, un panorama des différentes formes de retour d'expérience a été dressé au cours d'un séminaire CNRS mené sous la direction de Claude Gilbert (1999 à 2000). Les conclusions du séminaire soulignaient que, si la notion de retour d'expérience est devenue une « notion commune », la diversité des pratiques n'en faisait pas un « objet commun », approprié largement par les acteurs. Un des obstacles les plus fréquents étant celui des conséquences juridiques possibles de l'exercice, par la mise en évidence des dysfonctionnements des services ou des acteurs concernés (Gilbert & Bourdeaux, 2001).

Malgré la pertinence de ce constat, de nombreuses formes, hétérogènes, de retour d'expérience ont toujours lieu à la suite de chaque accident ou événement exceptionnel, en raison de l'importance de la pression sociale de demande d'explication qui s'exerce vis-à-vis des responsables. On a pu prendre la mesure de cette demande, une nouvelle fois, à la suite de l'accident chimique d'AZF à Toulouse. L'absence d'explication crédible rapide a permis à de nombreuses rumeurs de se développer. Il y a donc aujourd'hui une demande pressante des pouvoirs publics de mise en place de procédures de retour d'expérience, reproductibles et transférables à des domaines et des situations différentes.

2.1.2. Les fondements de la démarche

En matière de prévention et de gestion des risques, le retour d'expérience post catastrophe répond à un triple besoin : une demande sociale et une demande technique d'explication de la catastrophe ou de l'accident et de recherche des causes de l'événement ; et une demande d'enseignements utilisables pour l'avenir.

Il s'agit, d'une part, de répondre à un besoin qui paraît fondamental chez l'être humain, « le besoin d'expliquer pour contrôler » ; la demande d'explication émane à la fois de la société civile et des experts. Il s'agit, d'autre part, de « *revenir de manière collective sur des événements pour en tirer des enseignements ; c'est une opportunité de progrès collectif ; c'est l'exploitation des aspects positifs d'une situation* accidentelle » (Lagadec *in* Commissariat

Général du Plan, 1997). Il s'agit alors de développer un outil de formation à l'usage des services concernés. Selon la perspective choisie, il y aura donc différents types d'analyse de retours d'expérience. La démarche proposée par la MISE reste quantitative. Si elle représente un pas important pour la fonction publique, elle ne répond pas à tous les besoins exprimés dans l'après catastrophe, besoins qui se situent surtout dans « la demande d'explication et de reconstitution».

L'explication des événements est une préoccupation quotidienne de tous les acteurs de la vie sociale et non pas des seuls experts (Kouabenan, 1999). L'explication « naïve », c'est à dire non experte, de l'accident remplit une fonction sociale importante. Duclos (*in* Kouabenan, 1999) parle de « restauration de l'ordre par l'explication ». L'explication experte est conduite avec un large éventail de méthodes, méthodes de type clinique, comme celle dite de l'arbre des causes ou de défaillance, et méthode d'analyse des données, de type statistique.

Le retour d'expérience ne peut pas se contenter de la seule analyse experte des causes de l'accident. Il s'interroge sur la construction des circonstances, techniques, phénoménologiques, mais aussi sociales, qui ont conduit à l'accident et en particulier sur les présupposés ou les croyances qui ont limité ou empêché la vigilance et le repérage habituel des signaux d'alerte donnés par l'environnement. Mais, l'explication « naïve » de l'accident ne prévaut pas sur l'explication experte. Dans l'explication « naïve », très souvent le sujet va au-delà de l'événement lui-même. Il s'agit d'une interprétation subjective des événements. Cette réinterprétation est d'autant plus essentielle à connaître et analyser qu'elle a déterminé les comportements individuels ou organisationnels pendant l'événement, et construit de nouvelles représentations du risque potentiel dans la période post crise.

2.1.3. Différentes formes de retour d'expérience

Face à l'absence de procédure stabilisée en France, on peut s'interroger sur les méthodes utilisées à l'étranger. Les pays de culture anglo-saxonne, dans un souci de transparence, ont développé, les premiers, des procédures et des méthodes d'investigation des accidents. Les principales formes qu'ont pris ces « retours d'expérience » au Canada, en Angleterre et aux Etats Unis sont présentées par H. Denis (1998). Cet auteur fait une différence essentielle entre « les analyses techniques » qui portent sur la reconstitution du phénomène et de ses effets, et le « retour d'expérience sur les actions de réponses à la catastrophe » développé davantage selon les approches de la sociologie. En terme de production Denis (1998) distingue :

– Les **rapports portant sur les quasi-accidents**, nécessaires, pour des raisons morales et pragmatiques, aux fins d'échange d'information, et pour des raisons économiques, pour éviter le coût de l'accident et la perte d'image de l'entreprise ou du service public concerné. Ces rapports à caractère technique s'adressent exclusivement aux services internes.

– Les **analyses des commissions d'enquêtes** qui mettent en évidence l'interdépendance des différents éléments constitutifs de la catastrophe, événements naturels et comportements humains (individus et organismes publics ou privés) dont un exemple est celui de la tempête de verglas de 1998 au Canada ; la Commission d'Enquête a le pouvoir d'assigner des témoins ou de protéger leur droit de témoigner. Les rapports des Commissions sont mis à la disposition du public.

Un travail de P. Lagadec (2001) montre toute la richesse de l'information recueillie par ce type de Commission d'Enquête, en Angleterre, dans « l'affaire de la vache folle », et l'analyse

que l'on peut en tirer dans un deuxième temps. L'auteur souligne toutefois les écueils liés à ce type de retour d'expérience : le risque de simplification des événements lorsqu'ils ne « *consolident pas des thèses explicatives, alors que la dynamique de la crise est faite d'événements singuliers, de bifurcations accidentelles et d'incohérences apparentes…* » (*in* Kouabenan, 1999). *Ainsi que le risque de souligner des insuffisances, (voire des dysfonctionnements) sans les replacer dans leur contexte de complexité* ».

En France, l'outil le plus courant est celui de l'enquête administrative, réalisée par les Inspections Générales (anciennement MISE, aujourd'hui IGE). Contrairement aux pratiques anglo-saxones, les rapports d'Inspection étaient diffusés, le plus souvent, qu'en interne. La décision, en 1999, de Madame Voynet, ministre de l'Environnement, a modifié ce système en publiant, sur le site Internet du ministère, les récents rapports des Inspections Générales (rapports sur les inondations de l'Aude en 1999, sur l'avalanche de Chamonix en 2000, sur les inondations de Bretagne en 2001, sur les inondations de la Somme en 2001, sur les inondations du Gard en 2002). Ces rapports se situent délibérément dans l'analyse experte. L'explication « naïve », confiée à des chercheurs en sciences sociales, peut ou non venir les étoffer.

Par ailleurs, il existe de nombreux rapports réalisés par des chercheurs en sciences sociales, littérature grise le plus souvent, qui constituent des formes de retours d'expériences souvent sectoriels. En France, ils sont commandités par le ministère de l'Environnement ou certains grands organismes de recherche (CEMAGREF, Ponts et Chaussées, BRGM). Selon la demande du commanditaire, l'analyse de la catastrophe se limitera à l'un ou l'autre de ses aspects. Jusqu'ici les analyses globales ou systémiques, c'est à dire combinant l'analyse experte et l'analyse sociologique voire psychosociologique, de la catastrophe ont été très rares.

Les interrogations sur la faisabilité du retour d'expérience ont été synthétisées dans un document final par Gilbert (1999). On y signalait en particulier la question concernant les modalités de diffusion du retour d'expérience et les niveaux de mise en œuvre des recommandations. Le retour d'expérience, toutefois, était défini comme une procédure devant normalement accompagner les erreurs et les dysfonctionnements normaux survenant dans les « activités à haut risque ». Cette définition apparaît comme une première tentative de dédramatisation collective des procédures de retour d'expérience.

2.1.4. Différentes pratiques du retour d'expérience

On peut regrouper les différentes formes de retour d'expérience évoquées précédemment, selon plusieurs catégories : retours d'expérience institutionnels, commissions d'enquêtes, enquêtes judiciaires, actions scientifiques et programmes de recherche. Ce classement donne un aperçu de la diversité des approches conduites ces dernières années. Certaines de ces approches et missions ont fait l'objet d'implications personnelles que l'on développera ensuite, notamment en terme de méthodologie employée, d'objectifs poursuivis, et de principaux résultats pour mieux caractériser et évaluer la vulnérabilité aux menaces naturelles.

L'approche institutionnelle de l'Inspection Générale de l'Environnement : aujourd'hui les rapports de missions sont rendus accessibles sur le site Internet du Ministère de l'Environnement. Ils sont réalisés sous la direction de l'Inspection Générale de l'Environnement. Selon le texte proposé par la mission, on peut résumer ainsi les perspectives de leurs travaux récents. Deux types de retour d'expérience sont communément pratiqués :

– Le *retour d'expérience par les parlementaires* (accident de Toulouse 2001, inondations de Bretagne décembre 2000). La commission chargée de l'enquête audite un certain nombre de spécialistes (environ une centaine). Le travail de la commission fait l'objet d'un document qui compile les différentes auditions. Une synthèse propose une série de recommandations.

– Le *retour d'expérience élaboré par les services administratifs* en réponse à une saisine d'un ou plusieurs ministères. Selon la personnalité du coordinateur et les spécificités de l'événement, le travail peut être conduit différemment. On notera par exemple les caractéristiques de la mission d'inspection sur les inondations du Gard qui est originale à plus d'un titre. Cette mission est celle qui s'approche le plus des pratiques utilisées à l'étranger. Elle a l'intérêt de s'être déroulée conformément au cadre et aux rites français habituels, mais elle les a considérablement enrichis.

L'approche du Ministère de l'Intérieur : par une circulaire du 27 mars 2003, le Ministère de l'Intérieur demande aux préfets d'organiser localement le retour d'expérience post accident *« compte tenu de son importance stratégique pour la mise en œuvre d'une politique de prévention crédible ».* La méthode est conçue, dit le ministère, *« pour faire émerger les points forts et les points faibles, et des propositions d'amélioration d'ordre technique, humain et organisationnel ».* La méthodologie proposée part d'une approche globale et doit aborder successivement les mesures préparatoires à la gestion de la crise, la crise proprement dite et le dispositif de gestion de crise ; la gestion de la post crise. *« La démarche de retour d'expérience doit être clairement soutenue par les préfets pour asseoir sa légitimité ; elle doit être engagée le plus tôt possible après la survenance de l'événement…Les responsables de la conduite du retour d'expérience doivent être désignés formellement par les préfets »… « Les propositions d'amélioration d'ordre technique, humain et organisationnel contenues dans le document de synthèse doivent faire l'objet d'un suivi et d'une mise en œuvre programmée dans le temps, de telle manière que les résultats de la politique publique de retour d'expérience puissent être mieux évalués »*. En conclusion, le ministère demande aux préfets « *de bien vouloir dès à présent relayer les efforts que la Direction de la Défense et de la Sécurité Civiles entreprend actuellement pour développer la culture du retour d'expérience* ».

Les Enquêtes Judiciaires : les enquêtes judiciaires menées en France sont généralement très complètes mais elles sont rarement publiées dans leur intégralité et sont menées dans un objectif de recherche de responsabilité. Le cas de la chute du téléphérique du Pic de Bure (Hautes-Alpes, juillet 1999, 20 morts) peut servir d'exemple de la longueur des procédures et du nombre d'acteurs qui vont se trouver mis en examen. Toutefois, dans ce cas particulier, on retrouve des conclusions similaires à celles de B. Turner (Mines de Cambrian Colliery), concernant l'importance des représentations et des présupposés dans la constitution même de l'accident : « *Face à des budgets serrés, le maître d'ouvrage a toujours pris des décisions à l'économie ; l'accident était dès lors dans l'ordre des événements probables* ». On souligne ainsi la « construction » de l'accident par le biais de présupposés de sécurité et l'absence de contrôle liée à la modicité des moyens financiers.

Les Commissions d'Enquêtes : à l'étranger (Canada et Angleterre) des retours d'expérience exhaustifs ont été confiés à des Commissions d'Enquêtes (ESB, Rapport 2000 et Tempête de glace au Canada en 1998). Ces enquêtes, très lourdes à organiser et à mener, et très coûteuses, se définissent comme des « examens ouverts de situations complexes » (Lagadec, 2001) et une invite au questionnement. Toutefois, elles se présentent sous forme de rapports touffus, difficiles à lire et dépourvus de carte des acteurs impliqués. Le constat tiré par

Lagadec (2001) du rapport concernant l'ESB, milite à son tour pour la généralisation du retour d'expérience : « *La confiance du public ne peut être établie que si les communications sur les risques sont franches et objectives ; il doit y avoir ouverture sur les incertitudes* ».

L'approche REX Positif : Le pôle cindyniques de l'Ecole des Mines de Paris a développé une méthode intitulée « REX Positif » qui se définit comme un retour d'expérience interactif mettant l'accent sur le partage d'expériences entre les acteurs (Sarant et al., 2003). Il s'agit de collecter l'expérience individuelle de plusieurs acteurs et de la réunir sous la forme d'une expérience collective. La méthode utilise à la fois les techniques d'analyses ergonomiques développées dans l'industrie et les études de représentations et de perceptions des risques. Elle reprend le vocabulaire et certains concepts de l'approche cindynique développée par Kervern (1994). Les auteurs cherchent à développer une méthode d'apprentissage collectif qui se veut être un outil pédagogique. Elle a été appliquée en particulier aux inondations (Wybo, 2001) et à la catastrophe de l'Erika (Wybo et al., 2002). La démarche comprend quatre étapes :

– *Informer* : constitution d'une base de données aussi exhaustive que possible concernant l'événement à analyser : observation de l'environnement de travail, rapports écrits, entretiens, comptes-rendus, conversations informelles.

– *Analyser* : identification des événements clés qui ont rythmé le déroulement de l'accident. L'analyse met en évidence « les moments clés », auxquels sont liés des « cycles de décision ». Chaque événement clé constitue « un atome d'expérience ». Un questionnaire est élaboré à partir de cette première analyse. Il est ensuite présenté à deux catégories d'acteurs, ceux qui ont été impliqués dans l'accident et une population de référence non impliquée. On demande aux deux catégories d'interviewés ce qu'ils feraient dans la même situation. Deux types d'actions ressortent : des actions positives qui pourraient être utilement appliquées et des actions négatives qui aggravent la détérioration du système.

– *Valider* : Après avoir été interviewés individuellement, les acteurs reçoivent les résultats de leur entretien sous forme d'un ensemble « d'atomes d'expérience » et les approuvent ou les modifient. Ces résultats retracent les événements réels qui se sont produits lors de l'accident (atomes d'expérience réels), et les événements qui auraient pu avoir lieu lors d'une situation semblable (atomes d'expérience hypothétiques). Une réunion de tous les acteurs est organisée pour discuter de l'acceptation de la représentation globale de l'accident ainsi reconstruite.

– *Proposer des mesures* : des mesures pratiques, de nature technique, humaine ou organisationnelle sont ensuite proposées aux acteurs des trois sous-systèmes : neuronal, procédural et technique.

La méthode utilise trois supports graphiques :

– *le fil conducteur* : c'est le déroulement temporel et décisionnel de l'accident ;

– *l'arbre des causes* qui décrit la combinaison d'événements conduisant à la survenance de l'événement Il s'accompagne d'une représentation graphique « des barrières » de sécurité, de protection ou de prévention, c'est à dire des dispositifs, ou des changements organisationnels ou des actions humaines à mettre en place afin de mettre fin à la propagation de l'incident ;

– *les Hyperespaces Cindyniques* permettent de représenter le niveau de danger potentiel

d'un système à n'importe quel moment à partir de cinq dimensions : mnésique, épistémique, téléologique, éthique et axiologique (Kervern, 1994).

Cette méthode fait le lien entre les approches ergonomiques et les approches des sciences sociales, ce qui facilite l'appropriation de la méthode par le monde des ingénieurs et des techniciens. La notion de « moment clef associé à un cycle de décision » est l'apport le plus significatif. La comparaison entre les décisions qui ont aggravé la situation et les « bonnes décisions » qui auraient pu sauver la situation est au cœur du processus. C'est un apport important à condition que les « contextes » décisionnels aient pu être pris en compte. Cette méthode paraît plus performante pour rendre compte d'accidents industriels que des catastrophes naturelles. Elle reste subjective dans la définition des moments clés qui ne peuvent provenir que des interviewés. L'arbitrage entre les moments clés sera donc difficile. Elle fait peu de place aux interactions entre les acteurs et leur environnement. Cette approche se poursuit à l'Ecole des Mines dans le cadre du GIS REXAO. Ce groupement s'intéresse particulièrement aux méthodes de valorisation de l'expérience acquise lors de la gestion d'incidents, d'accidents et de crises, ainsi que lors d'exercices de simulation (http://www.rexao.org/nouveau/index.php).

L'approche REX interactive et systémique : Cette méthodologie originale a été développée et formalisée au cours d'un projet pluridisciplinaire (EPR) associant des géographes, des psychosociologues de l'environnement, des physiciens de l'atmosphère, une économiste et un expert des situations de crise (Sarant et al., 2003). Elle a concerné le cyclone Lenny aux Antilles (novembre 1999), sa genèse, ses effets, la réponse sociétale et l'analyse du jeu d'acteurs autour de sa gestion en phases de pré-crise, de crise et de post-crise, en replaçant l'analyse dans le contexte historique (quelles évolutions depuis Hugo notamment ?) et géographique (l'analyse a englobé l'ensemble de l'Arc des Petites Antilles), et donc pas uniquement les régions monodépartementales françaises d'Amérique (Martinique et Guadeloupe). Chaque équipe a utilisé les techniques d'investigation et de recherche qui lui sont propres. Des échanges sur les méthodes ont eu lieu à plusieurs reprises entre les équipes et en particulier sur la méthodologie de retour d'expérience. La recherche a ainsi bénéficié des regards croisés des différentes équipes.

La méthodologie présentée par l'équipe de recherche a été orientée vers les opérationnels et les responsables en souhaitant apporter un outil simple qui réponde à certaines préoccupations locales à partir d'une démarche en quatre points (**figure 2.1**) :

– *Donner à tous les acteurs locaux une vue globale des réponses* à l'événement dans le temps pour répondre à l'effet de discontinuité créé par le « turn over » des principaux acteurs. Une partie non négligeable des opérationnels, des experts et des responsables, comme les entretiens l'ont montré, changent de poste tous les trois ans. Ceux qui ont vécu le cyclone, en 1999, ne participeront pas toujours à l'effort de reconstruction local. Ceux qui ont formulé des procédures n'en verront pas toujours la mise en application. Un grand nombre d'informations peuvent ainsi disparaître si un retour d'expérience n'est pas fait.

– *Visualiser l'enchaînement des actions menées* en fonction des objectifs de référence des acteurs. Ce principe fonde aujourd'hui la démarche d'évaluation des politiques publiques. C'est une démarche diachronique qui permet de faire apparaître le poids de certaines décisions sur les actions entreprises. La formulation des objectifs permet des clarifications des démarches.

– *Mettre en évidence les systèmes de communication, formels et informels* pour favoriser le développement des réseaux d'acteurs pertinents en situation de crise. Il s'agit de sortir d'une vue hiérarchisée ou figée des compétences des acteurs, pour rendre de l'initiative et de la flexibilité aux systèmes de décision.

– *Développer une culture de risque régionale*. Des considérations d'ordre géographique ont également orienté la recherche. En effet, le morcellement des statuts politiques des petites Antilles n'a pas favorisé la prise en compte chez les différentes autorités locales de la dimension régionale du risque cyclonique. Or, il apparaît nécessaire de favoriser des échanges de procédures et de moyens techniques pour promouvoir une culture du risque régionale.

Nous avons pris part à cette approche en intégrant le programme de recherche sur le cyclone Lenny aux Antilles (Sarant et al., 2003 ; De Vanssay et al., 2004). Notre contribution a porté sur le rôle des acteurs et en particulier sur celui de la population sinistrée. Notre travail a consisté à synthétiser l'impact économique des dommages sur la Martinique suite aux effets de houle provoqué par le passage du cyclo. Nous avons également construit, validé puis supervisé la diffusion de questionnaires d'enquête destinés à recueillir les points de vue des populations sinistrées sur le littoral occidental de la Martinique, en Guadeloupe et sur d'autres îles du Nord (Sint-Maarten, Anguilla, Saint-Kitts). Le dépouillement et l'analyse de ces questionnaires nous ont permis d'analyser le vécu des populations en terme de qualité des comportements au moment du passage du cyclone. Nous en avons également tiré un certain nombre d'enseignement sur les représentations sociales du risque entre les îles ainsi que sur le niveau de préparation des communautés antillaises face à la menace cyclonique. Cette enquête auprès des populations, couplée à des entretiens avec des acteurs officiels, apporte un regard critique sur la qualité de la réponse institutionnelle au cours des phases d'urgence, de restauration et de reconstruction post-cyclonique, en matière d'assistance aux personnes puis de choix de reconstruction et d'amélioration de l'alerte. Notre contribution est venue alimenter les différentes propositions formulées pour améliorer le dispositif de gestion de crise cyclonique en particulier sur les Antilles françaises.

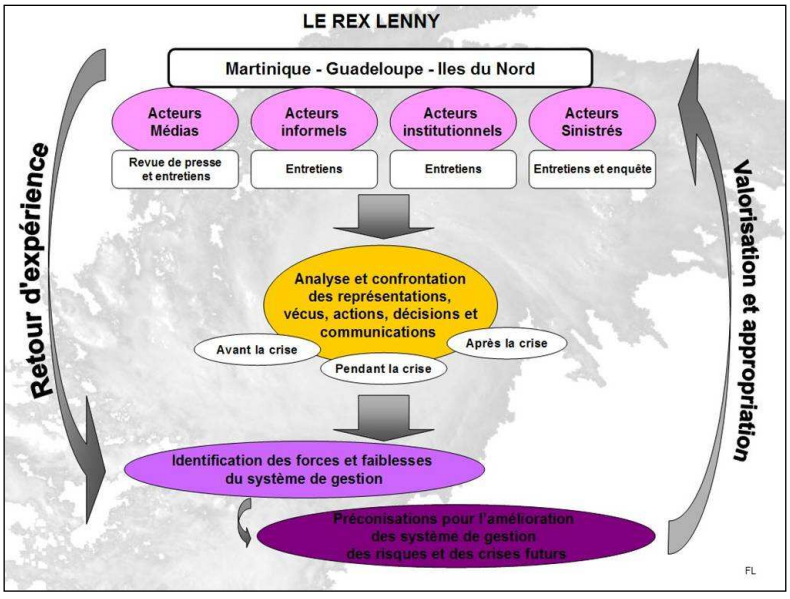


Figure 2.1. La démarche méthodologique suivie dans le cadre du retour d'expérience interactif et systémique sur le cyclone Lenny aux Antilles (1999).

Les retours d'expérience sur le long et moyen terme : la question de l'analyse à posteriori des conséquences de catastrophes naturelles sur le moyen ou long terme fait l'objet de très peu de développements méthodologiques et d'exemples dans la littérature scientifique française. On peut néanmoins citer les travaux menés par D'Ercole (1996b) sur la ville de Popayan (Colombie), dix ans après le séisme destructeur de 1983. Dans le monde anglo-saxon, les recherches ont été plus nombreuses en sciences humaines, en particulier sur les conséquences à long terme de catastrophes volcaniques (Ingleby, 1966 ; Lewis et al., 1972 ; Munch, 1964 ; Nolan, 1972 et 1979 ; Nolan & Nolan, 1993 ; Schwimmer, 1977 ; Tonkinson, 1968, 1977, 1985 ; Rogers, 1969 et 1981), sismiques (Bates, 1982 ; Hoover & Bates, 1985) et morpho-dynamiques (Oliver-Smith, 1977, 1979ab, 1992). L'objectif de ces approches et de mesurer les effets indirects d'un évènement dommageable, sur le plan socio-économique et territorial principalement, de suivre l'évolution des différentes réponses apportées au cours du temps pour en corriger les effets et mettre en place de nouveaux systèmes et de nouvelles logiques de fonctionnement, autant d'aspects qui permettent de témoigner du caractère catastrophique ou non de l'évènement déclencheur, conformément à la définition qui en est donnée par la systémique (Brunet el., 1993). Seule une analyse dans le temps permet de relativiser la dimension catastrophique ou non d'un évènement dont les pertes directes, humaine et matérielles, ne sont qu'un indicateur instantané de départ mais qui ne présage pas de la capacité de relèvement, autrement dit de la résilience des systèmes affectés. Ce travail de longue haleine visant à évaluer, caractériser, comprendre les mécanismes de résilience et de recomposition post-catastrophe peut prendre deux formes qui peuvent se combiner :

– *un diagnostic de l'état du système affecté*, sociétal, économique, territorial, organisationnel ou environnemental, à un instant donné, quelques années après l'évènement déclencheur. Il s'agit d'un instantané que l'on peut s'efforcer de caractériser avec des indicateurs simples et que l'on s'efforcera de comparer avec une situation initiale, avant et juste après l'évènement déclencheur, mais qui pour sa part nécessite d'être reconstituée à partir de sources diverses. Ce mode opératoire s'impose lorsqu'on s'intéresse à un évènement de départ que l'on n'a pas vécu ou pour lequel on n'a pas eu la possibilité de suivre les conséquences.

– *un suivi régulier, pas à pas, des conséquences et des réponses à un évènement* que l'on a pu éventuellement vivre. Cette démarche plus ou moins continue, généralement de longue haleine et assimilable à une véritable enquête, permet de décrypter tous les mécanismes de résilience et facteurs de vulnérabilité par une bonne connaissance des contextes et déterminants des prises de décision au cours du temps. Il s'agit d'un travail difficile à mener, exigeant une certaine « immersion » dans le sujet, difficilement compatible avec l'esprit des retours d'expérience institutionnels pour des raisons de temps d'exécution et de moyens humains. Aussi, on situe cette démarche plutôt dans le champ de la recherche scientifique et un très bon exemple en est donné avec les travaux menés en collaboration avec J.C. Gaillard consécutivement à l'éruption du volcan Pinatubo aux Philippines sur près de 10 années et grâce à une présence permanente sur le terrain.

Souvent ces deux approches se combinent, du moment où l'on procède par analyses successives, par une série de diagnostics répétés où l'on s'efforce à chaque reprise (par exemple tous les ans) de reconstituer les mécanismes de décisions et les conséquences depuis le diagnostic précédent. Ce travail régulier permet de révéler toutes les dimensions de la catastrophe en tant que construction sociale dont les causes sont certes naturelles, mais aussi à rechercher dans une multitude de facteurs profonds et en interaction, d'ordre social, culturel, économique, historique, etc. Il permet de comprendre les forces, faiblesses, rouages et jeu d'acteurs des systèmes de réponse qui se développent sur le long terme jusqu'à un état de récupération final qui doit s'apparenter à celui d'un nouveau système en équilibre tel qu'il est

apparu sur les flancs du volcan Pinatubo vers 2002, soit près d'une décennie après l'éruption de juin 1991 (**figure 2.2.**).

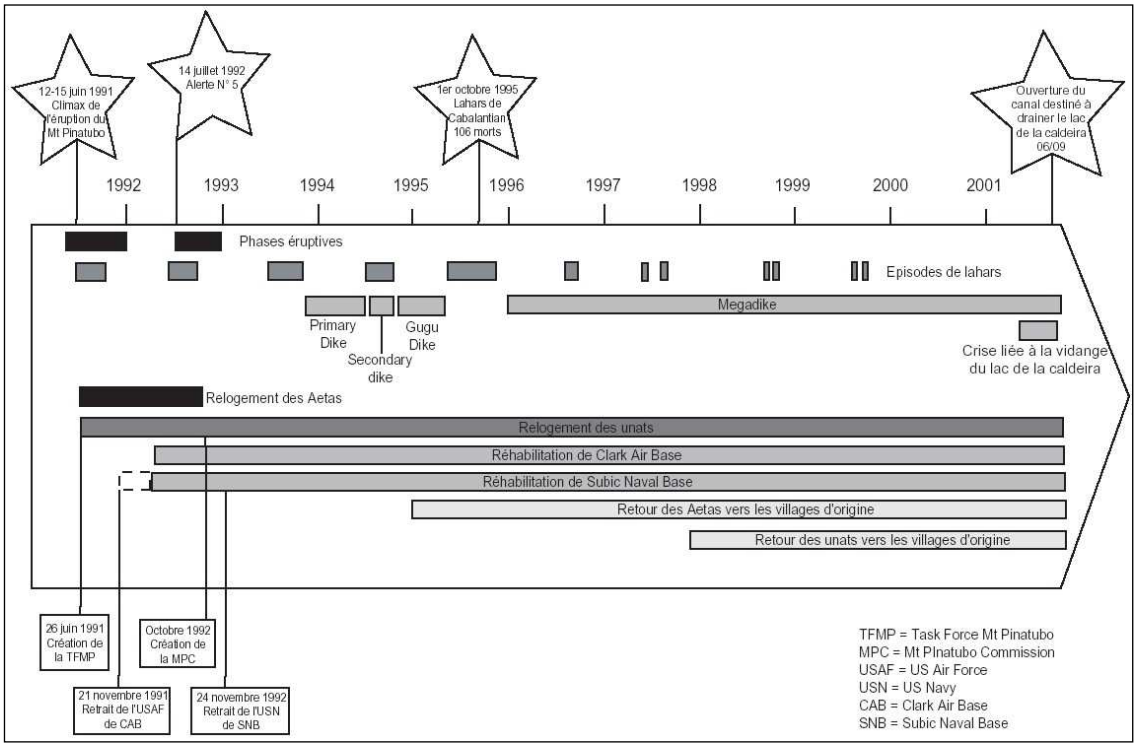


Figure 2.2. Moments clés analysés dans le cadre du retour d'expérience mené consécutivement à l'éruption et aux lahars du volcan Pinatubo aux Philippines de 1991 à 2001 (Gaillard & Leone, inédit).

A titre d'exempe, le travail entrepris sur le Pinatubo s'est déroulé en deux temps. Un premier diagnostic a été menée en 1996 avec pour objectif de reconstituer les conséquences directes et indirectes de l'éruption de 1991 prolongée dans ses effets destructeurs par les nombreux lahars induits, ainsi que d'analyser la qualité de la réponse institutionnelle en terme d'évacuation, de relogement et de protection (Leone, 1996b ; Leone & Gaillard, 1999). La qualité de cette réponse a été pondérée et synthétisée dans une matrice de dysfonctionnement institutionnel (*cf.* **tableau 2.1.**). Ce premier état des lieux a été prolongé par une analyse en profondeur et en continue des implications territoriales et socio-économiques de l'éruption et des lahars jusqu'en 2001, notamment pour la minorité ethnique *Aeta* qui vivait sur les flancs du volcan Pinatubo (Gaillard, 2001 ; Gaillard & Leone, 2000 ; Gaillard & Leone, inédit).

Ces retours d'expériences sur le long ou moyen terme relèvent, comme la catégorie précédente, d'approches socio-géographiques qualitatives (ou pseudo-qualitatives) visant à mieux caractériser les facteurs directs et indirects d'un système de vulnérabilité.

Tableau 2.1. Pondération des différents facteurs de vulnérabilité du système institutionnel philippin de réponse à la catastrophe du Pinatubo (matrice de dysfonctionnement institutionnel) (Leone, 1996b).

		FACTEURS DIRECTS											FACTEURS INDIRECTS						
PHASES DE GESTION		MCI	MCE	MCOM	MCO	MF	MMM	MMH	MP	MC	LH	MCF	CA	CP	CSE	CC	COR	P	TOTAL
Anté-CRISE *	Surveillance	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3
CRISE *	Alerte	1	1	1	1	0	2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	8
	Evacuation	1	1	1	1	0	2	0	0	0	1	0	2	2	2	2	0	1	16
Post-CRISE	Protection	1	2	2	1	1	1	1	2	0	2	2	1	2	2	2	2	0	24
	Relogement	2	2	2	2	2	2	1	1	0	2	2	1	2	2	2	1	2	28
	TOTAL	**5**	**7**	**6**	**5**	**3**	**8**	**2**	**3**	**1**	**5**	**4**	**4**	**8**	**6**	**6**	**3**	**3**	

* : elles comprennent celle de juin 1991 (éruption) et les suivantes (lahars).

Importance des facteurs **: 0 : nulle ou non décelée; 1 : faible; 2 : forte**

— *Facteurs directs* : MCI : manque de coordination interne; MCE : manque de coordination externe; MCOM : manque de communication; MCO : manque de concertation avec les populations; MF : manque de flexibilité des décisions; MMM : manque de moyens matériels; MMH : manque de moyens humains; MP : manque de planification/préparation; MC : manque de compétence; LH : lourdeur hiérarchique; MCF : manque de compensations financières /d'aides /de soutiens.

— *Facteurs indirects* : CA : contraintes administratives; CP : contraintes politiques; CSE : contraintes socio-économiques; CC : contraintes culturelles; COR : corruption; P : pillages.

Les constats d'endommagement : par constat d'endommagement on entend toute analyse à posteriori des pertes et dommages directs ou indirects liés à un évènement (victimes, destructions, dysfonctionnements), en lien avec la caractérisation du phénomène impliqué sa magnitude, son extension spatiale, sa durée, ses aléas induits (**figure 2.3.**). On entre là dans des considérations assez techniques de l'analyse de la vulnérabilité selon une approche experte et parfois quantifiée qui trouve des prolongements dans les notions de scénarios de risque et de modélisation des pertes potentielles. Bien souvent cette analyse se couple avec un retour d'expérience « phénoménologique » visant à reconstituer le phénomène en cause. En matière d'aléas naturels, le premier constat d'endommagement digne de ce nom date de 1903 avec le travail exemplaire d'Alfred Lacroix mené sur la Montagne Pelée (Lacroix, 1904). D'autres analyses, beaucoup plus qualitatives on été conduites en France auparavant. On peut citer le travail effectué par C. Deville Sainte-Claire (1843) suite au séisme meurtrier de 1843 en Guadeloupe.

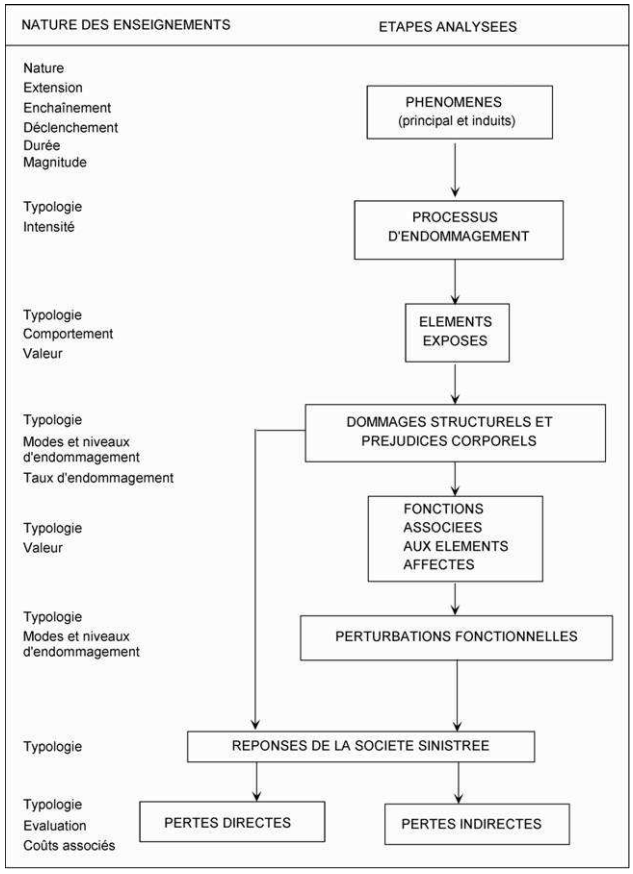


Figure 2.3. Les étapes et enseignements recherchés dans le cadre d'un retour d'expérience sur l'endommagement (Leone et al., 1995).

Mais l'effort de généralisation et de formalisation des constats d'endommagement post-catastrophes naturelles a été porté par la sismologie depuis 1972, à l'initiative de plusieurs associations de génie parasismique (EERI, EEFIT, AFPS) soutenues par leurs gouvernements respectifs. Confiées à des sismologues, des géologues et des spécialistes de la construction, ces travaux ont pris la forme de missions quasi-systématiques après de gros séismes destructeurs, intervenant quelques semaines après l'évènement, et de recommandations essentielles pour faire évoluer les normes de constructions parasismiques et la réglementation afférente. Cet effort de reconstitution du phénomène et de ses effets spatialisés, de recherche des causes directes de vulnérabilité structurelle des édifices humains, s'est largement étendu à d'autres phénomènes naturels en faisant appel à des experts d'autres disciplines, dont la géographie.

Une partie de nos recherches a contribué à cet effort de formalisation des constats d'endommagement pour d'autres phénomènes ou pour d'autres aspects que les seuls dommages directs habituellement cernés par les missions post-sismiques. Cela a été le cas pour l'aléa mouvement de terrain à la faveur d'une thèse de doctorat et de ses prolongements effectuée en collaboration avec le BRGM. Elle a a mis à profit des constats d'endommagement et d'autres formes de retour d'expérience sur les Alpes, l'Equateur et la Martinique (Leone, 1996a). La réflexion méthodologique développée, tant du point de vue de l'analyse des dommages (échelles d'intensité et matrices de vulnérabilité) que sa capitalisation dans le cadre de scénarios et de cartographies du risque, a trouvé par la suite des applications avec les tsunamis (Leone et al., 2006, **annexe 4**) et un cadre de formalisation plus large – multi-aléa – qui sera développé en troisième partie de ce mémoire.

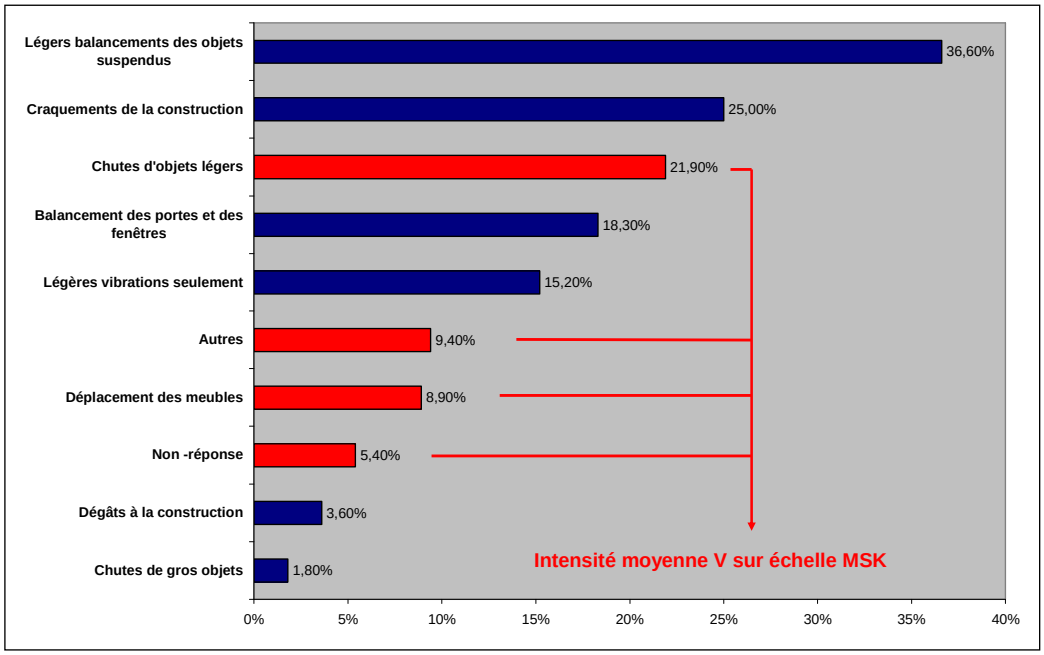


Figure 2.4. Identification de l'intensité moyenne du séisme du 8 juin 1999 ressenti en Martinique à partir de l'analyse statistique de ses effets physiques (Leone & Mavoungo, 1999).

Ces constats d'endommagement, lorsqu'ils sont spatialisés, ou simplement localisés, peuvent contribuer aussi à la reconstitution du phénomène naturel, et en cela utiliser l'analyse de la vulnérabilité structurelle (du bâti par exemple) comme un révélateur de certaines de ses caractéristiques physiques, comme :

– *son origine et son intensité*, avec par exemple l'utilisation des cartes macrosismiques obtenues par positionnement des intensités des dommages au bâti et qui permettent de retrouver l'épicentre du séisme et la faille active à son origine. A titre d'exemple nos enquêtes sur le séisme de juin 1999 en Martinique ont permis de définir son intensité sur l'échelle MSK (**figure 2.4.**).

– *son énergie*, avec le mise en évidence de variations des dommages proportionnelles à la distance d'action ou dues à des effets de site locaux (effets de sites topographiques ou géologiques agissant sur les ondes sismiques par exemple).

– *sa dynamique*, avec des discontinuités brutales du gradient de destruction lié à des changements de dynamique du phénomène. C'est par exemple ce qu'a révélé une analyse spatiale fine des dommages au bâti consécutivement au tsunami du 26 décembre 2004 au cœur de la vile de Banda Aceh. On a ainsi pu localiser précisément la zone de déferlement du tsunami dans les terres en suivant un protocole méthodologique inédit (Leone et al., 2006 & sous presse) (**figure 3.15** et **annexe 4**).

– *sa chronologie et sa durée d'action*, avec des marqueurs de dommages particuliers comme l'arrêt d'horloges.

– *ses effets d'enchaînement*, avec la mise en évidence de dommages variables imputables à d'autres phénomènes induits, ou des mécanismes d'action différents, qui ont pu se succéder et se surimposer les uns les autres. C'est par exemple le schéma suivi pour décomposer et caractériser les trois phases de la catastrophe de la Josefina survenue en 1993 en Equateur (glissement de terrain et barrage, inondation, onde de submersion et glissements induits par la rupture) (Leone & Velasquez, 1997) (**figure 2.5**).

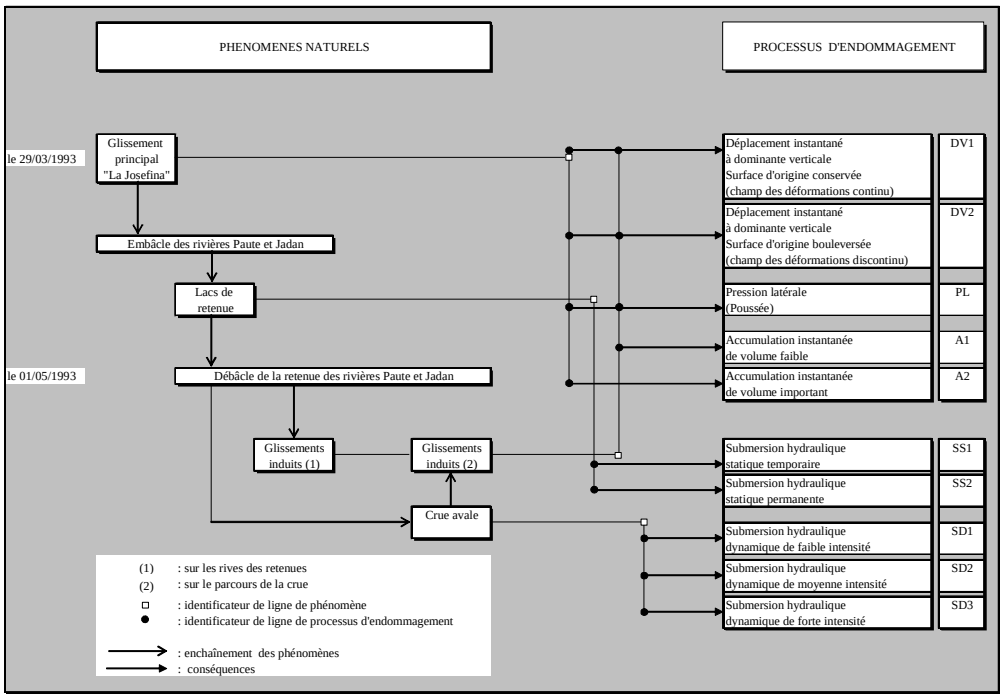


Figure 2.5. Phénomènes induits par le glissement de terrain de la Josefina (Equateur, 1993) et processus d'endommagement associés (Leone& Velasquez, 1997).

Ces exemples permettent de saisir l'apport complémentaire d'une analyse technique de vulnérabilité, menée en particulier par des géographes, à l'occasion de missions d'analyse traditionnellement confiées à des spécialistes de la discipline directement concernée par le phénomène en cause (sismologie, volcanologie, hydrologie, climatologie, géomorphologie) et/ou à des ingénieurs maîtrisant le comportement purement mécanique de certaines catégories d'éléments vulnérables comme les bâtiments, les réseaux physiques, les infrastructures de transformation, de stockage et leurs contenu divers. Nous verrons que ces constats d'endommagement, de manière à pouvoir être reproductibles et exploitables d'un point de vue statistique et analytique, devront aussi reposer sur des typologies des processus, modes et niveaux d'endommagement de diverses catégories d'enjeux hiérarchisés selon différents critères de vulnérabilité.

Les bilans économiques et humains : les pertes économiques et humaines sont en général les deux principales grandeurs les plus accessibles pour exprimer la gravité d'un évènement. Elles constituent de fait deux critères de classement des catastrophes retenus par les principales bases de données internationales (CRED, Munich Ré, Université du Colorado, OFDA, Nations Unies). Ces bilans sont souvent annexés aux retours d'expériences tels que pratiqués précédemment mais peuvent faire l'objet de recherches spécifiques. Pour notre part, plusieurs tentatives de quantification économique des pertes économiques directes et indirectes – et secondairement humaines – ont été réalisées au cours de nos recherches sur différents terrains (Diois, Martinique, Philippines, Equateur), consécutivement à différents évènements naturels (mouvements de terrains, éruption volcanique et lahars).

Tableau 2.2. Sources d'informations (coûts) consultées dans le cadre du retour d'expérience mené dans le Diois après les intempéries de janvier 1994 (Leone, 1996a).

SOURCES D'INFORMATIONS	NATURE DES INFORMATIONS DISPONIBLES
DDE Sociétés privées d'autoroutes	- dommages aux réseaux routiers et infrastructures associées - pertes d'exploitations routières - surcoûts de rallongement d'un trajet - coût de déviation ou de remplacement - coûts de substitution par un nouveau moyen de transport
SNCF	- dommages aux voies ferrées et infrastructures associées - pertes d'exploitation et de charge
ONF	- dommages aux exploitations et chemins forestiers - pertes de revenus forestiers
EDF-GDF	- dommages aux réseaux d'alimentation électrique et de gaz - coûts de substitution e de remplacement
DDAF Chambres d'agriculture	- dommages aux cultures, terres, récoltes et cheptel - pertes d'exploitation et de revenus agricoles - dommages aux forêts privées
Telecom	- dommages au réseau téléphonique - coût de substitution et de remplacement
Agences de bassin	- dommages aux réseaux d'adduction et d'assainissement et à certains ouvrages hydrauliques
Assurances	- dommages aux biens privés particuliers et domestiques et à certaines entreprises
Particuliers	- dommages privés immobiliers ou mobiliers
Pompiers (C.S.P.)	- coût des interventions de secours et des mesures d'urgence
Préfectures Sécurité civile	- déclarations de sinistre des communes (arrêté catastrophe naturelle)
Conseils généraux	- bilans partiels au niveau départemental
Communes (mairies) Syndicats intercommunaux	- dommages aux biens communaux et publics -pertes de revenus communaux (taxes professionnelles, locations, etc.)
Chambres des métiers	- dommages aux entreprises : . dégâts immobiliers, matériel et mobiliers, véhicules . pertes de matières premières et de produits finis . pertes de revenus . pertes de journées de travail

Les pertes économiques directes se limitent en général aux atteintes aux infrastructures et sont calculées sur la base des coûts de remplacement ou de réparation de ces dernières. Leur estimation nécessite un important travail de collecte et de recoupement qui a par exemple été entrepris sur la région du Diois en suivant deux approches complémentaires (Leone, 1996a) : (1) micro-économique, basée sur une récolte systématique d'informations auprès des gestionnaires et propriétaires des biens endommagés par les mouvements de terrain de janvier 1994 ; (2) macro-économique en recourant aux fiches de déclaration de dommages fournies par la préfecture du département (**tableau 2.2.**).

Une approche un peu différente a été menée en Martinique pour reconstituer le coût global moyen annuel des mouvements de terrain et de l'érosion littorale (Leone et Lesales, 1999). Il s'agit d'une approche probabiliste basée sur des séries de témoignages de dommages récoltées dans les archives sur la période 1950-1993. Les fréquences de retour annuelles de différents types de phénomènes ont ensuite été multipliées par le coût moyen théorique de l'impact direct du phénomène en question tel qu'il est fourni par la littérature (**tableau 2.3**). L'estimation s'est faite selon deux hypothèses, basse et haute. La fourchette de valeurs obtenues par cette méthode pour le seul territoire de la Martinique est proche de ce qui a été calculé par d'autres auteurs sur le département du Var et selon une approche purement déterministe. L'intérêt de cette méthode, réside dans sa facilité de mise en oeuvre du moment où l'on possède des séries statistiques fiables sur les évènements dommageables du passé pas forcément renseignés en terme de coûts. Cependant, les résultats peuvent être faussés par l'occurrence de phénomènes exceptionnels en intensité des dommages. Les valeurs de coût moyen utilisées doivent alors être ajustées en conséquence, ce qui n'a pas été fait pour la Martinique.

Tableau 2.3. Tentative d'approche du coût global moyen annuel des mouvements de terrain et de l'érosion en Martinique (dommages directs). Approche statistique basée sur les fréquences de retour (Leone & Lesales, 1999).

Types de phénomènes dommageables	Fréquences annuelles d'apparition	Fourchettes du coût des dommages (en kF)		Exemples	Total (en kF)	
		basse	haute		bas	haut
Glissements	4,4	100	250	Fonds-St-Denis, 1988	440	1700
Ecroulements-Eboulements	0,2	100	1 000	Bellefontaine, 1991	20	200
Chutes de blocs	0,3	20	100	RN2, 1993	6	30
Affaissements	0,2	50	200		10	40
Coulées boueuses	1	3 000	5 000	Prêcheur, 1980	3 000	5 000
Erosion torrentielle	0,9	300	500		270	450
Erosion marine	0,3	3 000	5 000		900	1 500
				TOTAL ARRONDI A :	**4700**	**8900**
					Soit 5 à 9 M.F. (0,76 à 1,37 M. €)	

Quant à elles, les pertes indirectes prennent en compte une multitude de répercussions indirectes souvent difficiles à quantifier : coût des opérations de secours, du relogement, des prises en charges médicales, des baisses d'activité locales et régionales... Aussi, cette analyse des répercussions économiques doit se faire sur le long terme, par secteurs d'activité et par zone géographique donnée, pour relativiser les effets néfastes de la catastrophe, du moins en termes purement économiques. En effet, une reconstruction bien pensée, bien encadrée et bien soutenue par la communauté internationale peut parfois s'avérer être un atout majeur pour redynamiser l'économie locale.

C'est par exemple ce qu'ont démontré nos recherches sur les implications territoriales et socio-économiques de l'éruption du volcan Pinatubo, menées conjointement avec J.C. Gaillard (Gaillard & Leone, inédit).

Malgré les doutes qui prévalaient au lendemain de l'éruption, l'économie de Central Luzon a pourtant su se relever des cendres du Mont Pinatubo. Dix ans après le réveil du volcan, l'économie régionale semblait revigorée. Les indicateurs économiques étaient tous au beau fixe. Entre 1990 et 1999, on a noté une hausse du Produit Régional Brut de près de 23%. Cette croissance n'a pu être imputée aux seuls travaux de reconstruction. Les investissements et les exportations ont également atteint des niveaux records. Les seuls investissements couvrant la période 1992-1998 (environ 10 milliards de dollars) ont largement compensé les pertes directes de l'éruption (sans doute proches de 1 milliard de dollars sur la même période), le coût de la reconstruction (environ 300 millions de dollars) et même les 4 milliards de dollars sur huit ans qu'aurait drainé le maintien de la présence militaire américaine dans la région. Si bien que l'on n'a pas observé de déficit de la balance des paiements à la suite de la catastrophe, contrairement à ce que l'on a pu constater dans de nombreux autres pays frappés par des désastres de cette ampleur. La reconversion réussie des deux anciennes bases militaires de Subic et Clark en zones économiques franches est l'élément essentiel du redressement économique de Central Luzon. Le nombre d'employés de Subic Bay Freeport et de Clark Special Economic Zone dépasse aujourd'hui celui de la période américaine. Bien aidées par les infrastructures militaires léguées par les américains, les autorités philippines ont su drainer les investissements étrangers vers Central Luzon. Indépendamment de l'éruption du Mont Pinatubo, la politique agressive mise en place dès 1992 par le président Fidel V. Ramos, notamment la suppression de tout contrôle des changes, a donc porté ses fruits. L'économie semble d'autant plus saine qu'elle n'est plus dépendante des intérêts militaires américains. Les gigantesques projets d'endiguement financés à grand frais par le gouvernement japonais ont probablement aussi procuré un sentiment de sécurité aux industriels est-asiatiques. Comme le signalait le maire de San Fernando (Pampanga) à la suite des lahars ayant ravagé sa municipalité en 1995, l'important était de redonner confiance aux investisseurs et de montrer que la ville était toujours viable économiquement. A ce titre, même si le sentiment de sécurité n'était pas toujours justifié, les digues ont indéniablement joué un rôle « psychologique ». Notamment à San Fernando qui jouit aujourd'hui d'une santé économique remarquable. Une réforme fiscale en profondeur a permis d'éponger la dette municipale tout en investissant dans des mesures de prévention et de relance économique. Le gouvernement municipal a, en cela, été appuyé par les dynamiques associations d'industriels locaux. Dans le domaine agricole, de nombreuses exploitations rizicoles et sucrières ont directement souffert de l'éruption et des lahars du Mont Pinatubo. A court terme, les lahars ont stérilisé ces surfaces. Mais ces difficultés ont déjà eu un impact bénéfique à long terme car les exploitants agricoles ont souvent délaissé les productions traditionnelles (paddy, canne à sucre) au profit de nouvelles cultures plus diversifiées et à haut rendement (légumes, tubercules). Mais les populations ont beaucoup plus souffert des conséquences de l'éruption du Mont Pinatubo. Les victimes les plus fortunées, bien installées dans la pyramide socio-économique aux pratiques rentières et clientélistes, ont largement profité des sommes colossales engagées dans les projets de prévention et de réhabilitation. En revanche, les victimes des lahars les plus pauvres, privées de ressources depuis l'éruption, se sont encore appauvries à l'intérieur des centres de relogement.

2.1.5. Bilan synthétique de nos retours d'expérience

Les **tableaux 2.4** et **2.5** suivants proposent une synthèse des différents retours d'expérience menés dans le cadre de nos recherches. Le premier présente les modalités pratiques de ces analyses, selon différents objectifs et selon les deux grandes approches principales évoquées précédemment : approche sociale et approche technique. Deux approches qui mettent en œuvre des méthodes et des outils distincts mais qui ont parfois été menées de front sur certains évènements. Le second tableau mentionne les principaux résultats acquis pour huit cas étudiés. Les enseignements sont classés par nature d'éléments vulnérables (infrastructures, personnes, systèmes et fonctions) dans un souci d'analyse et de hiérarchisation des principaux facteurs qui ont pu favoriser ou bien aggraver leur vulnérabilité, et aussi d'aide au diagnostic de risque sur d'autres cas où la catastrophe est pressentie. On peut ainsi voir que nos recherches se sont nourries d'un grand nombre d'expériences de terrain post-catastrophe, pour une grande diversité de phénomènes en cause, sur de multiples enjeux, aux différentes formes de vulnérabilité, et sur des territoires très variés. L'analyse de ces catastrophes, ou simples crises, souvent conduite au contact de chercheurs d'autres spécialités, a permis de montrer tout l'intérêt du rôle du géographe pour mener à bien des expertises transversales.

Tableau 2.4. Les différentes approches d'évaluation des vulnérabilités menées au cours de nos recherches dans le cadre de retours d'expérience (REX).

	Approche socio-géographique sur les facteurs de vulnérabilité (réponse à l'endommagement)			Approche combinée (socio-géographique et technique) (réponse et caractérisation de l'endommagement)		Approche technique (ou experte) par constats d'endommagement (caractérisation de l'endommagement)		
	Cyclone Lenny (Petites Antilles)	**Eruption et lahars du Pinatubo (Luzon, Philippines)**	**Séisme de Martinique (DFA)**	**Séisme d'Al Hoceima (Rif, Maroc)**	**Tsunami à Banda Aceh (Sumatra, Indonésie)**	**Glissement de terrain de la Josefina (Azuay, Equateur)**	**Mouvements de terrain en Martinique (DFA)**	**Mouvements de terrain dans le Diois (Pré-Alpes, France)**
Caractéristiques du phénomène	- Cyclone tropical à trajectoire atypique (O-E) caractérisé par une forte houle et des précipitations sur les Petites Antilles du Centre et du Nord (16 au 20 novembre 1999) - Classe IV le 18 novembre 1999. 866 mm en 48 h à Saint-Martin les 17 et 18 novembre	- Eruption ultraplienne survenue le 15 juin 1999 avec des coulées pyroclastiques et un panache de 12 Km de haut (5 à 7 km^3) - Epanchement de lahars sur 10 bassins versants jusqu'en 2002	Séisme superficiel de magnitude 5.5 et d'intensité V MSK (VI localement) ressenti jusqu'en Guadeloupe	Séisme superficiel de magnitude 6.3 survenu le 24 février 2004 à proximité d'Al Hoceima. Peu de phénomènes induits.	Tsunami déclenché par un séisme de magnitude 9.3 le 26 décembre 2004 à 250 Km à l'Ouest des côtes Nord de Sumatra. Au moins 2 trains de vagues (1 à 20 m) submergent Banda Aceh jusqu'à 5 Km dans les terres	Glissement de terrain rotationnel de 28 millions de m^3 survenue le 31 mars 1993. Il est suivi de la formation d'un lac de retenue de 200 millions de m^3 qui se vidange brutalement en 6 heures un mois après en formant une onde de submersion avec un débit de pointe compris entre 9000 et 14 000 m^3/s	300 évènements dommageables imputables à des mouvements de terrain survenus entre 1900 et 1993 sur le territoire de la Martinique	- Une centaine de mouvements de terrain survenus les 6 et 7 janvier 1994 sur 30 communes du Diois (Drôme) - Intensités des précipitations variant entre 168 et 204 mm en 36 heures
Principales conséquences	- Nombreuses destructions sur le littoral - 9 morts, 1500 familles sinistrées - 116 millions d'euros de dégâts sur l'archipel de la Guadeloupe	- 1200 morts - 250 000 personnes déplacées plus d'une semaine - 2.1 millions de sinistrés - 43 000 familles relogées dans 23 centres - Entre 600 millions et 1 milliard de dollars de dégâts sur 10 ans	Très légers dommages aux infrastructures mais secousses ressenties par l'ensemble de la population martiniquaise	- 628 morts et 929 blessés - 15 320 sans-abri - 2539 logements détruits - 88,2 % des victimes en zones rurales	- 1/3 de l'agglomération détruite - Au moins 70 000 morts	- 71 morts dus au glissement - 14 000 personnes évacuées préventivement - 1500 habitations détruites - 20 Km de routes entièrement détruits par l'onde de submersion - 147 millions de dollars de destructions (1.5 % du PNB du pays) - Un barrage hydroélectrique menacé (70 % de la production nationale)	- De nombreuses destructions et interruptions de réseaux - 53 victimes recensées entre 1915 et 1998	- 30 communes sinistrées sur 51 (Diois) - 4,5 MF de pertes directes hors réseaux - 7,4 MF de reconstruction des réseaux et 58,6 MF de pertes indirectes liées à l'interruption de réseaux (déviations, moyens de substitution, aménagements secondaires)
Objets d'études (types de vulnérabilité)	- Populations sinistrées - Systèmes de réponse pré, syn. et post crise (institutionnel et social)	- Systèmes de réponse ante, syn. et post crise (surveillance, alerte, évacuation, relogement, protection) (institutionnel et social) - Population Aeta	Population (224 personnes) se trouvant dans un bâtiment au moment des secousses, principalement au sein des administrations (50%)	- Bâtiments et infrastructures - Système de réponse post-crise (secours, évacuation, reconstruction) - Population	- Bâtiments - Population - Milieu naturel littoral - Système de réponse (reconstruction, relogement)	- Bâti et réseaux - Système de gestion de crise	- Biens et personnes	- Biens divers - Réseau routier - Population de la commune de Boulc
Territoire étudié	Martinique (pour F. Leone), archipel de la Guadeloupe, Sint-Maarten, Anguilla, Saint-Kitts	Région du volcan Pinatubo	Martinique, essentiellement dans la région de Fort-de-France	- Région d'Al Hoceima, rayon de 20 km	- Partie nord-ouest de la ville de Banda Aceh en particulier et côtes NO des côtes de Sumatra en général (de Banda Aceh à Calang)	- Vallée du rio Paute, province d'Azuay, 20 Km à l'Est de Cuenca	- Territoire de la Martinique	- 51 communes de la région du Diois (cantons de Die, Châtillon-en-Diois, Luc-en-Diois, La-Motte-Chalancon)
Période analysée	Du 16 novembre 1999 à mai 2002 (dernières enquêtes)	D'avril 1991 à 2001 (en collaboration avec J.C. Gaillard)	Du 9 au 20 juin 1999 (enquêtes en collaboration avec J. Mavoungo)	- Février à mars 2004	Décembre 2004 à janvier 2006	Mars 1993 à octobre 1993	Recensement mené entre 1992 et 1993 (T. Lesales) et exploité en 1997	Analyse menée entre janvier et septembre 1994
Objectifs du REX	- Améliorer l'alerte cyclonique - Evaluer les représentations du cyclone par les populations et le niveau de connaissance des consignes - Développer une méthodologie de retour d'expérience pluridisciplinaire, transposable et exploitable par les services opérationnels (REX interactive et systémque) - Favoriser un réseau d'acteurs régionaux pour la prévention et la gestion du risque cyclonique	- Dresser un bilan des conséquences sur les 5 premières années de crise (Eruption et lahars) - Identifier les principaux facteurs (directs et indirects) de blocage et de réussite du système de réponse institutionnel face à l'éruption et aux lahars - Evaluer les conséquences positives et négatives sur le long terme (10 ans) (résilience) - Analyse de la résilience de la communauté minoritaire aeta	- Apprécier plusieurs aspects du vécu de l'évènement : perception, reconnaissance et connaissance du phénomène et de ses causes, qualité des comportements au moment et juste après les secousses, canaux d'information sollicités - Analyser les différences de comportement suivant l'expérience - Mesurer l'intensité du phénomène sur l'échelle MSK	- Localiser les ruptures de surface et les effets de ite éventuels - Dresser un bilan spatialisé des pertes matérielles et humaines - Comprendre les facteurs directs et indirects de fragilité du bâti (structurels et culturels) - Analyser les points de faiblesse de la gestion de la crise à J+1 mois - Analyser la réponse des médias - Analyser l'état de la prévention avant le séisme (surveillance, normes de construction, organisation, information) - Analyser les attentes locales en matière de prévention à J+1 mois - Formuler des recommandations pour réduire la vulnérabilité en cas de nouveau séisme	- Reconstitution du phénomène (magnitude, chronologie, dynamique, extension spatiale, impacts géomorphologiques) (Lavigne et al.) - Modélisation numérique dynamique et géostatistique du phénomène (CEA, Grancher et al.) - Analyser les différents processus d'endommagement - Localisation de la zone de déferlement dans les terres à partir d'une analyse spatiale des dommages au bâti - Construire des courbes d'endommagement du bâti - Analyse du processus de reconstruction jusqu'à J+1 an (avec F. Vinet) (acteurs, logiques, contextes) - Vécu et comportement des populations - Restitution des enseignements au grand public (ouvrages) - Actions d'information préventive	- Quantification du volume glissé - Caractérisation spatiale des processus d'endommagement et de leurs enchaînements spatio-temporels - Caractérisation qualitative et spatiale des modes et niveaux d'endommagement de différents types d'éléments exposés - Analyse de la gestion de crise	- Dresser un bilan par commune des témoignages de dommages sur la période 1900-1993 - Quantifier le nombre de victimes imputables à des mouvements de terrain - Quantifier le coût moyen annuel des mouvements de terrain en Martinique sur 50 ans	- Dresser un bilan économique des pertes économiques directes et indirectes à l'échelle d'une région - Calculer le coût moyen de différents modes d'endommagement du réseau routier (coûts de réparation ou de remplacement) - Modéliser le dysfonctionnement du système routier (durée d'interruption, valeur fonctionnelle) - Estimer les préjudices indirects occasionnés par l'enclavement de la commune de Boulc (sur Boulc et Chatillon-en-Diois)
Méthodes employées	- Enquêtes auprès des populations sinistrées (224 entretiens sur la Guadeloupe, la Martinique et Saint-Martin) - Entretiens auprès des institutionnels - Analyse d'archives - Séminaire d'échange acteurs/chercheurs et de restitution des résultats (65 acteurs)	- Entretiens - Enquêtes documentaires (rapports, presse) - Bilans de dommages	- Enquête auprès de la population (224 entretiens)	- Entretiens avec population et acteurs officiels - Visites et diagnostics de terrain - Enquête post-sismique (avortée) - Analyse carto-statistique des pertes - Revue de presse	- Entretiens avec la population et acteurs divers - Enquêtes - Levés de terrain (hauteurs d'eau, sédiments, salinisation) - Typologies du bâti et des dommages - Constats d'endommagement du bâti (Leone) - Interpolation spatiale (Leone) - Traitements statistiques des dommages (Leone)	- Analyse documentaire - Entretiens - Reconnaissances de terrain - Photo-interprétation	- Recherche documentaire - Calcul des fréquences d'apparition - Cartographie statistique	- Recherche documentaire - Reconnaissances de terrain et aériennes par hélicoptère - Cartographie statistique - Enquête auprès de la population
Outils particuliers d'analyse	- Questionnaires d'enquête auprès des populations des différents territoires (français et anglais) - Logiciel de traitement d'enquête (Sphinx)		- Questionnaire d'enquête post-sismique auprès des personnes se trouvant dans un bâtiment au moment des secousses - Logiciel de traitement d'enquête (Sphinx)	- Questionnaire d'enquête post-sismique auprès des enseignants du collège d'Imzouren (vécu, représentations, attentes)	- Images satellitaires et aériennes d'avant et après la catastrophe - Vidéos - logiciels de SIG (BD) et d'interpolation - Codes de simulation dynamique (CEA) - GPS, Géoradar, Télémètre laser	- Photo-aériennes avant et après la catastrophe - Modélisation numérique de terrain sous SIG	Logiciel de carto-stat.	- Logiciel de carto-stat. - Hélicoptère
Références de l'auteur	Sarant et al., 2003 De Vanssay et al., 2004	Leone, 1996 ; Leone & Gaillard, 1999 ; Gaillard et al., 1998 ; Gaillard & Leone, 2000	Leone & Mavoungo, 2000	Cornet et al., 2004	Leone et al., 2006 Vinet et al., 2006	Leone, 1996 Leone & Velasquez, 1997 et 2002	Leone & Lesales, 1999	Leone, 1996

Tableau 2.5. Principaux enseignements des retours d'expériences menés dans le cadre de nos recherches. Contribution aux diagnostics de vulnérabilité physique, humaine et fonctionnelle.

	Approche socio-géographique sur les facteurs de vulnérabilité (réponse à l'endommagement)			Approche combinée (socio-géographique et technique) (réponse et caractérisation de l'endommagement)		Approche technique (ou experte) par constats d'endommagement (caractérisation de l'endommagement)		
Eléments vulnérables ▼	**Cyclone Lenny (Petites Antilles)**	**Eruption et lahars du Pinatubo (Luzon, Philippines)**	**Séisme de Martinique (DFA)**	**Séisme d'Al Hoceima (Rif, Maroc)**	**Tsunami à Banda Aceh (Sumatra, Indonésie)**	**Glissement de terrain de la Josefina (Azuay, Equateur)**	**Mouvements de terrain en Martinique (DFA)**	**Mouvements de terrain dans le Diois (Pré-Alpes, France)**
Infrastructures diverses		Coût direct de l'éruption et des lahars estimé entre 600 millions et un milliard de dollars US 10 ans après	Intensité des dommages : - Caractérisation des principaux effets sur les infrastructures (majorité de balancement d'objets) - Déduction d'une intensité V, Localement VI sur l'échelle MSK	Bâti fragilisé en zone urbaine : - Armatures en acier doux et lisse - Espacement des armatures transversales trop important - Fermeture des armatures sans crochet - Béton de mauvaise composition - Rez de chaussée ouverts sans cloisonnement (absence de contreventement) - Murs du dernier niveau sans terrasse et planchers ourdis - Poutres de raideur plus importante ou équivalente à celle des poteaux (une rupture du poteau) - Faux aplombs au droit des façades - Joints entre bâtiments de largeur insuffisante - Armatures transversales insuffisamment resserrées dans les zones critiques (nœud poteau/poutre, zones voisines des liaisons poteau/poutre) Bâti vulnérable en zone rurale : - Bâti en pisé et murs en pierres - Solivage et toitures en roseaux surchargées par des plastiques et une dalle de béton armé ou une couche d'argile (ajout de masse) - Pas de liaisons entre les murs - Pas de liaisons avec le pignon	Déferlement (phénomène) : - Mise en évidence d'une diversité des processus d'endommagement en lien avec la dynamique de la vague principale (avant, au niveau et après la zone de déferlement) - Importance de la zone de déferlement en tant que discontinuité majeure dans le gradient d'endommagement - Cartographie d'une zone de déferlement lobée à 2,6 km dans les terres à partir de l'analyse spatiale fine des dommages sur 6200 bâtiments Dommages : - Elaboration d'une échelle d'intensité « macro-tsunami » basée sur des typologies des dommages et du bâti - Mise au point d'un protocole de diagnostic pathologique du bâti - Mise au point d'une méthode de spatialisation des dommages au bâti - Elaboration de courbes d'endommagement (Dommage moyen et pourcentage de destructions totales) en fonction de la hauteur de vague - Elaboration d'une fonction de pertes humaines (corrélation entre le % de morts et le % de destruction totale)	- Distinction et cartographie des différents processus physiques responsables de cette catastrophe - Elaboration d'échelles d'endommagement pour différents éléments du territoire - Elaboration d'une matrice d'endommagement pour différents types d'éléments exposés - Description des différents effets induits par les dommages aux infrastructures (dysfonctionnements)	Mise au point d'une méthode d'estimation probabiliste de l'impact économique global moyen annuel des mouvements de terrain en Martinique : compris entre 0,76 et 1,4 millions de d'euros	Estimation des impacts financiers par analyses micro et macro économiques : - 4,5 MF de pertes directes hors réseaux - 7,4 MF de reconstruction des réseaux et 58,6 MF de pertes indirectes liées à l'interruption de réseaux (déviations, moyens de substitution, aménagements secondaires) - Cartographie statistique des coûts des dommages au réseau routier par commune Analyse des dommages : - Localisation d'une centaine de points d'endommagement (bâti et réseaux) - Cartographie des critères de dysfonctionnement du réseau routier (dommages physiques, durée d'interruption, accessibilité, trafic routier) - Elaboration d'une matrice de correspondance entre dommages physiques et perturbations fonctionnelles du réseau routier
Personnes	Représentations : - Représentation classique du cyclone à partir des vents et de la pluie révélée inadaptée aux effets périphériques du cyclone Lenny : la houle vécue est reliée au cyclone que pour un 1/3 des PSE - Une bonne connaissance théorique des consignes et des comportements de prévention - Importance du maire en tant que référent dans la prévention du risque cyclonique - Perception d'une saison cyclonique très proche que ce qui est donné par la réalité historique (juillet à novembre)	Minorité ethnique Aeta : Grande capacité d'adaptation sur les flancs du Pinatubo, motivée par la recherche de nouveaux espaces cultivables et un fort attachement au milieu naturel	- Très bonne reconnaissance du phénomène (secousses) en particulier chez les personnes ayant déjà vécu un séisme dans le passé - Majorité de comportements inadaptés au moment et juste après les secousses, en particulier dans les enceintes publiques - Besoin de rechercher de l'information sur l'évènement en particulier via la radio et la télévision - Information jugée globalement satisfaisante - Assez bonne connaissance du phénomène (magnitude, localisation, possibilité de répliques) - Sentiment d'insécurité partagé	- Difficultés d'accès aux zones sinistrées - Manque de préparation (protection et secours)	Aspect très sélectif du tsunami en terme de pertes humaines : essentiel des femmes et des enfants tués. Les survivants sont des hommes résistants et sachant nager			Analyse des préjudices psychologiques liés à l'enclavement de la commune de Boulc
Systèmes, fonctions, activités, organisations (système de prévention, de gestion de crise et post-crise, système territorial)	Alerte : - Les messages de vigilance n'ont pas suffit à éveiller les réflexes de protection - Importance des radios locales pour la dissémination de l'information - Impossibilité d'adopter des procédures d'alerte du fait d'une incompatibilité entre les signaux observés (houle) et ceux prévus (vent et pluie) Reconstruction : - Besoin de disposer de procédures d'urgence pour faciliter la reconstruction	Alerte : - Très bonne gestion de l'alerte volcanique et de l'évacuation préventive - Qualité de l'information préventive (préparation) - Mauvaises conditions de vie dans les centres d'évacuation Reconstruction : - Approche trop technocratique de la reconstruction axée principalement sur la protection (digue) et le relogement en dehors des zones de danger (lahars) - Des solutions inadaptées et mal réparties entres les différentes communautés - Problèmes de coordination et de communication entre les différentes agences gouvernementales - Des manques de moyen et de formation des acteurs de la gestion - Faits de corruption dans l'attribution des marchés de construction des digues de protection - Aggravation des conflits territoriaux entre les aetas et le reste de la population Relogement : - Des décisions unilatérales ne prenant pas en compte l'attente des sinistrés - Manque de soutien social et d'emploi dans les centres de relogement - Fuite des populations et retour dans les zones de lahars Economie : - Bilan économique positif 10 ans après la catastrophe à la faveur d'importants investissements et équipements (hausse du PRB de 23% entre 1990 et 1999)		Carences dans la chaîne de construction : - peu de professionnels - auto-construction et travail au noir - poids des traditions - méconnaissance des règles de construction parasismique - des normes parasismiques officielles pas encore diffusées Système de prévention : - Absence d'information préventive - Peu de planification territoriale Système de réponse : - Lenteur dans l'acheminement des secours et des vivres - Pas de diagnostic pathologique du bâti - Pas d'affichage de consignes de réoccupation des bâtiments - Pas de contrôle des réinstallations - Pas suffisamment de surveillance des biens et des personnes - Sous-équipement des zones de relogement provisoire (tentes) - Contexte politique très tendu et crainte des réactions dans une région isolée à l'égard du pouvoir central (fortes critiques)	Reconstruction : - Importance des structures locales comme élément de dynamique de la reconstruction : polarisation de la reconstruction autour de noyaux villageois qui montre que la dynamique interne des communautés prime sur les superstructures spatiales - Reconstruction se fait à l'identique sur les anciennes structures villageoises - Reconstruction basée sur des normes architecturales étrangères et avec des matériaux de mauvaise qualité	Gestion de crise : - Reconstitution des moments critiques de la crise Système territorial : - Analyse des problèmes d'accessibilité de la zone et de leurs répercussions fonctionnelles (échanges commerciaux notamment)		Système territorial : Analyse des préjudices socio-économiques liés à l'enclavement de la commune de Boulc (sur Boulc et sur Châtillon-en-Diois)
Références de l'auteur	Sarant et al., 2003 De Vanssay et al., 2004	Leone, 1996 ; Leone & Gaillard, 1999 ; Gaillard et al., 1998 ; Gaillard & Leone, 2000	Leone & Mavoungo, 2000	Cornet et al., 2004	Leone et al., 2006 Vinet et al., 2006	Leone, 1996 Leone & Velasquez, 1997 et 2002	Leone & Lesales, 1999	Leone, 1996

2.2. Le diagnostic de vulnérabilité : analyses de cas

2.2.1. Le système vulnérable et ses facteurs

On entend par diagnostic une analyse de l'état de vulnérabilité d'éléments (territoire, bien, personne, groupe d'individu, système, …) potentiellement exposés aux effets dommageables d'un phénomène pressenti ou déclaré. Cette approche *a priori* de la vulnérabilité s'inscrit bien dans une démarche d'évaluation du risque de catastrophe dans un but d'anticipation des effets de cette dernière et donc de prévention. Le diagnostic peut s'avérer être une démarche très complexe, qui tout comme le retour d'expérience (évaluation *a posteriori*), passe par l'analyse d'un certain nombre de facteurs de vulnérabilité que l'on s'efforce généralement de qualifier ou de quantifier par des critères d'évaluation et des indicateurs de vulnérabilité. Compte tenu de la diversité des éléments vulnérables, des échelles d'analyse, des facteurs étudiés, des approches menées, et des disciplines mobilisées, nous avons vu en première partie de ce mémoire tout la difficulté d'avoir une vision synthétique et globale de l'état des pratiques en matière de diagnostic de vulnérabilité, notamment territoriale et humaine face aux menaces naturelles.

Pour de nombreux auteurs, issus de la sociologie des désastres ou de la géographie des risques, et dont nous partageons les thèses, la vulnérabilité apparaît comme un système complexe, articulé autour d'une multitude de variables (techniques, sociales, économiques, institutionnelles, politico-administratives, environnementales, psychosociales, culturelles, etc.), en interactions les unes les autres, dans le temps et l'espace (Watts & Bolhe, 1993 ; D'Ercole, 1994 et 1996a ; Thouret & D'Ercole, 1996 ; Adger & Kelly, 1999 ; Tobin, 1999 ; Wisner, 1993 et 2004 ; Wisner et al., 2004 ; Turner et al., 2003 ; Birkmann, 2006 ; Birkmann & Wisner, 2006 ; Reghezza, 2006 ; Kuhlicke, 2007 ; Gaillard, 2007).

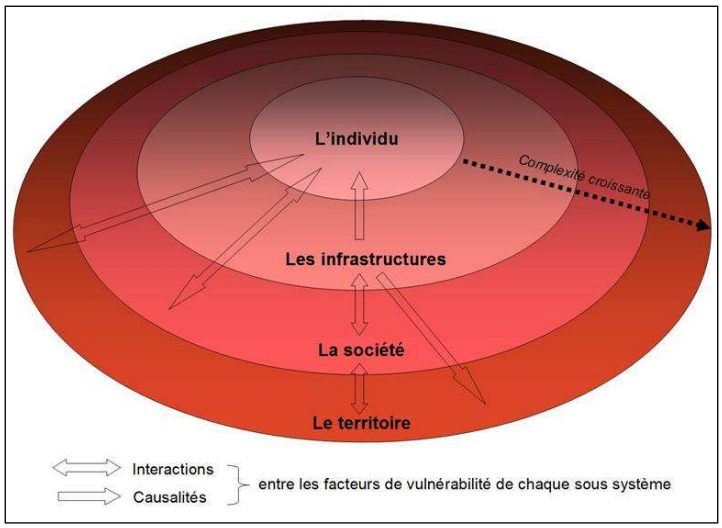


Figure 2.6. Modèle conceptuel du système vulnérable

Nous proposons **figure 2.6.**, un modèle conceptuel et systémique à quatre niveaux d'imbrication de ces facteurs de vulnérabilité. On y place l'homme au coeur du processus d'évaluation, en tant qu'enjeu suprême à préserver. Sa vulnérabilité individuelle (humaine) est dépendante du milieu construit (les infrastructures) dans lequel il se trouve (vulnérabilité structurelle), de facteurs intrinsèques (psychosociologiques et physiologiques) et de facteurs socio-économiques et organisationnels. L'un et l'autre (l'homme et le milieu construit) appartiennent respectivement à des systèmes organisés, social et territorial, dont la

vulnérabilité fonctionnelle est largement dépendante des vulnérabilités humaines et structurelles et d'une multitude d'autres variables (géographiques, démographiques, institutionnelles). Ce système vulnérable à quatre niveaux d'enjeux imbriqués et de complexité croissante (la personne, les infrastructures, la société et le territoire), repose donc sur une multitude de facteurs qui interagissent et qui peuvent être analysés au moyen de divers critères. Nous avons identifié dans le **tableau 2.6.** un certain nombre de ces critères de vulnérabilité.

L'identification de ces facteurs est donc une étape essentielle du diagnostic de vulnérabilité, technique, humaine ou territoriale. Ceux-ci peuvent être simplement décrits, commentés, ou faire également l'objet d'une évaluation pseudo-quantitative au moyen de critères et d'indicateurs disponibles ou à créer suivant la nature des éléments vulnérables et surtout les échelles spatiales du diagnostic. La définition de ces critères et indicateurs revêt un certain intérêt du moment où l'on souhaite comparer des situations et en mesurer l'évolution dans le temps et l'espace. Leur mise en carte, nous apparaît être un des apports essentiels de la géographie des risques, comparée aux approches sociologiques, et un champ de recherche appliquée à part entière pour les géographes. Certains travaux ont déjà vu le jour au sein de la communauté française. Ils contribuent à l'évaluation spatialisée du risque en replaçant les enjeux et leur vulnérabilité au cœur du processus de gestion du risque et permettent de dépasser la vision segmentée et spécialisée du risque critiquée par Pigeon (2005).

On peut citer les indicateurs de vulnérabilités créés sur la France par Barroca (2007) et Pottier (2007), sur Nice par Luttoff (2000) et Provitolo (2002), sur Annecy par D'Ercole et al., (2000), en Martinique par D'Ercole et al. (1993), sur Mulhouse par Beck (2007), sur le métro parisien par Gleyze (2005), sur Paris par Reghezza (2006), pour les infrastructures critiques par Bouchon (2007), pour les petites et moyennes entreprises par Mengual (2005), sur Yvry-la-Bataille dans l'Eure par Masson (2006), sur l'Equateur par D'Ercole & Trujillo (2003), sur le Cotopaxi par (D'Ercole, 1991 et 1996c), sur Quito par D'Ercole & Metzger (2004) et Demoraes (2004), sur Popayan par D'Ercole (1996b) sur Beyrouth par Pico (2006), sur les flancs du Pinatubo par Gaillard et al. (2001), sur le Merapi par Lavigne (1999a), sur les Petites Antilles par Lesales (2005), sur Ibagué en Colombie par Laforge & Thouret (1991), sur Manizales en Colombie par Chardon (1996), pour la Caraïbe, l'Amérique centrale et l'Asie par D'Ercole & Pigeon (1999).

A eux seuls ils reflètent l'intérêt grandissant des géographes français pour l'analyse géographique des vulnérabilités et montrent l'influence du géographe Robert D'Ercole dans l'évaluation du risque naturel en sciences humaines. Ils s'appliquent à des enjeux variés en nature, en taille et en complexité (personnes, entreprises, collèges, bâtiments, réseaux, fonctions urbaines, quartiers, provinces, pays). Ils concernent des aléas divers (inondations, mouvements de terrain, séismes, éruptions volcaniques) et reposent de plus en plus sur des systèmes d'information géographique dédiés à leur construction et à leur diffusion auprès des décideurs. D'autres diagnostics de ce type, français et étrangers, sont présentés en **annexe 5**. Mais ils n'offrent pas tous des applications cartographiques.

Les retours d'expériences menés dans le cadre de nos recherches ont permis de qualifier certains de ces facteurs, parfois de les quantifier, de les hiérarchiser et de les spatialiser au moyen d'enquêtes, d'en comprendre le rôle déterminant dans la genèse d'un évènement dommageable et aux répercussions parfois catastrophiques. La catastrophe nous est apparue ainsi comme un formidable révélateur de ces facteurs et de la complexité de leurs influences réciproques, à l'échelle de l'élément, qu'il soit individu ou bâtiment, comme à l'échelle du système, qu'il soit territorial, social ou organisationnel (*cf.* **tableau 2.5.**).

Tableau 2.6. Les principaux facteurs et critères de vulnérabilité du système vulnérable. Utilité pour les diagnostics.

Sous-systèmes vulnérables	Principaux critères de vulnérabilité	Facteurs déterminants
L'individu	Représentations du risque (menaces, effets, espaces)	Psycho-sociologique
(vulnérabilité intrinsèque)	Comportements potentiels	Psycho-sociologique
	Connaissance des mesures de protection et de prévention	Psycho-sociologique
	Vécu	Psycho-sociologique
	Résistance physique et mentale	Physiologique et psycho-sociologique
	Confiance dans les autorités	Psycho-sociologique
	Implantation géographique et la distance au danger	Géographique
	Accessibilité	Géographique
	Possibilité de fuite	Géographique
	Niveau de protection physique	Structural
Les infrastructures et leurs biens	Résistance physique	Structural
(ex. bâtiments et routes)	Distance au danger	Géographique
(vulnérabilité structurelle ou physique)	Entretien et contrôle	Politico-administratif
La société	Cohésion sociale et solidarité	Socio-culturel
(ex. communauté martiniquaise)	Marginalisation	Socio-économique
	Niveau d'organisation et de préparation	Institutionnel et organisationnel
(vulnérabilité sociale)	Entretien de la mémoire collective	Socio-culturel et institutionnel
	Conscience du risque	Psycho-sociologique
	Niveau de corruption	Socio-économique et institutionnel
	Pauvreté	Socio-économique
	Dépendance économique	Socio-économique
	Ségrégation socio-spatiale	Géographique et socio-économique
	Continuité des actions	Politico-administratif
	Spéculation foncière	Economique
	Accès aux services	Socio-économique
	Niveau d'éducation	Socio-économique
	Poids des traditions	Socio-culturel
	Représentation institutionnelle	Institutionnel
Le territoire	Taille	Géographique
(ex. d'une île)	Isolement géographique (enclavement)	Géographique
	Possibilité d'alternatives (ressources et équipements vitaux)	Géographique et socio-économique
(vulnérabilité territoriale)	Exposition au danger	Géographique
	Niveau de dépendances entre les réseaux vitaux	Géographique et organisationnel
	Croissance urbaine	Socio-économique et géographique
	Mobilité géographique	Socio-économique et géographique
	Coopération régionale	Institutionnel
	Outils de régulation de l'occupation du sol	Institutionnel

A la lumière de ces retours d'expériences, nous avons mené des diagnostics de vulnérabilité humaine et territoriale sur des groupes de population particulièrement exposés et appartenant à deux territoires distincts. Il s'agit pour le premier de l'île de la Martinique, territoire insulaire confronté à de multiples aléas naturels et présentant une grande densité d'enjeux humains et économiques. Notre présence en ces lieux durant cinq années a permis de développer plusieurs diagnostics de vulnérabilité humaine face aux aléas sismiques, volcaniques et cycloniques. Ces analyses ont été réalisées soit à la faveur des retours d'expérience précédemment cités (cyclone Lenny et séisme de juin 1999), soit à l'occasion de diagnostics de préparation aux situations de crise volcanique (population proche de la montagne Pelée) et sismique (public scolaire). En parallèle de ces analyses à caractère psycho-social, la Martinique a fait l'objet de plusieurs applications et expérimentations cartographiques visant à mieux caractériser le risque et la vulnérabilité du territoire. La Martinique apparaît ainsi comme un véritable laboratoire d'évaluation des risques et d'expérimentations de plusieurs protocoles méthodologiques que nous avons commencé à exporter sur d'autres terrains d'étude (Guadeloupe, Réunion, Vésuve, Maroc, Philippines, etc.).

L'autre terrain se situe aux Philippines, plus précisément dans le bassin versant de la rivière Pasig Potrero exposée au moment de notre analyse au risque de lahars descendant des flancs du volcan Pinatubo (Luzon). Nous y avons mené un diagnostic de vulnérabilité humaine face aux lahars basé sur l'identification de plusieurs facteurs et donnant lieu à une cartographie intégrée à l'échelle du quartier (Gaillard, D'Ercole et Leone, 1998 et 2001).

Ces différents diagnostics ont nécessité au préalable une analyse fine des conditions d'aléas et des contextes historiques des crises passées : éruptions de la montagne Pelée, séismes et cyclones historiques en Martinique, éruption du volcan Pinatubo en 1991 et gestion des crises associées (Leone, 1996b). Les interprétations des résultats obtenus au cours de ces travaux ont nécessité une bonne connaissance des territoires, du vécu historique et des conditions socio-économiques et culturelles des populations témoins. Nous présentons dans les paragraphes suivants les principaux résultats obtenus sur le cas philippin et nous développons ensuite une synthèse des travaux conduits en Martinique, basés sur cinq années de présence sur cette île (1996-2001). Ces derniers prennent la forme d'un diagnostic intégré de vulnérabilité humaine et territoriale qui trouvera des prolongements cartographiques en quatrième partie du mémoire et qui contribue d'une manière générale à mieux cerner la géographie des risques naturels de ce petit territoire insulaire.

2.2.2. Vulnérabilité des populations exposées aux lahars: le cas du Pinatubo (Philippines)

De 1991 à 1998, les flancs du Pinatubo ont connu de terribles lahars consécutifs à l'éruption de juin 1991 et à l'origine d'au moins 250 morts (Leone & Gaillard, 1999). Devant la récurrence du phénomène et le retour progressif des premières familles évacuées en zones de danger, il est apparu utile et opportun de mener sur un des chenaux les plus actifs en 1997, un diagnostic intégré des principaux facteurs pouvant accroître la vulnérabilité des populations en cas de nouveaux lahars. L'analyse a porté en particulier sur la qualité des comportements potentiels en cas d'évacuation, le respect potentiel des consignes d'évacuation et la perception du danger.

Pour cela, une enquête a été menée auprès de 220 personnes (une interview pour 300 votants) proportionnellement réparties sur six quartiers qui ont été définis en fonction de leur disposition par rapport au système d'endiguement contre les lahars et de leurs caractéristiques socio-économiques. Ce travail, largement inspiré des travaux menés par R. D'Ercole sur les flancs du volcan Cotopaxi en Equateur (D'Ercole, 1991 et 1996c), a donné lieu à plusieurs synthèses cartographiques.

Tout en soulignant certaines disparités spatiales, l'analyse des attitudes potentielles a notamment démontré que 36% de la population interrogée adopteraient un comportement dangereux en cas d'évacuation avec le franchissement des cours d'eau (**figure 2.8.**). Par ailleurs, le croisement qualitatif des principaux facteurs de vulnérabilité analysés, a permis de déboucher sur une cartographie synthétique de la vulnérabilité humaine par quartier. Ce document a été conçu comme un outil d'aide à la décision permettant d'orienter des mesures de prévention, notamment l'information préventive, vers les secteurs les plus vulnérables (**figure 2.7.**). Parmi les variables explicatives qui semblaient avoir le plus influencé ces différents facteurs de vulnérabilité, l'expérience des individus en matière d'évacuations passées a été la plus déterminante. En effet, il est clairement apparu à travers cette étude, que les individus ayant vécu le plus d'évacuations dans le passé étaient ceux qui possédaient la meilleure perception du risque et les comportements potentiels face aux lahars et aux ordres d'évacuation les plus efficaces.

Par conséquent et à l'issue de ce diagnostic spatialisé développé dans deux articles (Gaillard et al., 1998 et 2001), il est apparu primordial de porter la plus grande attention aux secteurs de North Porac et de North San Fernando qui n'avaient pas encore été éprouvés dans de vastes proportions par des lahars en 1997. Dans ce but, il aurait été intéressant d'enrichir et comparer nos résultats avec ceux obtenus sur d'autres secteurs où l'aléa était de nature et d'intensité différente, et d'étendre le diagnostic à d'autres bassins-versants drainant les flancs du Pinatubo. A ce titre, le même type d'étude, mais à l'échelle du village aurait contitué un progrès significatif. C'est en effet à cette échelle que l'action préventive semblait être la plus efficace, mais depuis 1998 les lahars ont cessé de se manifester…

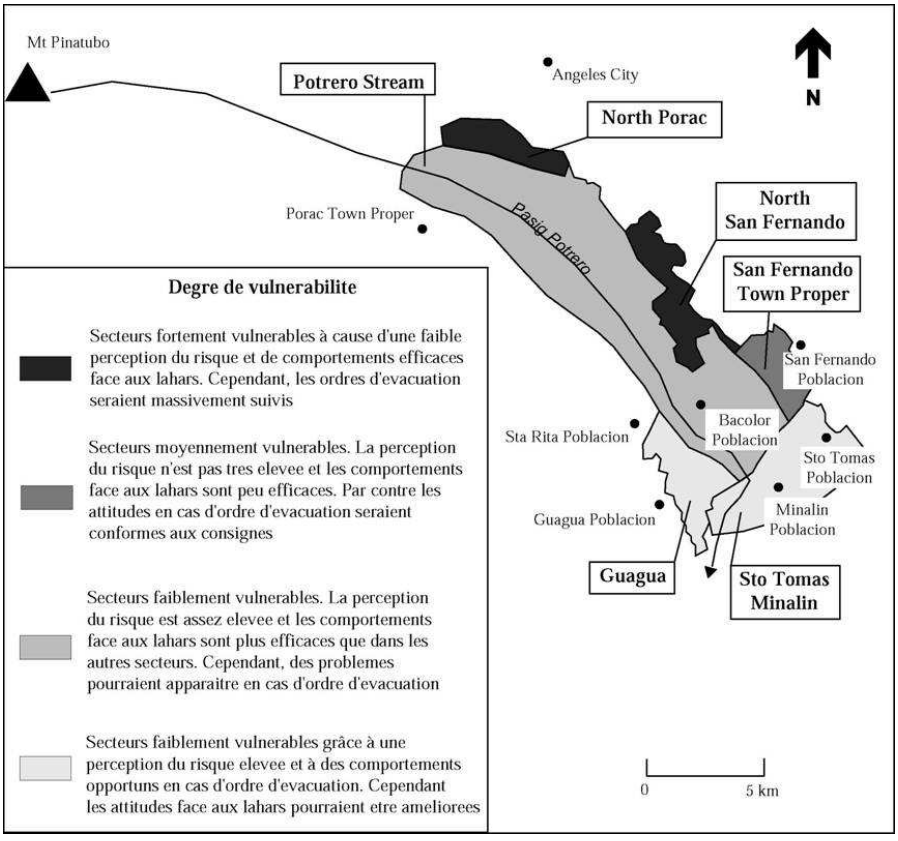


Figure 2.7. Carte de vulnérabilité humaine synthétique face aux lahars intégrant différents facteurs de représentation du risque. Secteur de la rivière Pasig-Potrero, Pinatubo, Philippines (Gaillard, D'Ercole et Leone, 1998).

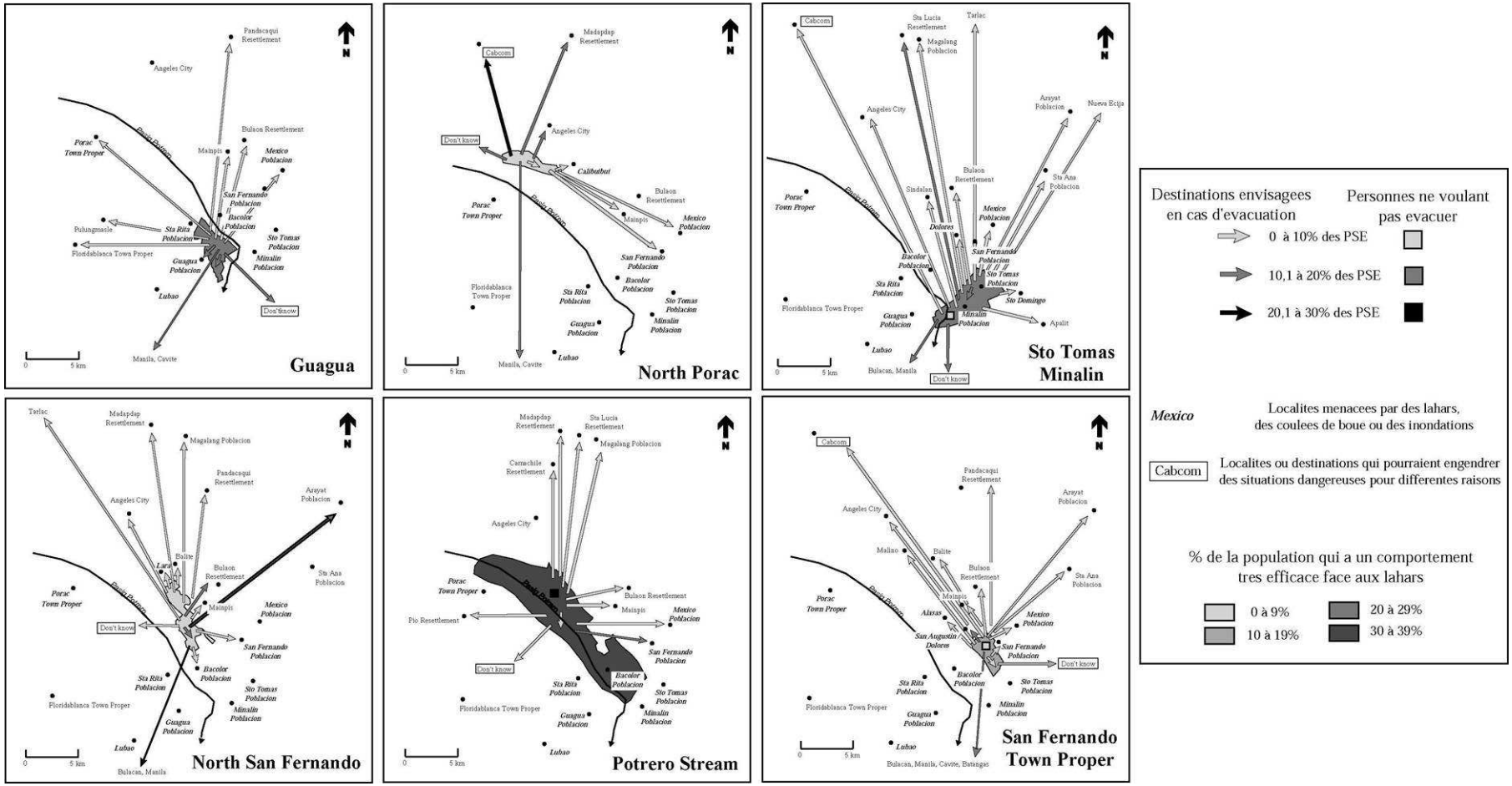


Figure 2.8. Qualité des comportements potentiels face aux lahars dans la bassin de la rivière Pasig-Potrero (Pinatubo, Philippines) (Gaillard, D'Ercole et Leone, 1998)

2.2.3. Diagnostic de vulnérabilité humaine et territoriale : le cas de la Martinique

Considérations méthodologiques

Ce diagnostic prend ici la forme d'une synthèse. Il repose sur plusieurs travaux antérieurs, pas toujours publiés, et intégrants plusieurs aspects :

– *des recherches historiques* sur les évènements dommageables passés ;

– *un diagnostic territorial* du risque basé sur l'analyse spatiale des principaux enjeux, des aléas et des principaux facteurs de vulnérabilité du territoire ;

– *des diagnostics de vulnérabilité humaine* de différentes communautés exposées : population littorale pour le risque cyclonique, population proche de la Montagne Pelée pour le risque volcanique, personnes se trouvant dans des établissements scolaires et administratifs pour le risque sismique.

L'objectif de cette analyse de cas, est triple :

– *montrer différentes pratiques du diagnostic de vulnérabilité* dans une réflexion avant tout géographique en prenant pour exemple un territoire très exposé et bien documenté ;

– *éclairer certaines composantes de la vulnérabilité* humaine et territoriale de ce petit espace insulaire et par là même nuancer certaines idées préconçues sur le niveau de culture locale des risques naturels ;

– *proposer quelques pistes de réflexions* pour réduire la vulnérabilité de ce petit espace insulaire sans compromettre son développement durable.

D'un point de vue méthodologique, le **diagnostic territorial** a été conduit principalement selon une approche spatialisée et quantitative assistée par SIG en couplant des données sur les principaux enjeux (personnes, bâti, réseaux) et la cartographie des aléas locaux. Certains prolongements et compléments de cette analyse spatiale fine du territoire à risque seront développés dans la quatrième partie du mémoire consacrée à la mise en carte du risque à travers plusieurs exemples.

Le **diagnostic humain** repose bien entendu sur l'analyse précédente (localisation des enjeux) et sur des campagnes d'enquêtes couplées à des entretiens auprès des populations exposées. Ces diagnostics de vulnérabilité humaine ont porté essentiellement sur les facteurs intrinsèques (ou individuels) d'ordre psycho-sociologique. Pour la Martinique, 10 facteurs principaux ont été retenus pour cerner et comparer les représentations des risques sismiques, cycloniques et volcaniques. Ces facteurs ont été appréhendés au moyen d'une soixantaine de questions clés (les critères) dont les réponses (les indicateurs) ont été codées (couleur et nombre) sur une échelle de vulnérabilité humaine comportant 3 niveaux (fort=3:rouge ; moyen=2:jaune, faible=1:vert).

Suivant les facteurs analysés, les niveaux de vulnérabilité donnés par cette échelle sont définis « à dire d'expert » sur la base de deux critères principaux :

– La proportion de réponses se rapprochant le plus de la réalité scientifique d'un phénomène ou d'une situation (limitation des distorsions entre la réalité et les représentations).

– La proportion de réponses témoignant d'une bonne capacité à gérer et surmonter une crise future.

On obtient ainsi un moyen de mesurer un aspect de la vulnérabilité humaine basé sur des niveaux de représentation collective des risques (NRCR) dont la pondération débouche sur un indice de représentation collective des risques (IRCR). Pour chacun des 10 facteurs psycho-sociologiques analysés, l'IRCR est donné par le rapport entre la somme des NRCR et le nombre de critères retenus pour le mesurer (de questions). Cet indice synthétique, original mais reproductible permet ainsi de quantifier les représentations et d'établir des classements pour différents groupes d'individus et pour différents aléas naturels. Il prend ici une valeur expérimentale et s'inscrit dans notre démarche globale de caractérisation et de quantification de la vulnérabilité humaine au moyen de méthodes nouvelles.

D'une manière générale, ces facteurs psycho-sociologiques viennent éclairer la notion de représentation, appréhendée ici de façon collective, qu'ont les individus d'un contexte environnemental pouvant brutalement se transformer. Les facteurs d'ordre conjoncturel, géographique, social, technique ou institutionnels ont été intégrés dans ces recherches mais en toile de fond. Ils participent indirectement à la vulnérabilité humaine en créant les conditions propices à la crise mais n'ont pas fait l'objet de démarche quantitative, ou pseudo-quantitative, contrairement aux facteurs psycho-sociologiques. Certains de ces facteurs ont toutefois été directement pris en compte dans nos analyses en tant que variables explicatives de certaines formes de différenciations constatées, tout comme l'expérience individuelle, ou bien comme facteurs contraignants ou aggravants la vulnérabilité des populations.

Les résultats de cette analyse des représentations des risques sont fondés sur 3 campagnes d'enquêtes menées en différentes occasions sur le territoire martiniquais entre 1999 et 2002.

La première campagne concernait 224 personnes ayant vécu le séisme du 8 juin 1999. Consacrée en premier lieu à l'analyse des comportements au moment du séisme (retour d'expérience) certaines questions étaient aussi ciblées sur la perception du phénomène, la connaissance des séismes et de leurs causes, la mémoire des séismes historiques, les attentes en matière de prévention, les dispositions prises au domicile pour se protéger contre les séismes, les croyances et les craintes (Leone & Mavoungo, 2000). Le questionnaire a été diffusé dès le lendemain du séisme (du 9 au 20 juin) par différents canaux : téléphone, entretiens directs et dépôt dans des administrations. L'échantillonnage s'est fait de manière aléatoire mais uniquement auprès de personnes se trouvant dans un bâtiment au moment des secousses, de manière à confronter des environnements similaires pour l'analyse comparative des perceptions du phénomène. Par la suite ce questionnaire a été amélioré sous une version plus standardisée, l'objectif étant de pouvoir mener à terme des comparaisons utiles avec d'autres évènements (**annexe 6**). Il a ainsi été diffusé par d'autres chercheurs après les séismes du Salvador (2001), d'Algérie (2003) et de Guadeloupe (2004). Le travail mené en 2005 sur le séisme des Saintes (Guadeloupe) a fait l'objet d'un mémoire de master 1 placé sous notre direction (Ourdouillie, 2005).

La seconde campagne d'enquête s'est déroulée durant les mois qui ont suivi le cyclone Lenny sur les Petites Antilles (novembre 1999). Elle a concerné principalement les populations sinistrées de Guadeloupe (inondations et houle) et de Martinique (houle seulement), soit 220 personnes Les espaces d'investigation ont été rigoureusement sélectionnés en fonction des zones affectées et du type d'impact subi. La priorité a été donnée aux zones les plus touchées, notamment sur le littoral, avec 100 personnes enquêtées en Martinique, 100 en Guadeloupe et 20 à Saint-Martin (rattachées à la Guadeloupe dans le dépouillement) (**figure 2.9.**). Seuls les entretiens de la Martinique ont été supervisés par nos soins, ceux de la Guadeloupe ont été confiés à d'autres membres du projet « Lenny » (Sarant et al, 2003). Le questionnaire mis au point pour le retour d'expérience a aussi été conçu pour intégrer des questions sur la représentation du risque cyclonique par la population, sur la connaissance des moyens de protection et des procédures d'alerte, sur la perception des espaces les plus exposés et des périodes cycloniques (**annexe 7**). Les questionnaires ont été administrés en entretien direct auprès du chef de famille et les questions ouvertes ont été recodées pour les besoins du traitement statistique. La diffusion sur deux départements (Martinique et Guadeloupe) a permis de dégager quelques comparaisons utiles.

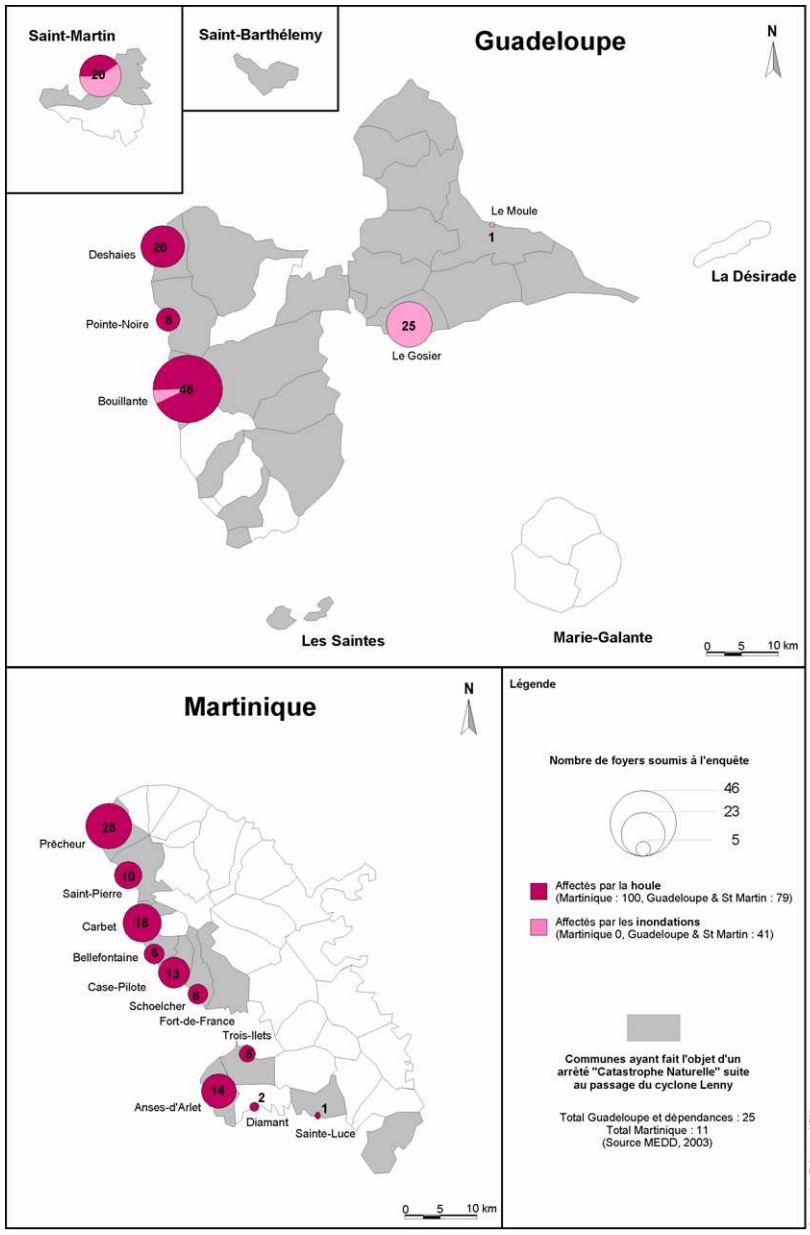


Figure 2.9. Distribution spatiale de l'échantillon retenu pour l'enquête sur le vécu et la représentation du risque cyclonique aux Antilles (cyclone Lenny).

La troisième campagne d'enquête a concerné des populations exposées à une menace volcanique sur les flancs Nord et Nord-Est de la Montagne Pelée. Ce diagnostic a constitué le prolongement d'une d'enquête réalisée en 1993 conjointement par le BRGM et l'Université Antilles-Guyane sur les communes du Nord caraïbe : Morne-Rouge, Saint-Pierre et Prêcheur (D'Ercole & Rançon, 1999). La nouvelle campagne menée en mai 2001 a permis de compléter l'échantillon, en intégrant les communes du Nord atlantique : Ajoupa-Bouillon, Basse-Pointe, Macouba et Grand-Rivière (Leone & Lesales, 2003). Ainsi, la totalité de la zone d'aléa volcanique élevé du massif de la montagne Pelée a été cernée de façon assez homogène. L'enquête s'est réalisée en deux temps, en reprenant les questionnaires élaborés par nos prédécesseurs. D'abord en passant par le collège de Basse-Pointe, en diffusant un questionnaire « élève », puis en adressant par ce biais un questionnaire aux parents. Mais contrairement à la première campagne, ce mode de diffusion n'a pas été satisfaisant et a dû être complété par une approche par entretiens directs sur le terrain. Ce mode opératoire a permis d'exploiter 129 questionnaires contre 186 pour 1993. Les questions ont porté principalement sur la représentation des aléas volcaniques et des espaces exposés à une future éruption, sur la connaissance du déroulement d'une future éruption et de ses conséquences, sur les intentions de comportement en cas d'évacuation. Ce questionnaire a été par la suite reformulé sous une version plus compacte et mieux adaptée à un dépouillement statistique (**annexe 8**). Cette dernière version a servi de support à des diagnostics similaires menés en 2003 sur la soufrière de Guadeloupe (Demazières & Mas, 2003) et en 2006 sur le Vésuve (Satgé, 2006). Ces travaux ont été réalisés par des étudiantes dans le cadre de mémoires de maîtrise et de master 1 placés sous notre direction.

Un territoire exposé et une forte emprise spatiale des aléas naturels

L'île volcanique de la Martinique, à la fois Région et Département français d'Outre Mer (DOM), est un territoire exigu de 1 103 km² situé au centre de l'Arc des Petites Antilles et où vivent 399 000 personnes (RGP INSEE, 2006) (**figure 2.10**). Avec la Guadeloupe, île voisine, nous sommes confrontés aux deux départements français les plus exposés aux menaces d'origine naturelle telles que les séismes, les éruptions volcaniques, les mouvements de terrain, les inondations, les cyclones et leur cortège de phénomènes induits ou associés (**figure 2.13**).

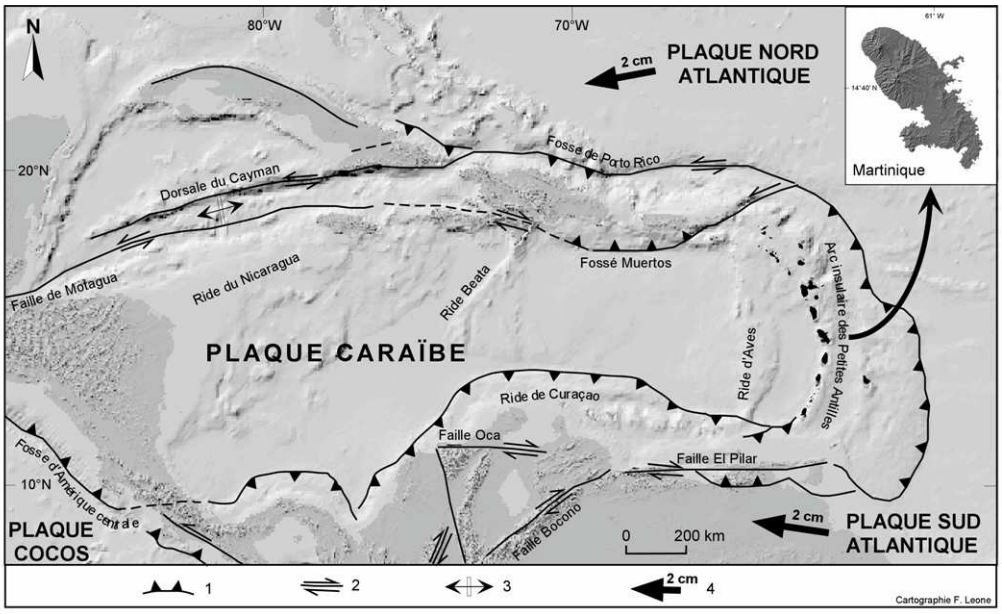


Figure 2.10. L'île de la Martinique dans son contexte géodynamique actif. *1 : failles transformantes ; 2 : zones de subduction ; 3 : dorsales ; 4 : sens et vitesses moyennes annuelles de déplacement des plaques tectoniques* **(modifié d'après Westercamp et Tazieff, 1980, *in* Leone, 2004).**

Ce niveau d'exposition élevé génère inévitablement des conditions de risque d'autant plus marquées que l'on est en présence d'espaces insulaires de petite dimension, fortement anthropisés, aux ressources limitées et à l'économie fragile. Le passage de l'ouragan Dean en août dernier a révélé une fois de plus la vulnérabilité de ce territoire, en particulier de son littoral.

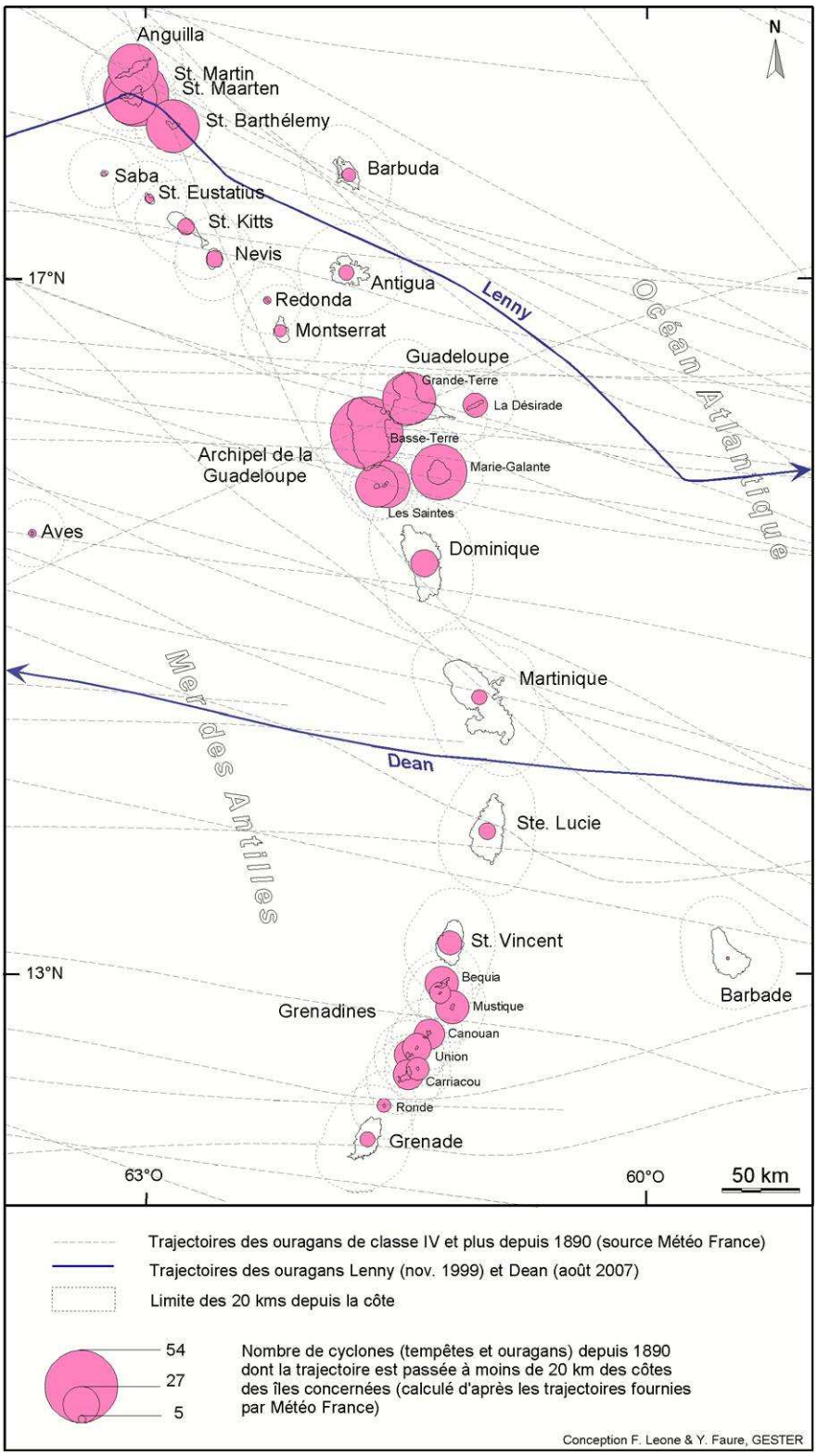


Figure 2.11. Trajectoires historiques des ouragans sur les Petites Antilles entre 1890 et 2007

L'activité cyclonique qui intéresse les Petites Antilles se manifeste essentiellement durant l'été (saison d'hivernage aux Antilles). Elle se développe au nord de la Zone Intertropicale de Convergence (ZIC) à la faveur d'une forte instabilité de l'atmosphère, d'une forte humidité, d'un réchauffement de la surface de l'océan, d'une faiblesse du cisaillement vertical des vents et d'une latitude supérieure à 5°Nord nécessaire à l'amorçage et au maintien du mouvement tourbillonnaire par la force de Coriolis (Météo France, 1999). Les cyclones, ou plus exactement toute perturbation atmosphérique tropicale tourbillonnaire (d'intensité croissante : dépressions tropicales, tempêtes tropicales, ouragans) suivent dans cette région une trajectoire parabolique : ils prennent naissance généralement au large des côtes de l'Afrique ou de l'archipel du Cap Vert et traversent l'océan d'Est en Ouest en 4 à 5 jours en se renforçant puis en incurvant leur trajectoire vers le Nord-Ouest au niveau des Antilles (cas de Hugo en 1989 et de Luis en 1995). D'autres prennent naissance sur les eaux chaudes de la Caraïbe mais n'intéressent pas les Antilles (cas de Mitch en 1998), si ce n'est par les effets de houle associés, à une exception prête, celle du cyclone Lenny de novembre 1999 à la trajectoire atypique vers l'Est (**figure 2.11**).

La Martinique a connu près de 80 cyclones dévastateurs depuis les premières traces écrites de la colonisation en 1635 (les plus meurtriers étant ceux de 1666 : centaines de morts, 1780 : 9 000 morts, 1766 : 440 morts, 1813 : plus de 200 morts, 1834, 1891 : 700 morts, 1903 : 31 morts, 1963 avec Edith : 10 morts, 1967 avec Beulah, et 1970 avec Dorothy : 44 morts). Sur la base d'observations tirées des 100 dernières années, Météo France (2000) établit les fréquences de retour des cyclones (tempête ou ouragan) à 3,6 années et des ouragans à 12,5 années. Enfin, huit perturbations tropicales entraînant des dommages variables ont affecté la Martinique depuis 12 ans, avec un hivernage 1995 particulièrement marqué. Rappelons que les cyclones tuent et endommagent essentiellement par les effets du vent mais aussi et surtout par une série de phénomènes induits d'intensité et d'occurrence variables suivant les évènements : inondations, mouvements de terrain, houle, marée de tempête. Le tout dernier cyclone Dean qui est passé au sud de la Martinique les 16 et 17 août 2007 (rafales de plus de 170 km/h) a provoqué deux morts et six blessés sur l'île.

L'activité sismique est très soutenue aux Antilles. Elle est liée au contexte géodynamique actif de cette région du fait de l'affrontement de deux plaques tectoniques : la plaque Nord atlantique plongeant sous la plaque Caraïbe avec une vitesse moyenne de 2 cm / an (**figure 2.10.**). Cela donne lieu à un plan de subduction intra-océanique, matérialisé par l'arc des Petites Antilles – conséquence de l'activité volcanique qu'il génère – et le long duquel se concentre l'essentiel de cette activité sismique. Au cours de l'histoire, plusieurs séismes majeurs ont été fortement ressentis en Martinique : 5 d'intensité VIII (échelle MSK) en 1702, 1727, 1827, 1839, 1946 ; 3 d'intensité VII en 1771, 1906, 1953 ; 12 d'intensité VI dont deux répliques du séisme de 1839 et 2 répliques de celui de 1946 (Feuillard 1985, in Godefroy & Mouroux, 1991). Le plus dévastateur reste de mémoire celui du 11 janvier 1839 qui détruisit Fort-de-France en entraînant la mort d'au moins 300 personnes et peut être même 3 ou 4000 si on se fie au témoignage très précis d'un chroniqueur de l'époque présent au moment du séisme (Péray 1991, pp. 311-329). Une estimation grossière des fréquences des secousses historiques responsables de dommages conduit aux pseudo-périodes de retour de 75 à 150 ans pour l'intensité VIII, 40 à 50 ans pour l'intensité VII et plus, 12 ans pour l'intensité VI et plus. Précisons que la zone de subduction des Petites Antilles présente un secteur très faiblement actif du point de vue de sa sismicité historique (lacune de sismicité) que certains auteurs interprètent comme le signe annonciateur d'un prochain séisme fort (Audras et al., 1999). Par ailleurs et sur la base de ces critères tectoniques et historiques, le zonage sismique de la France qui sert de référence pour l'application des règles de constructions parasismiques,

classe la Martinique et la Guadeloupe en zone III - spécialement créée pour les Antilles - soit de plus forte sismicité du territoire national. Notons que les effets des séismes peuvent être par ailleurs accrus en Martinique, en raison de contextes géologiques, géotechniques et topographiques particulièrement favorables à l'amplification des vibrations, aux mouvements de terrain et à la liquéfaction du sol (effets locaux). Par ailleurs, certains systèmes de failles actives affectant superficiellement la plaque Caraïbe, pourraient engendrer des sources sismiques de taille suffisante pour que la rupture se propage jusqu'en surface du sol.

L'activité volcanique est à l'origine même de l'île de la Martinique et demeure actuellement assurée par son unique volcan actif, la Montagne Pelée (**figure 2.12.**). Il s'agit d'un strato-volcan andésitique et donc explosif, lié au contexte de subduction précédemment cité. Trois types de dynamismes éruptifs y sont associés : éruptions phréatiques, éruptions pliniennes et éruptions péléennes (archétype défini en référence à la Montagne Pelée). Durant les 6000 dernières années, 28 éruptions magmatiques ont été recensées, dont 11 pliniennes et 17 péléennes, ce qui conduit à une fréquence statistique de 4 à 5 éruptions dangereuses par millénaire (Cheminée et al., 1995). Comme pour tout volcan explosif de ce type, les phénomènes associés à ces éruptions (en particulier celles magmatiques) sont variés : retombées aériennes (téphra), mouvements de terrain (avalanches de débris notamment), raz-de-marée (tsunamis), émanations gazeuses et parfois redoutables, tels les écoulements pyroclastiques (nuées ardentes et déferlantes notamment) et les lahars (coulées de boue) (Rançon in Bourdier, 1994, pp. 291-310). La période historique a été marquée par deux éruptions phréatiques (1792, 1851) et deux éruptions magmatiques de type péléen (1902-1903 et 1929-1932). Celle de 1902-1903 reste gravée dans les mémoires pour avoir détruit successivement les villes de Saint-Pierre (le 8 mai 1902 : 28 000 morts) et du Morne-Rouge (le 30 août suivant : 1 000 morts) ; bilan qui en fait l'événement d'origine volcanique le plus meurtrier du XXe siècle (Lacroix 1904 ; Ursulet 1996).

Figure 2.12. La Montagne Pelée surmontant la baie de Saint-Pierre de la Martinique. Photo prise le 8 mai 2002, 100 ans après la catastrophe volcanique qui a fait 29 000 morts (Photo M. Desse).

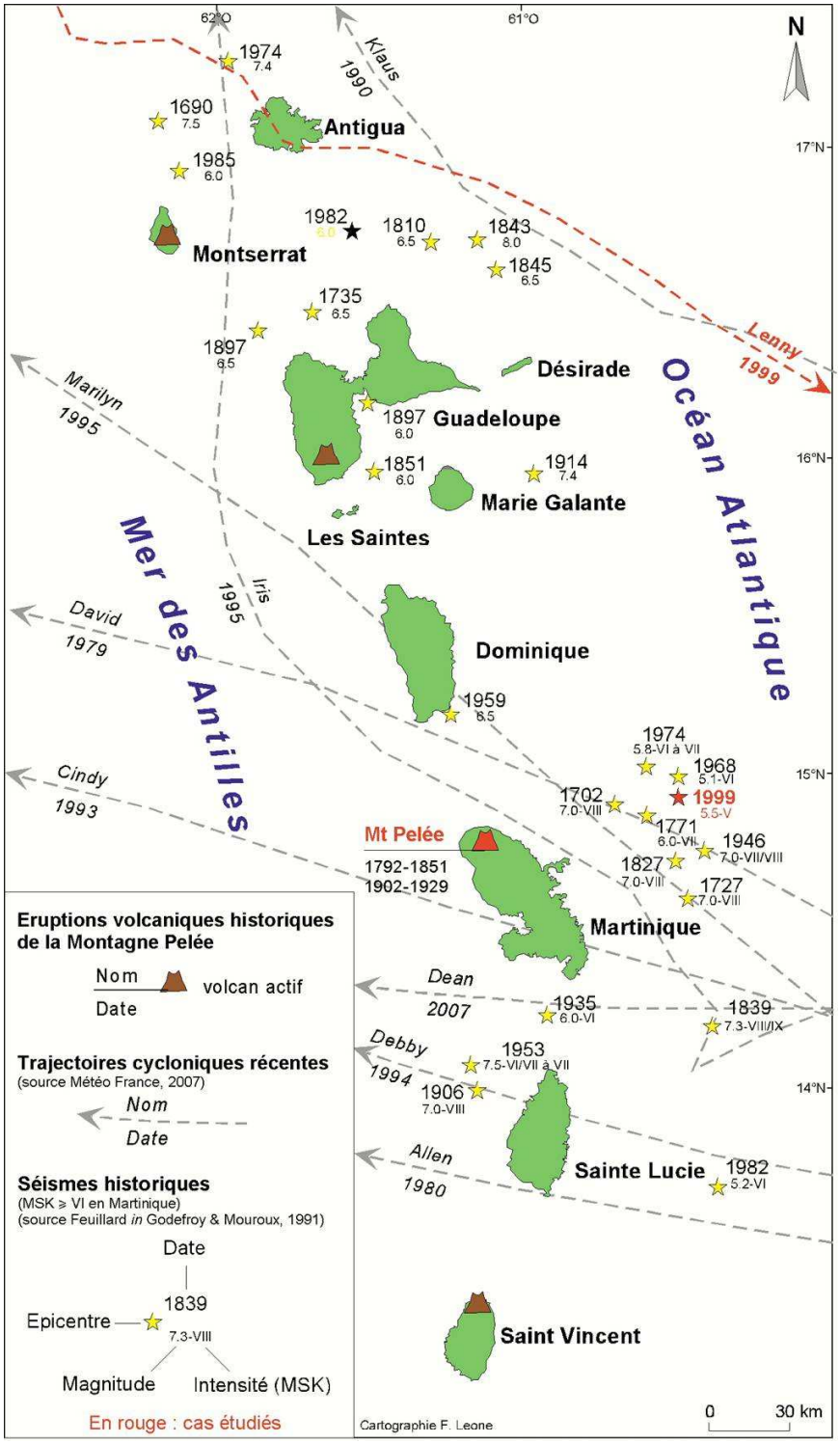


Figure 2.13. Synthèse cartographique des principaux évènements naturels dommageables ayant affecté la Martinique dans la période historique documentée. En rouge : cas étudiés.

La Martinique dispose depuis 1998 (Sedan et al., 1998) d'une cartographie informative et inédite (au 1:25 000) des aléas naturels locaux associés aux différentes menaces évoquées précédemment (l'équivalent existant aussi pour la Guadeloupe). Y sont considérés, le plus souvent avec des niveaux d'intensité variables (fort, moyen, faible), l'aléa mouvements de terrain (intégrant les phénomènes de chutes de blocs, de glissements de terrain et de mouvements indifférenciés), l'aléa inondation de rivière, l'aléa cyclonique (représenté ici par les phénomènes de houle cyclonique et de marée de tempête associés), l'aléa sismique (représenté par ses effets locaux : effets de site géologique et topographiques, sols liquéfiables ou susceptibles de l'être), volcaniques (intégrant les phénomènes d'écoulements pyroclastiques, de retombées de téphra, d'émanations gazeuses, de lahars, de mouvements de terrain et de tsunamis). Excepté pour l'aléa volcanique dont le zonage a fait l'objet d'une méthodologie novatrice (Stieltjes & Mirgon, 1988), seule la dimension spatiale de ces aléas a été retenue par intégration manuelle ou numérique de certains facteurs de prédisposition. La dimension temporelle (probabilité d'occurrence) a été écartée soit pour des raisons méthodologiques, soit à cause d'incertitudes trop fortes compromettant son évaluation. Il en est ressorti une cartographie quasi complète du territoire martiniquais à l'échelle du 1:25 000, excepté pour certains aléas dans les secteurs Centre Nord et Nord, ainsi que sur les trois communes composant l'agglomération foyalaise (Schoelcher, Fort-de-France, Lamentin). Sur ce dernier secteur, ces lacunes ont pu être partiellement comblées par les données sur l'aléa mouvements de terrain et les effets sismiques locaux extraites du microzonage sismique établi au 1:10 000 par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (Chassagneux et al. 1996 et Sedan & Mompelat 1996), ainsi que par le zonage de l'aléa inondation dans la plaine du Lamentin (BCEOM in DDE, 1997).

Par souci de clarté et pour montrer les implications territoriales des risques présents, nous avons extrait de ces documents uniquement les secteurs à niveau d'aléa fort (élevé). Il s'agit effectivement de zones dangereuses, voire très dangereuses où s'est produit l'essentiel des dommages constatés ces dernières années suite à des évènements naturels tels que le séisme du 8 juin 1999 (AFPS, 1999), la houle du cyclone Lenny en novembre 1999, les effets du cyclone Dean en 2007, ou bien les mouvements de terrain et inondations multiples consécutifs aux évènements climatiques de l'hivernage 1995. La superposition de ces zones nous amène à un constat préoccupant : une emprise spatiale des menaces naturelles très importante, voire exceptionnelle, avec l'équivalent de près de la moitié de la surface totale de l'île concernée par des aléas naturels forts de toute nature (au moins 613 km^2 en surfaces cumulées) (**figure 2.14.a**). On constate que les communes les plus pénalisées sont celles du Nord (domination des aléas volcanique et mouvements de terrain), du Centre Nord (domination de l'aléa mouvement de terrain), du Centre (domination des aléas inondation, sismique local et mouvements de terrain), du Centre Sud (domination de l'aléa mouvements de terrain) ainsi que toute la frange littorale (domination des aléas inondation, houle cyclonique - marée de tempête et sismique local).

Les conséquences d'une telle exposition sont doubles : il s'agit d'espaces menacés donc à réglementer tant sur le plan de l'occupation humaine que des normes de sécurité à apporter aux biens existants ou à créer, avec tout ce que cela comporte comme incidences économiques, sociales, juridiques, institutionnelles, organisationnelles, sociales, politiques et surtout foncières ; on obtient des configurations de risque parfois extrêmes, préfigurant les conditions même de futures catastrophes aux conséquences potentielles encore plus préoccupantes.

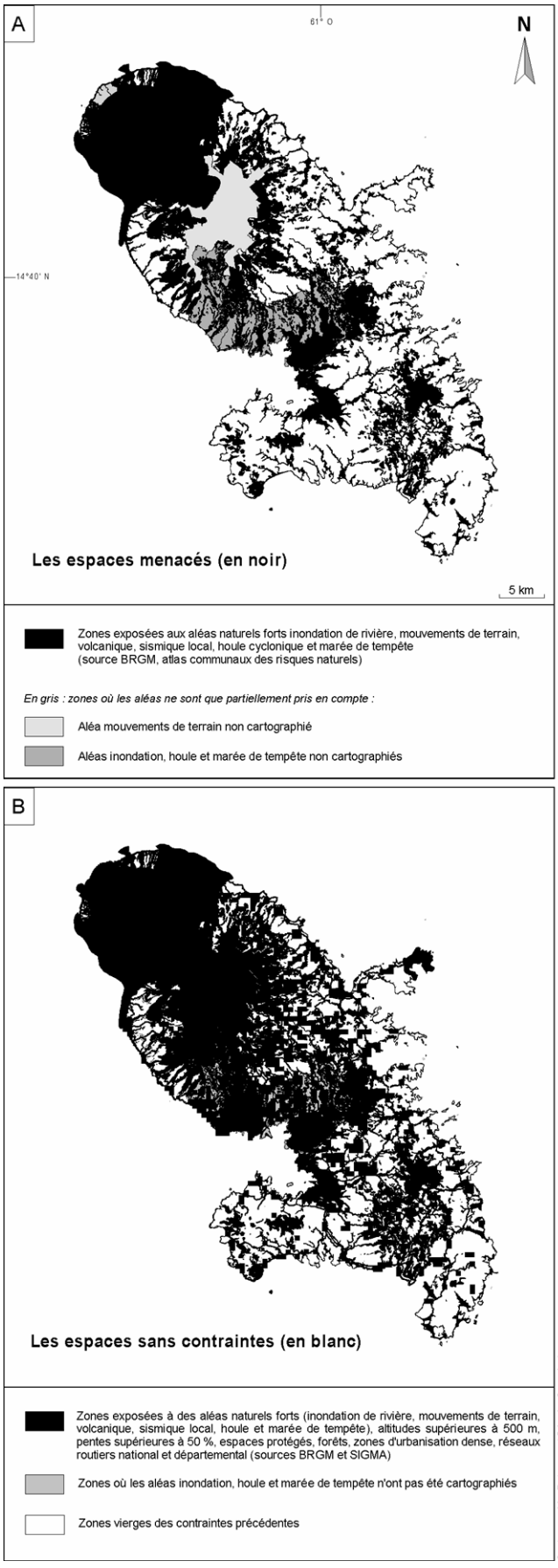


Figure 2.14. Emprise spatiale des aléas naturels en Martinique. Contraintes pour l'aménagement du territoire (Leone, 2002).

Des espaces de développement très limités et des enjeux considérables

Ces secteurs font l'objet depuis 2000 d'une attention toute particulière des services de l'Etat (DDE, Préfecture) chargés de la prescription et du suivi des Plans de Prévention des Risques (P.P.R.). Aussi, ce qui demeurait jusqu'en 2000 un zonage informatif s'est traduit, au moins pour les zones d'aléas forts, en un zonage réglementaire à l'échelle communale, opposable au tiers et donc contraignant sur de nombreux points même si reconnu d'utilité publique : gel de certaines surfaces, obligations de protection et de prévention, etc.

Compte tenu de l'accessibilité à d'autres données du SIGMA, il nous est apparu intéressant d'évaluer, au moins cartographiquement, les espaces de développement réellement disponibles en Martinique. Pour cela nous avons pris en compte les espaces déjà occupés par l'homme (réseau routier principal, zones densément urbanisées), de nouvelles contraintes environnementales telles que les secteurs de forte déclivité (pente supérieure à 50%), les espaces d'altitude supérieure à 500 m (au delà de laquelle la présence humaine est repoussée par les conditions climatiques et orographiques très contraignantes), les grands domaines forestiers et d'autres espaces protégés d'intérêt écologique et patrimonial (réserves naturelles et sites classés).

La confrontation avec les zones d'aléas forts définies précédemment aboutit à une véritable « peau de chagrin » du territoire martiniquais où les espaces de développement vierges de toutes les contraintes précédentes n'apparaissent plus que sous la forme de lambeaux isolés (en blanc sur la carte, **figure 2.14.b**). Ces espaces encore disponibles pour des projets d'aménagement futurs d'envergure se trouvent surtout dans le tiers méridional de l'île, mais correspondent en grande partie à des territoires à vocation agricole (*cf.* le Schéma d'Aménagement Régional, Conseil Régional de la Martinique, 1998), ce qui laisse présager à moyen et long terme un grignotage progressif de ces espaces au profit de l'expansion urbaine.

Sans passer ici par une analyse de ces facteurs, nous avons tenté d'appréhender les conditions de risque présentes sur le territoire martiniquais en quantifiant à l'échelle communale, les bâtiments exposés. Nous avons différencié dans la mesure du possible ceux à usage industriel ou agricole des autres (tous types confondus). De cette confrontation, il ressort que près de 30 % du parc immobilier de la Martinique est exposé au moins à un aléa naturel fort (40,4 % pour les bâtiments industriels et / ou agricoles), avec un record d'exposition à l'aléa mouvement de terrain (14,5 % de l'ensemble du bâti). Les enjeux sont donc énormes et en valeur absolue se concentrent essentiellement sur les communes du centre de l'île (Fort-de-France, Lamentin, Robert). En valeurs relatives, les communes les plus pénalisées sont celles du Nord, du fait de l'extension de l'aléa volcanique dans ce secteur. Néanmoins, la commune du Lamentin, centre industriel et commercial de la Martinique, enregistre un record avec près de 60% de son parc immobilier industriel (et secondairement agricole) exposé, et ce principalement aux aléas inondation et sismique. Rappelons qu'il s'agit là de menaces à forte probabilité d'occurrence qui concernent aussi d'autres types d'enjeux, hautement stratégiques, tant au regard de l'économie locale que de la gestion d'une future catastrophe : il s'agit de l'aéroport international du Lamentin, du port autonome de Fort-de-France et de la centrale thermoélectrique de Bellefontaine pour citer les plus importants. Par ailleurs, le calcul des densités de bâtiments exposés par type d'aléa nous apprend que c'est pour les aléas houle cyclonique et marée de tempête que l'on a de loin les plus forte densités avec 151 bâtiments / km^2 d'aléa, contre 97 pour l'aléa sismique local, 62 pour l'aléa mouvements de terrain, 45 pour l'aléa inondation et 44 pour l'aléa volcanique. C'est donc préférentiellement sur le littoral que l'on peut s'attendre aux pertes relatives les plus élevées en cas de cyclone. L'ampleur des dégâts occasionnés par la houle du cyclone Lenny en novembre 1999 sur la côte caraïbe a

confirmé ce constat avec près de 400 déclarations de dommages aux particuliers (source Conseil Régional de la Martinique, 2001). Compte tenu des fréquences de retour élevées de ces phénomènes, le littoral constitue bien une zone à haut risque, donc prioritaire pour mener à bien des actions de prévention.

Si le risque reste virtuel, la catastrophe en est sa concrétisation en tant qu'événement grave entraînant de larges pertes et dysfonctionnements pour la société qui la subit sans pouvoir la surmonter avec ses seules ressources propres. Au vu des enjeux présents en Martinique, la manifestation de l'un ou l'autre de ces phénomènes (séisme ou éruption) conduirait sans doute à des pertes directes très importantes induisant des conséquences socio-économiques sans précédent. Ceci est d'autant plus vrai pour l'aléa sismique car depuis le dernier séisme majeur (1839) 168 années se sont écoulées durant lesquelles la Martinique a vu sa population doubler. Cette évolution démographique associée à un exode rural massif surtout dans les années 50 a eu pour corollaire une urbanisation anarchique et un « mitage » de l'espace aggravant les conditions de vulnérabilité du bâti et des personnes : dans le premier cas, en donnant naissance à des quartiers extrêmement vulnérables aux séismes, tels ceux de Trénelle et Citron à Fort-de-France qui se caractérisent par leurs auto-constructions ignorant les règles élémentaires d'architecture - a fortiori parasismiques - et installés sur des pentes fortes réputées instables (**figure 2.15**) ; dans le second cas, en perturbant les fragiles équilibres naturels par des actions répétées de déboisement, de terrassement, d'imperméabilisation des sols et de rejet d'eaux usées tout à fait préjudiciables à la stabilité des terrains en cas de séisme, notamment sur pentes fortes.

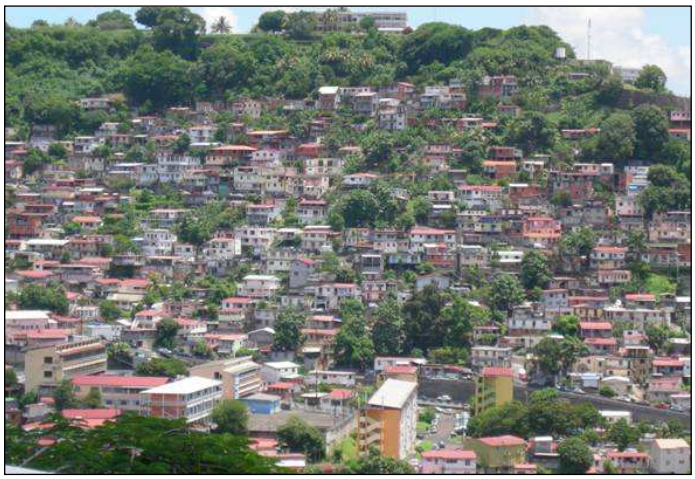


Figure 2.15. Le quartier très vulnérable de Trenelle à Fort-de-France, caractérisé par de l'auto-construction (photo M. Gherardi, 2006)

Cette urbanisation a pris toute sa démesure au niveau d'une agglomération foyalaise (Schoelcher-Fort-de-France-Lamentin) dont la population a quadruplé depuis 1900. Celle-ci représente actuellement près de 40 % de l'effectif total de l'île, pour seulement 18% en 1901 et concentre la plupart des services, des commerces et des industries. Par conséquent, cette agglomération concentrerait la plus grande part des dommages et des pertes humaines en cas de séisme majeur.

Même si les enjeux directs sont moindres, du fait de la dévitalisation actuelle du Nord de la Martinique, et ce en grande partie pour des raisons orographiques et historiques avec l'anéantissement de Saint Pierre en 1902, les conséquences d'une éruption volcanique majeure seraient tant sur le plan socio-économique qu'environnemental tout aussi désastreuses. Les pertes humaines seraient certes réduites du fait des progrès réalisés dans la prévision volcanologique – la Montagne Pelée étant placée sous haute surveillance – ce qui laisse théoriquement aux autorités le temps d'évacuer les populations en danger. Mais l'étroitesse du territoire posera certainement des difficultés pour la délimitation des zones de danger et d'abri, deux notions clés dans la gestion d'une crise éruptive en contexte insulaire (Lesales, 1999).

Sous la pression sociale et compte tenu des incertitudes sur l'extension spatiale des phénomènes, notamment des écoulements pyroclastiques et des retombées de cendres, les

autorités pourront être tentées de réduire la zone de danger ou de réajuster régulièrement la ligne de démarcation entre les deux zones en fonction de l'évolution de l'éruption, et surtout de sa durée - tel fut le cas à Montserrat (Antilles britanniques) d'octobre 1996 à septembre 1997 - au risque d'exposer des populations périphériques non évacuées. En tout état de cause, l'évacuation – seule parade réellement efficace face à un tel phénomène – sera inévitable et aura des répercussions socio-économiques et psychologiques délicates à gérer. En retenant l'hypothèse tout à fait crédible d'un rayon d'évacuation de 12,5 km depuis le sommet du volcan - ce qui permet d'englober la zone d'aléa maximal définie par le BRGM (Stieltjes & Mirgon, 1998) – on peut évaluer la population susceptible d'être déplacée dès l'amorce d'une éruption (de surcroît magmatique) entre 32 000 et 33 000 individus, soit environ 8% de l'effectif total de l'île.

Compte tenu du fait qu'une éruption magmatique s'inscrit généralement dans la durée (mois et plus probablement années), ce sera autant d'individus à héberger provisoirement, voire reloger définitivement dans le reste de la Martinique. C'est sans compter les difficultés inhérentes aux pertes de biens, de revenus et d'emploi et les tensions sociales pouvant naître de ces transferts de population, comme ce fût le cas en Guadeloupe lors de la crise éruptive de 1976 avec près de 70 000 personnes déplacées (Lepointe, 1984). L'éruption terminée, la réoccupation éventuelle des zones dévastées sera soumise aux risques rémanents posés par des lahars au voisinage des principaux chenaux d'écoulement et aux débouchés desquels on trouve les principales agglomérations littorales. Le reste de la Martinique pourra aussi pâtir des effets directs d'une telle éruption, du fait des retombées de cendres et de l'atteinte à la ressource en eau potable. Effectivement, Stieltjes & Mirgon (1998) ont évalué qu'actuellement ce sont 56 % des enjeux concernant la ressource en eau potable de la Martinique (sources, captages, forages, réservoirs) qui se situent en secteur d'aléa maximal. Une éruption magmatique de la Montagne Pelée, de surcroît plinienne, sera donc lourde de conséquences, à l'image de la crise éruptive débutée en 1995 sur l'île voisine de Montserrat où près de 70% de la population avaient préféré s'expatrier.

Face à de tels risques et faute de pouvoir réduire les phénomènes volcaniques et leurs effets, l'effort de prévention doit porter ici prioritairement sur l'information et la formation des populations pour faciliter au mieux l'organisation d'une future évacuation massive ; sur les normes de protection des infrastructures pour permettre leur récupération et la préservation des personnes non évacuées ; ainsi que sur un aménagement adapté du territoire en évitant de concentrer à outrance des enjeux stratégiques et humains en zones de danger élevé.

Une prise en compte tardive des risques naturels dans l'aménagement du territoire

La prise en compte technique et réglementaire des risques naturels majeurs en France a pris un tournant décisif en 1982, avec la loi du 13 juillet relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles et l'instauration des Plans d'Exposition aux Risques (P.E.R.) en mai 1984. Il faudra attendre le passage de l'ouragan Hugo sur les Antilles (notamment en Guadeloupe) en novembre 1989 et la loi du 25 juin 1990 pour étendre la garantie légale des catastrophes naturelles et donc la solidarité nationale aux quatre départements d'outre-mer (Martinique, Guadeloupe, Guyane, Réunion). Bien que la Martinique ait depuis longtemps servi de laboratoire d'étude sur les menaces naturelles avec plusieurs projets pilotes, aucun zonage réglementaire antérieur (Plan de Surface Submersible P.S.S., article R 111-3 du code de l'urbanisme) ou postérieur (P.E.R.) à 1982 n'y a vu le jour. Il a fallu attendre le 31 mai 1999 et l'approbation du premier Plan de Prévention des Risques (P.P.R.) sur la commune du Prêcheur pour que s'enclenche avec un léger retard sur la métropole une véritable politique de prévention à l'échelle communale. L'absence de réglementation et de contrôle qui ont prévalu jusqu'avant

ont été déterminants sur l'occupation massive et souvent non contrôlée des zones à risque, notamment sur les versants escarpés des mornes, dans les lits mineurs des cours d'eau ainsi que sur le littoral, théoriquement interdit à la construction dans ses 82 premiers mètres (zone dite des 50 pas géométriques). L'importance des enjeux constatés l'atteste, mais ce constat peut être renforcé par une analyse complémentaire menée pour les aléas inondation et houle cyclonique sur quelques communes du Nord Caraïbe pour lesquelles on a pu prendre en considération le bâti construit entre 1983 et 1994. Effectivement le croisement numérique de ces deux catégories de données nous permet de constater que malgré l'effort de sensibilisation aux risques naturels apparu dès le début des années 80 (médias, pouvoirs publics), certaines communes ont abusivement laissé construire sur des zones dangereuses, notamment vis-à-vis des inondations torrentielles, avec un total d'environ 240 constructions nouvelles sur les huit communes sélectionnées, ce qui représentait tout de même près de 20 % du bâti total exposé aux inondations en 1994. En valeur absolue, le record semblait être détenu par la commune de Saint-Pierre, tant au regard de l'aléa inondation que de la houle avec respectivement 55 et 23 constructions nouvelles.

La mise en place du premier PPR Volcan

L'élaboration des PPR multi-aléas en Martinique a nécessité, non sans mal, de prendre en considération le risque volcanique, jugé dans un premier temps comme secondaire par le préfet de l'époque. A force de persuasion, l'aléa volcanique et les contraintes qu'il peut imposer en matière d'aménagement du territoire ont été intégrés pour la toute première fois en France dans une procédure de planification territoriale des risques. Cette mission nous a été confiée par la DDE de la Martinique en 2001 (Leone & Lesales, 2002).

La carte réglementaire proposée pour le risque volcanique s'est fondée sur une retranscription des différentes zones d'aléas volcaniques (**figure 2.16.**) – suivant des règles d'expertise clairement définies – en terme de niveaux de contraintes réglementaires à appliquer pour prévenir les risques (**tableau 2.7.**). Trois niveaux de contraintes croissants ont ainsi été déterminés conformément au cahier des charges (**figure 2.17.**). Pour chaque zone, des prescriptions ont été définies, elles sont le résultat d'une expertise fine des divers modes et niveaux d'endommagement imputables aux multiples aléas volcaniques connus et d'une bonne connaissance de la vulnérabilité territoriale et socio-économique de la Martinique.

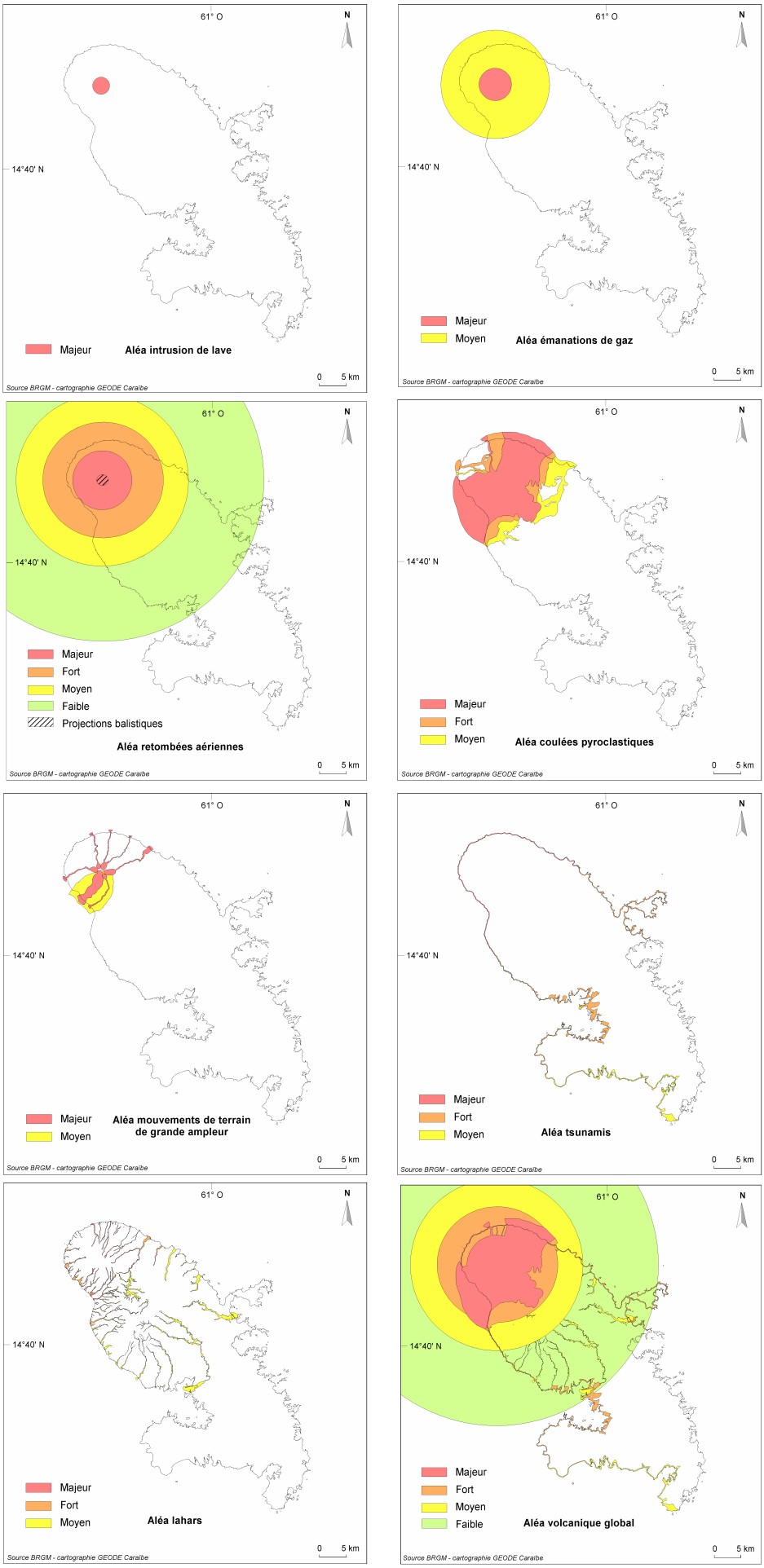


Figure 2.16. Cartographie des aléas volcaniques associés à une future éruption maximale crédible de la Montagne Pelée (adapté d'après des données de Stieltjes et Mirgon, 1998)

En conformité avec le zonage, le règlement proposé comprend (**annexe 9**) :

– des niveaux de contraintes dans l'occupation du sol (en définissant des zones constructibles ou inconstructibles) et les règles de construction, d'urbanisme ou d'exploitation applicables aux implantations et projets nouveaux ;

– des mesures de prévention, de protection et de sauvegarde (information préventive notamment), à caractère soit obligatoire, soit recommandé, applicables aux biens, infrastructures, personnes, activités et fonctions diverses existantes.

Tableau 2.7. Correspondances entre niveaux d'aléas et contraintes réglementaires retenues pour le PPR volcan de la Martinique (Leone & Lesales, 2002).

ALEAS	Majeur (Ma)	Fort (Fo)	Moyen (Mo)	Faible (Fa)
Retombées aériennes (téphra)	**RAMa**	**RAFo**	**RaMo**	**RAFa**
Coulées pyroclastiques	**CPMa**	**CPFo**	**CPMo**	
Intrusions de lave	**ILMa**			
Emanations de gaz	**EGMa**		**EGMo**	
Lahars	**LAMa**	**LAFo**	**LAMo**	
Mouvements de terrain	**MTMa**		**MTMo**	
Tsunamis	**TSMa**	**TSFo**	**TSMo**	

D'une manière générale, ces mesures structurelles ou non-structurelles doivent permettre :

– de réduire la vulnérabilité et l'exposition des personnes en zone de danger et zone d'abri en cas d'évacuation ;
– de faciliter une gestion de crise volcanique, notamment l'évacuation des zones exposées, en conformité avec le Plan de Secours Spécialisé Volcan.
– de faciliter la poursuite de la vie en zone de repli en cas d'évacuation ;
– de faciliter le relèvement de la zone sinistrée après la crise ;
– de développer une « conscience collective » du risque volcanique en Martinique.

Dans les secteurs d'aléas majeurs dont on maîtrise bien l'extension spatiale, l'inconstructibilité est préconisée (zones rouges). Ces zones sont concernées en particulier par les lahars ; les avalanches de débris – dont certains secteurs recoupent également certains types de coulées pyroclastiques – et les intrusions de laves visqueuses (zones de formation de dômes). Les autres secteurs d'aléas majeurs – particulièrement ceux exposés aux écoulements pyroclastiques et aux retombées aériennes – n'ont pas fait l'objet de contraintes maximales vu notamment les grandes incertitudes qui demeurent sur leur extension probable dans l'état actuel des connaissances scientifiques. Cette distinction s'appuie également sur les probabilités d'occurrence des phénomènes dans le déroulement des scénarios éruptifs connus. Les lahars sont susceptibles d'apparaître dès le stade phréatique d'une éruption, et peuvent très tôt pénaliser la gestion d'une crise éruptive, alors que les coulées pyroclastiques se manifestent dans un stade plus avancé. L'introduction de cette nuance autorise le développement dans des secteurs exposés ; autrement, c'est tout le nord de la Martinique qui devrait être interdit à l'implantation humaine. Le zonage et les prescriptions réglementaires retenus apparaissent donc comme le résultat d'un compromis négocié entre recherche d'un certain niveau de protection collectivement acceptable, et volonté de préserver les potentialités de développement du territoire martiniquais, en particulier dans sa partie Nord. Cependant, les limites de mise en œuvre d'une cartographie réglementaire en contexte volcanique insulaire sont apparues ici. Il est en effet délicat d'imposer réglementairement des délimitations au 1:10 000 de phénomènes autant incertains aussi bien dans leur extension spatiale que dans leurs probabilités de retour.

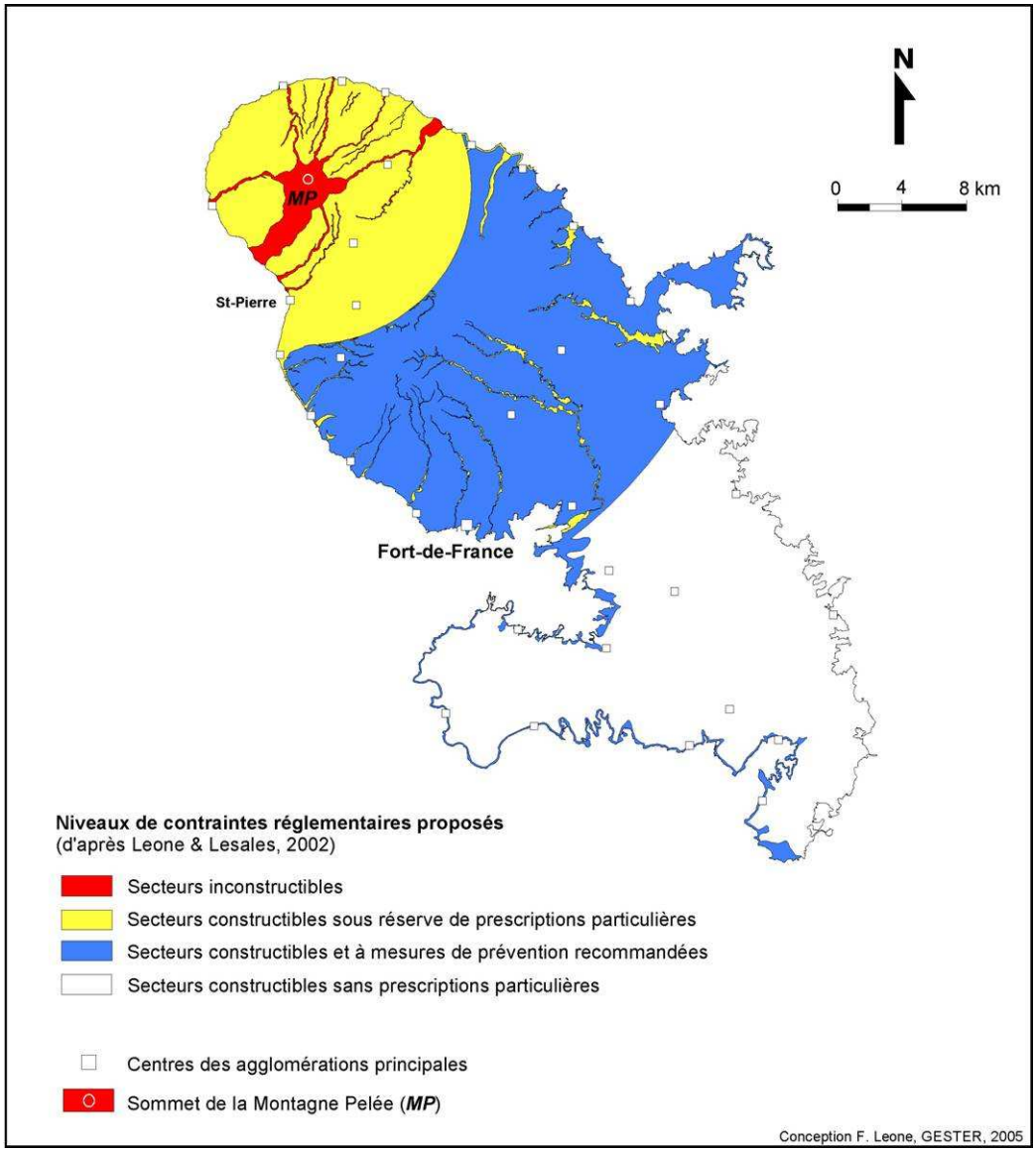


Figure 2.17. Le zonage réglementaire proposé dans le cadre du PPR volcan de la Martinique (Leone & Lesales, 2002).

Des lacunes à combler

Cette doctrine réglementaire fixée par la métropole s'est accompagnée aussi de nombreuses mesures et initiatives complémentaires, parfois locales, qui témoignent de l'entrée de la Martinique dans une ère de prévention et de culture du risque naturel. On peut citer par exemple l'élaboration récente de plans de secours spécialisés (séisme et volcan), de campagnes d'information (atlas de risques et dossiers communaux, brochures, spots TV, affiches), la simulation de crises (sismique et mouvements de terrain, mais pas encore volcanique…), l'essor de la construction parasismique et la création d'une formation ad hoc, la mise en place de schémas de couverture des risques, ainsi que la formation de certains établissements scolaires aux risques majeurs (PPMS).

Sous ce constat relativement optimiste se cachent tout de même quelques lacunes démontrant les difficultés d'intégration des risques naturels aux projets de planification territoriale à moyen terme, plus exactement à l'horizon 2015. Il apparaît en effet surprenant, après recoupement cartographique, que le futur Schéma d'Aménagement Régional de la Martinique (S.A.R.) adopté le 27 janvier 1998 et qui a valeur de loi d'aménagement du territoire, néglige (à hauteur de 33 %) les aléas naturels dans l'implantation de ses futures zones d'urbanisation. Si cela s'admet assez facilement pour les aléas volcanique (7 %) et sismique local (1,5 %) qui restent moins bien perçus, c'est difficilement acceptable pour les aléas forts houle et marée de tempête (1%), inondation de rivière (6 %) et surtout mouvements de terrain (près de 9 % de recoupement) dont l'appréciation relève de l'observation et du bon sens (**figure 2.18.**).

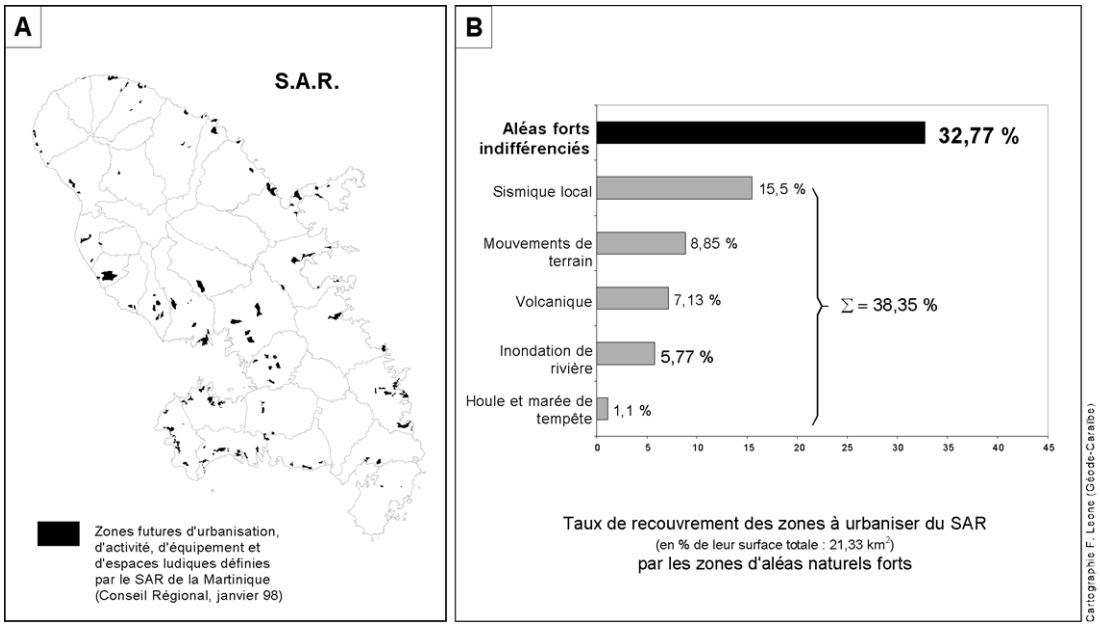


Figure 2.18. Illustration de la mauvaise prise en compte des menaces naturelles dans les projets d'aménagement futurs en Martinique (Leone, 2002).

Sans prétendre atteindre un niveau de risque nul, car illusoire, ce type de document doit impérativement intégrer plus finement la prise en compte des zones menacées, au moins par des aléas forts, car il définit l'implantation d'enjeux futurs, donc à priori maîtrisables, contrairement aux enjeux existants qui posent de sérieux problèmes de protection et des coûts énormes à supporter par la collectivité en cas d'endommagement. A titre d'exemple, nous avons pu estimer par le biais d'une approche statistique que le coût direct annuel (dégâts matériels) des mouvements de terrain et de l'érosion (littorale et marine) en Martinique oscille entre 5 et 9 millions de francs (Leone & Lesales, 1999, *cf.* **tableau 2.2**.), tandis que les dégâts liés au déferlement de la houle du cyclone Lenny (novembre 1999) sur le littoral Nord caraïbe ont nécessité le déblocage d'une aide gouvernementale d'au moins 175 millions de francs (contre 417 MF pour la Guadeloupe) (source Secrétariat d'Etat à l'outre-mer, février 2000). Il apparaît donc prioritaire de réduire les risques par la maîtrise des enjeux, faute de pouvoir agir sur les phénomènes surtout dans leurs intensités les plus fortes. Face à cette situation, il est primordial que s'enracine au sein des populations une véritable culture de prévention du risque basée sur l'information et la formation, afin que chacun puisse consciemment prendre ses responsabilités, et se préparer au mieux à affronter une future crise.

L'approche qui suit apporte un diagnostic complémentaire sur l'état actuel de cette conscience du risque en présentant plusieurs aspects des représentations de différents risques naturels par les populations. Il s'agit selon nous d'un préalable indispensable à la mise en place d'une stratégie d'information ciblée et comprise par les populations.

Une analyse comparative des représentations collectives des risques naturels (cyclones, séismes, volcanisme)

L'analyse des représentations collectives relève d'une approche psychosociale du risque propre aux études de vulnérabilité humaine, et très largement développée dans le champ de la psychologie environnementale, de la sociologie ou de la géographie des risques. La psychologie sociale définit les représentations comme des ensembles socio-cognitifs organisés de façon spécifique et régis par des règles de fonctionnement qui leur sont propres. C'est le processus et le produit d'une activité mentale par laquelle l'individu reconstruit le réel auquel il est confronté et lui attribue un sens (Abric, 1994). De ce fait, les représentations jouent souvent un rôle plus important que les caractéristiques objectives d'une situation dans les comportements adoptés par les individus ou les groupes. D'après Bonnet (2002), la notion de représentation complète la notion réductrice des perceptions. Percevoir c'est éprouver une sensation, sentir, toucher et être en contact direct avec une réalité tangible. Ceci suppose donc que l'objet perçu existe objectivement, mais le risque peut-il être objectif ? Le risque relève plus d'une conception virtuelle que matérielle. La notion de représentation permet donc d'éviter de s'attarder uniquement sur ce qui est palpable et imaginable. Elle tient compte de toute la construction mentale que se font les individus sur le risque (Bonnet, 2002). Au final, la représentation autorise la prise en compte globale de l'objet représenté, sans toutefois se déconnecter de la réalité, mais en considérant toute la richesse et la complexité des cognitions (Peretti-Watel, 2000).

Aussi l'analyse des représentations doit être un préalable à toute campagne ou stratégie de prévention des risques de manière à mettre en place des schémas (plans de secours par exemple) qui soient compréhensibles et suivis par les populations, ou bien pour corriger les éventuelles distorsions entre représentations collectives et scénarios scientifiques (vis-à-vis du déroulement d'une éruption par exemple).

Depuis vingtaine d'années, les travaux conduits par des géographes se multiplient dans ce domaine pour les menaces naturelles ou technologiques. Sous ces deux appellations que sont la perception ou la représentation du risque, ces travaux complètent, ou se distinguent souvent de ceux des psycho-sociologues par une analyse des différenciations socio-spatiales et un travail de spatialisation pouvant conduire soit à des cartes intégrées de facteurs de vulnérabilité humaine (D'Ercole, 1991 ; D'Ercole & Metzger, 2001 ; Gaillard et al., 1998), soit à des cartes de représentation mentale d'un espace de danger potentiel (D'Ercole & Rançon, 1999 ; Bonnet, 2004 ; Mas, 2007 ; Cronin et al., 2004 ; Haynes, 2004), ou de déroulement d'une crise (Dymon & Winter, 1991 et 1993 ; Monmonier, 1997 ; Alexander, 2004).

Nos travaux sur les Antilles ont permis d'éclairer des états de représentation globale pour trois risques (sismique, cyclonique et volcanique), considérés comme majeurs par les scientifiques et cités comme étant les plus graves par la population (88%, 85% et 83%) (**figure 2.19**). Cette analyse comparative contribue à définir le niveau de conscience du risque d'une communauté antillaise *a priori* expérimentée, préparée et informée.

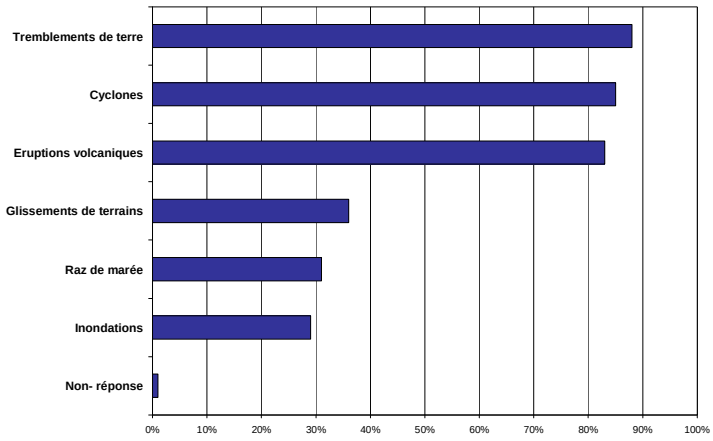


Figure 2.19. Les phénomènes naturels perçus comme les plus graves en Martinique (n=129)

Nous avons vu dans l'exposé méthodologique précédent que cette analyse est fondée sur 3 campagnes d'enquêtes et la mise au point d'une méthode de travail originale et pseudo-quantitative basée sur 10 facteurs psycho-sociologiques de vulnérabilité évalués par une soixantaine de questions clés. Le traitement et la pondération des réponses nous ont permis de définir pour chaque facteur et pour chaque aléa, un indice synthétique de représentation collective des risques (IRCR) (*cf.* **annexe 10**). Les facteurs sélectionnés sont jugés déterminants dans la capacité d'un individus ou d'un groupe à affronter une crise. Il s'agit :

- De la capacité de détection du phénomène (perception sensorielle) ;
- Du niveau de connaissance et de représentation du phénomène ;
- De la qualité de la représentation du risque (menace, effets et espaces affectés) ;
- Du niveau de connaissance et d'application des dispositifs de prévention et de protection ;
- Du niveau d'adaptation des comportements potentiels ;
- De la capacité d'initiative dans la recherche d'information et de protections ;
- Du niveau de confiance dans les autorités ;
- Du sentiment de sécurité ;
- De la qualité de la mémoire des évènements historiques ;
- Du degré de persistance de croyances sur les causes, les responsabilités, les effets, et les solutions.

Le choix de ces facteurs concorde avec le modèle psychosociologique d'auto-protection face aux menaces naturelles proposé par de Vanssay (2001) et selon lequel l'individu doit se sentir personnellement concerné et impliqué pour qu'un système de gestion des risques puisse fonctionner.

Nous avons également mis à profit les enseignements des premières expériences de ce genre (diagnostics de vulnérabilité humaine face aux menaces naturelles) menées par des géographes français ou suisses sur les flancs du volcan Cotopaxi en Equateur (D'Ercole, 1991), sur la ville de Quito (D'Ercole & Metzger, 2001), sur les quartiers de Manizales en Colombie (Chardon, 1996), dans les Alpes (Schoeneich & Busset-Henchoz, 1998), sur les versants du Mt Pinatubo aux Philippines (Gaillard et al., 2001), sur les îles de la Martinique et de la Dominique (Mavoungo, 2006). Les lignes qui suivent développent les caractéristiques de chacun de ces facteurs vis-à-vis des trois risques étudiés. Notre tentative de comparaison sera ensuite quantifiée au moyen de l'indice de représentation collective des risques (IRCR).

Capacité de détection du phénomène (perception sensorielle) (IRCR = 2,25)

Elle a été appréhendée pour les risques cycloniques et sismiques seulement. Cette capacité tient à plusieurs variables liant l'homme à son environnement immédiat. La perception de signes annonciateurs de perturbations particulières tient au vécu, à la connaissance et à l'expérience de la nature et à un certain intérêt, ou une certaine sensibilité, exprimée pour cette dernière. Avoir la capacité de détecter ces signes de changement de la nature peut s'avérer être une opportunité pour anticiper une fuite ou d'autres comportements de protection. Dans le cas des séismes, certaines personnes sont sensibles au grondement particulier émis par les ondes premières de compression. Si le lien est établi entre ce bruit et le séisme, les personnes en question ont théoriquement le temps de se protéger (quelques secondes) avant l'arrivée des ondes de cisaillement et de surface, celles qui entraînent le gros des dommages. Sans avoir pu déceler ce niveau de perception fine du séisme, notre enquête a révélé une très bonne prise de conscience de la manifestation d'un séisme (96%), sur le moment ou quelques secondes seulement après les secousses (**figure 2.20**.). Séisme qui a été ressenti par la totalité de l'échantillon mais sans pour autant déclencher des réflexes de protection adaptés, nous le verrons plus loin.

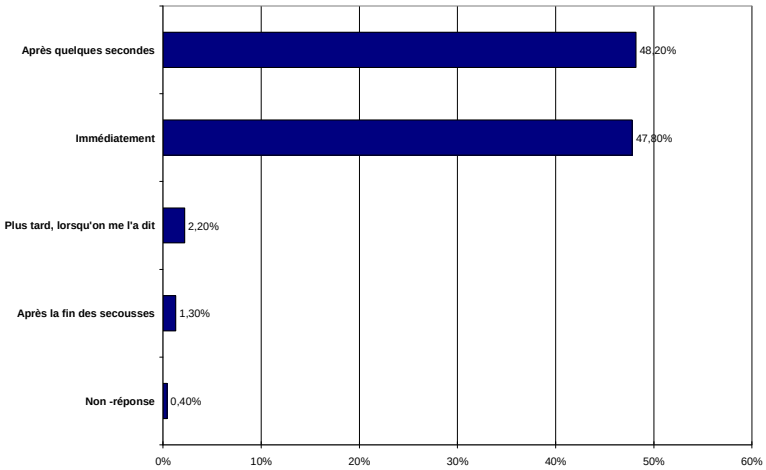


Figure 2.20. Délais de reconnaissance du séisme du 8 juin 1999 (n=224)

Dans le cas du cyclone, seulement un tiers des personnes a réellement pu théoriquement anticiper l'arrivée de la houle destructrice par détection de certains signes précurseurs (passage d'oiseaux venant du large, état de la mer), notamment chez les quelques pécheurs interviewés.

Connaissance et représentation du phénomène (IRCR = 1,75)

Un certain état des connaissances et des représentations mentales a pu être établi pour les trois risques. On est parti du principe logique que plus un phénomène est connu, dans sa probabilité d'occurrence, sa localisation potentielle, son déroulement général, et ses effets, et meilleure en sera la capacité des individus à y faire face, réduisant ainsi et aussi l'effet de surprise face à des phénomènes inattendus. Cette analyse est également un moyen d'identifier

les facultés, ou capacités d'intégration et de compréhension de discours scientifiques, et par là même apprécier l'efficacité et la pertinence des messages et des consignes diffusées par les autorités. Au sujet du séisme, les personnes ont majoritairement démontré une très bonne connaissance de la magnitude du phénomène (71,4%) et de la possibilité de répliques (61,6%). Par contre peu de personnes ont su localiser, même approximativement (33%), la source de l'évènement.

Pour ce qui est du risque volcanique, la représentation générale des phénomènes susceptibles de se manifester en cas de future éruption de la Montagne Pelée est mauvaise, et ce malgré les traumatismes laissés par l'éruption de 1902 et la popularisation du terme de « nuée ardente » pour décrire certains écoulements pyroclastiques. Ces éruptions passées (1902 et 1929) ont montré la prédominance des phénomènes de coulées de boues et de nuées dans le dynamisme éruptif actuel de la Montagne Pelée. Or les personnes interrogées évoquent essentiellement les coulées de laves liquides (64%) pour décrire une future éruption, suivies certes des retombées cendreuses (40%) et de fumerolles (40%) (**figure 2.21**). Ce constat a déjà été souligné par D'Ercole et Rançon (1999) à l'occasion de la première enquête de ce type menée en 1993 sur la façade Ouest de la Montagne Pelée (Prêcheur, Saint-Pierre, Morne Rouge). Il souligne l'influence des images spectaculaires véhiculées par les médias à propos des volcans « rouges » (Piton de la Fournaise, Hawaï) sur les représentations collectives du volcan. Rappelons que la Montagne Pelée, archétype du dynamisme Péléen, n'a jamais connu de coulées de lave au cours de son histoire récente, mais seulement des dômes intrusifs surmontées d'aiguilles, et à la base desquels ont pris naissance des écoulements pyroclastiques (aérosols incandescents). Paradoxalement, il révèle aussi un souvenir finalement très abstrait de ce qu'à pu être la célèbre et très documentée catastrophe de 1902, pour des générations qui n'ont pas connu de crises éruptives mais qui ont pourtant été confrontées indirectement à l'éruption péléenne voisine de la Soufrière de Montserrat (depuis 1995). Les communes enquêtées ici (nord-atlantique) n'ont certes pas connu les effets dévastateurs de Saint-Pierre, mais plusieurs coulées de boues (lahars) se sont manifestées sur leur territoire à l'occasion des deux dernières éruptions magmatiques de 1902 et 1929. Or, ce phénomène est à peine cité (5%) malgré son caractère très probable et très dommageable sur les communes de l'enquête situées à l'embouchure de plusieurs cours d'eau descendant de la montagne Pelée. D'autres questions ont permis de préciser cette connaissance du phénomène volcanique. Elles indiquent notamment une mauvaise appréciation de la durée d'une éruption même si les personnes sont conscientes que son paroxysme sera précédé de différents phénomènes d'intensité progressive. Par contre, la majorité sait que la Pelée est le seul volcan actif et dangereux de l'île (68%) tandis que la moitié (54%) seulement sait que l'éruption prendra naissance au sommet du volcan.

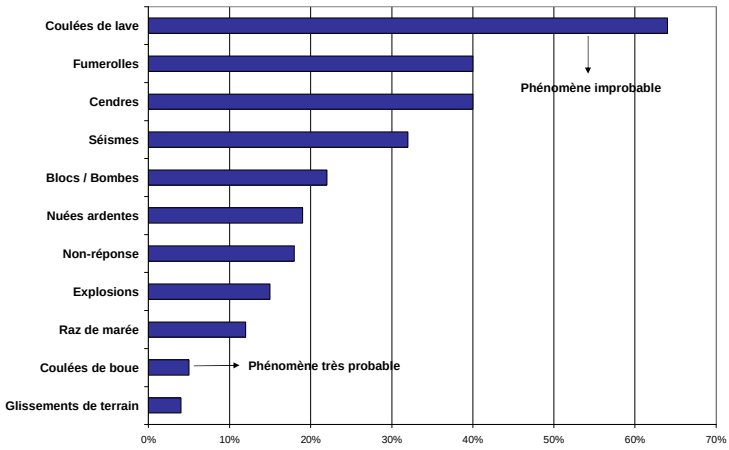


Figure 2.21. Les phénomènes volcaniques les plus souvent cités en cas de future éruption de la Montagne Pelée (n=129)

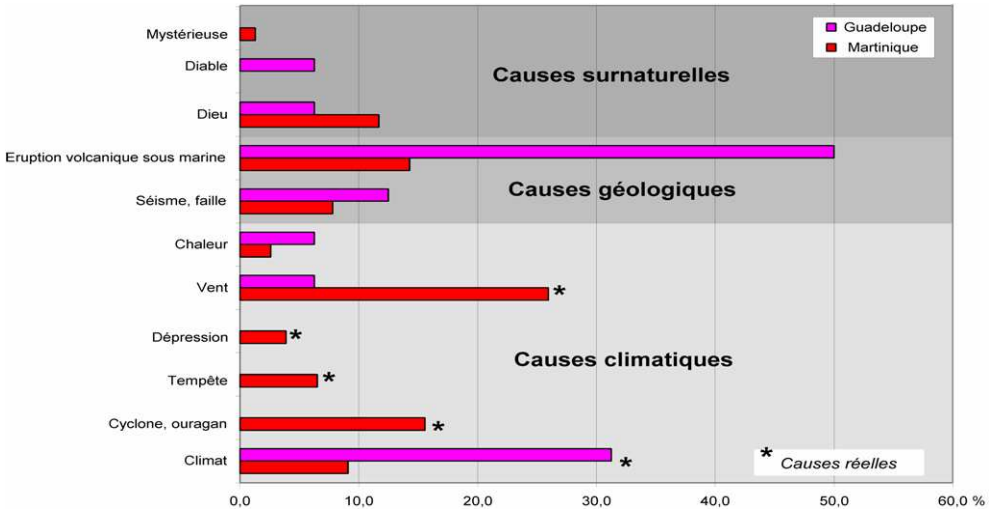


Figure 2.22. Les causes avancées pour expliquer l'origine de la houle du cyclone Lenny de novembre 1999 (n=200)

En matière d'aléa cyclonique, l'analyse des connaissances a porté essentiellement sur la recherche des causes de la houle générée par le cyclone Lenny, sur la nature des phénomènes généralement associés à un cyclone et sur l'appréciation des « saisons » cycloniques. Il apparaît pour le premier point que les causes climatiques sont certes avancées, mais dans de faibles proportions alors qu'au moment de l'enquête plusieurs mois s'étaient écoulés depuis Lenny et de nombreuses explications avaient été données par les médias sur l'origine de cette houle (**figure 2.22.**). Curieusement, une cause d'origine volcanique sous marine a été citée dans des proportions non négligeables (14,3%), mais moindres qu'en Guadeloupe (50%), juste avant l'explication divine (11,7%) et autres causes surnaturelles. Par ailleurs, le cortége d'aléas habituellement associés à un cyclone est mal connu, la houle et les inondations étant cités dans de faibles proportions (16,8% et 3,6%), après le vent (46%) et la pluie (34%), tandis que les glissements de terrain ne sont pas du tout évoqués. Les meilleures représentations, du moins celles qui s'écartent le moins des réalités, concernent surtout les fenêtres temporelles d'apparition des cyclones. Même si la notion de saison cyclonique n'a qu'un sens relatif, au regard des statistiques, la majorité des cyclones intervient entre juillet et novembre même si des évènements peuvent survenir à d'autres moments. Cette réalité objective de l'activité historique est relativement bien perçue par la population comme le montre la confrontation statistique entre les mois les plus souvent cités et ceux ayant connu des cyclones depuis 1886 (**figure 2.23**). Conformément à la réalité, août, septembre, octobre et novembre sont les quatre mois les plus concernés et cités, tant en Martinique qu'en Guadeloupe, mais avec une sous estimation de l'activité en Martinique pour août par rapport à celle de septembre. Du point de vue de la population, la fenêtre cyclonique apparaît plus large (de juin à décembre), constat qui peut favoriser des attitudes de vigilance en dehors de la saison officielle décrétées par la préfecture, de juillet à novembre, et durant laquelle se concentre l'essentiel de l'information préventive.

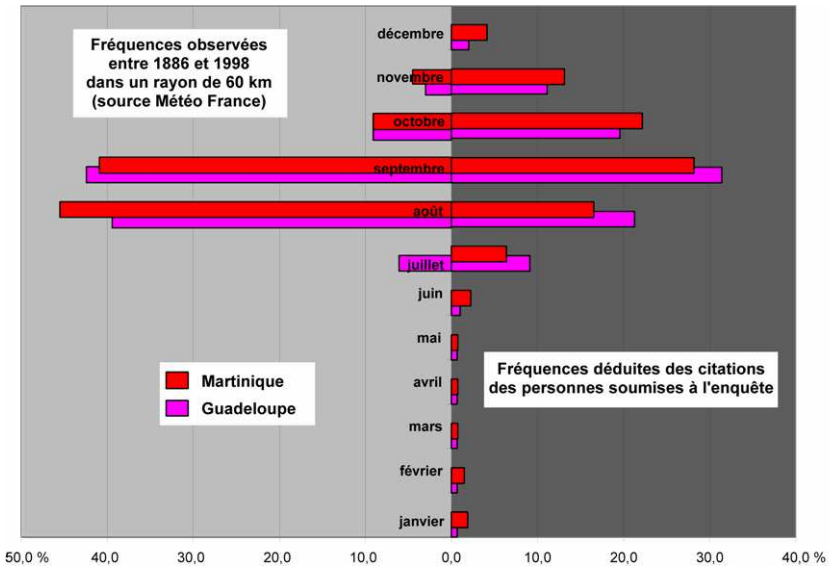


Figure 2.23. Confrontation statistique entre les fréquences cycloniques mensuelles réelles et les citations des mois les plus menacés (n=200). Etat de la représentation temporelle du phénomène cyclonique.

Représentation du risque (menace, effets et espaces affectés) (IRCR = 2)

Nous avons distingué dans cette étude, la représentation générale du phénomène (de l'aléa) de celle de ses effets potentiels (du risque), tant en intensité qu'en localisation. La représentation du risque et sous entendue « pour soi », et les questions posées pour la cerner ont été conçue de manière à mettre le personne en situation, dans l'hypothèse d'un évènement pouvant l'affecter, directement ou indirectement. Là aussi, l'analyse de ce risque perçu à travers ses effets et les espaces potentiellement affectés, permet de se faire une idée de la propension des individus à gérer une crise dont le scénario a été imaginé, ou plus rarement déjà vécu. Ces représentations du risque ont été cernées différement suivant les enquêtes et donc les aléas étudiés (volcan et cyclone). Les séismes n'ont pas l'objet d'analyse de ce type, l'enquête ayant été surtout orientée au départ vers l'analyse du vécu du séisme de juin 1999. En matière de volcan, deux questions ont permis de mieux cerner la représentation du phénomène à travers ses effets potentiels. Il s'agissait de citer les phénomènes considérés comme étant les plus dangereux pour les biens et pour les personnes. Les résultats recoupent ceux obtenus précédemment, mais avec beaucoup plus d'incertitudes (30% et 26% de n.s.p.). Là encore, les coulées de laves sont le plus souvent citées (24% et 16%), suivies des séismes (19%) pour les biens et des gaz (12%) pour les personnes. Ces réponses ne sont qu'en partie correctes, et une fois de plus les nuées ardentes sont à peine évoquées (2% et 11%) et les lahars ignorés, malgré leurs potentiels destructeurs et leur classement mondial en premières positions des phénomènes volcaniques les plus meurtriers (nuées et lahars) (Witham, 2005).

Par ailleurs, des résultats très intéressants sont apparus, notamment au regard de la représentation mentale des espaces exposés. Ainsi, et en suivant le protocole méthodologique développé par D'Ercole & Rançon (1994 & 1999), réemployé par Bonnet (2002), nous avons obtenu une synthèse cartographique des représentations mentales et collectives des espaces pouvant être affectés par une future éruption de la Montagne Pelée. La méthode consiste à calculer automatiquement (après géoréférencement dans un SIG des cartes individuelles) les pourcentages de citation (de représentation) d'un espace donné. La **figure 2.24.** présente la

synthèse globale des réponses de 103 personnes situées sur les quatre communes étudiées. La carte met ainsi en évidence un double gradient, à la fois nord-sud, mais aussi ouest-est dans la représentation collective des espaces menacés. En confrontant cette représentation mentale aux connaissances acquises par les volcanologues, il apparaît de la sorte que si le gradient nord-sud correspond bien à certains dynamismes éruptifs de la montagne Pelée – l'intensité des phénomènes décroissant avec la distance au volcan – il ne s'applique pas à tous les phénomènes. Les coulées pyroclastiques, les raz de marée et les lahars peuvent affecter avec un maximum d'intensité des zones pourtant distantes du volcan. Le gradient ouest-est constitue quant à lui plutôt une distorsion historique de la réalité. En effet, le souvenir de la destruction de Saint-Pierre par des nuées ardentes en 1902, tend à surestimer les risques vers l'Ouest au détriment de l'Est. Les populations de la côte Est ont tendance à penser qu'elles sont en effet beaucoup moins exposées. Elles occultent ainsi les dégâts importants provoqués par des lahars ayant affecté le flanc oriental également en 1902, de même que l'éventualité d'éruptions pliniennes. Par ailleurs, une autre question au sujet des régions habitées les plus menacées corrobore ce diagnostic. Le secteur de Saint-Pierre est le plus cité (84%), suivie du Morne-Rouge (64%) et du Prêcheur (46%), deux autres communes fortement affectées en 1902. Les communes enquêtées ne sont citées qu'à hauteur de 30%. Ces résultats rejoignent parfaitement ceux obtenus par D'Ercole & Rançon (1999) avec les mêmes questions, mais les implications des réponses ne sont pas les mêmes, en terme de vulnérabilité, pour des populations qui se croient majoritairement à l'abri sur le flanc nord-est de la Montagne Pelée et qui repoussent le danger vers des secteurs sinistrés dans le passé.

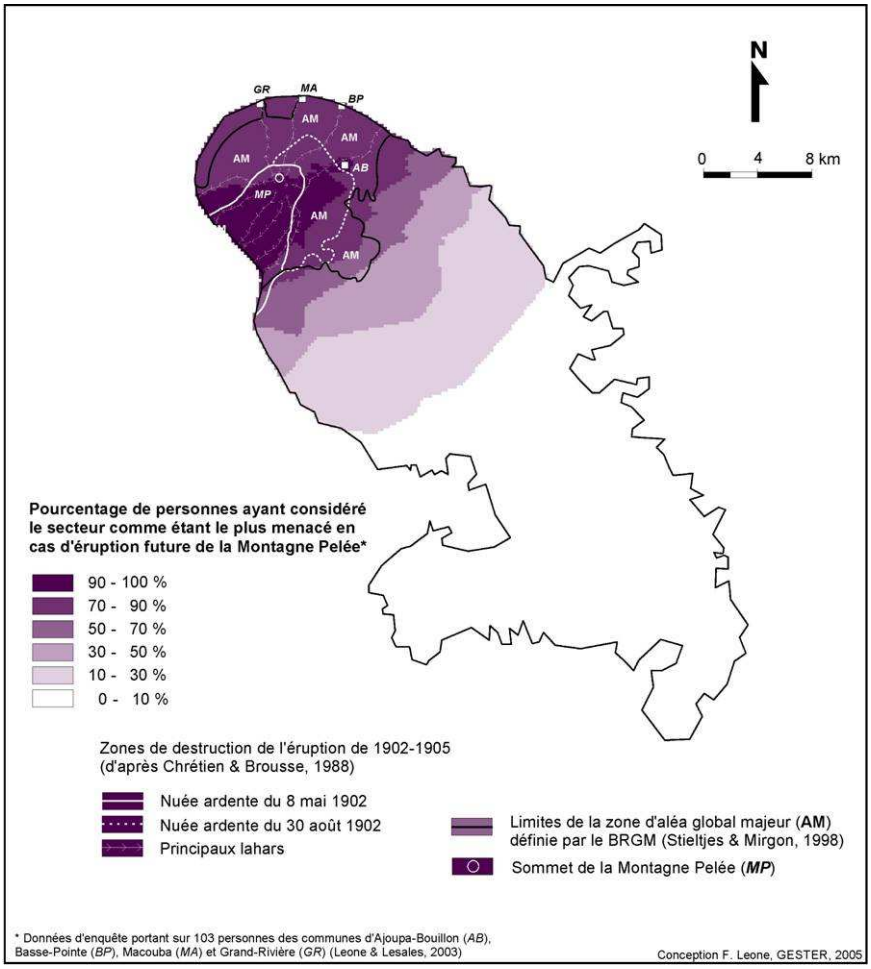


Figure 2.24. Carte de la représentation collective des espaces menacés par une éruption future de la Montagne Pelée (Leone & Lesales, 2006). Populations du Nord-Atlantique (n=103).

En matière de risque cyclonique, l'analyse des représentations des espaces vulnérables s'est faite au moyen de questions fermées pour distinguer laquelle des deux îles françaises était perçue comme étant la plus exposée. A juste titre, si on se fie aux fréquences historiques (**figure 2.11**), la Guadeloupe est la plus citée par l'échantillon martiniquais (42,4%), contrairement aux Guadeloupéens qui estiment à 45,9% que la menace est identique sur les deux îles. Par contre, une analyse plus fine des représentations spatiales, montre que les martiniquais ont du mal à localiser des espaces plus vulnérables que d'autres sur leur île. Ils sont seulement 10% à citer la totalité de l'île (sans distinction d'aléas) et 4% à envisager que le littoral puisse être un lieu de risque privilégié du fait des effets conjugués de la houle et des inondations et de la présence de nombreux enjeux. Par ailleurs, il apparaît clairement que la majorité des personnes enquêtées (57,6%) a conscience de prendre un risque en vivant si près de la mer en cas de cyclone. Cet état de conscience doit être pris comme un facteur positif en terme de représentation du risque et d'adoption de comportement potentiels adaptés face au danger.

Connaissance et application des dispositifs de prévention et de protection (IRCR = 2,11)

Selon nous, l'analyse des représentations ne doit pas se borner au phénomène et à ses effets, mais doit être considérée sous une acception plus large, englobant par là même d'autres aspects, cognitifs et comportementaux qui vont peser sur la vulnérabilité intrinsèque des individus. Ainsi, la connaissance des dispositifs de prévention et de protection est un moyen de préjuger de l'état de préparation des personnes en cas de crise, au même titre que les facteurs précédents. Cet état des connaissances a pu être appréhendé pour les trois aléas étudiés. Il est jugé plutôt moyen vis-à-vis des menaces cycloniques et volcaniques et très mauvais pour les séismes. Pour les cyclones, les points forts portent sur la connaissance des trois phases de l'alerte cyclonique et sur les dispositions à prendre. Manifestement le discours préventif a porté ses fruits après des années d'effort de la part des autorités et quelques « rappels cycloniques ». Paradoxalement, si ces consignes sont bien intégrées pour les représentations classiques du cyclones avec vent et pluie, il en va autrement pour la houle, phénomène mal perçu et contre lequel peu de dispositions ont été prises lors du passage de Lenny. Par ailleurs, on constate un certain fatalisme dans l'évocation des mesures de protection physique. La grande majorité des personnes pense, pas forcément à juste titre, qu'il est impossible de se protéger des effets du vent (67%), de la houle (70,4%), des inondations (78,4%) ou des glissements de terrain (67,5%). Point positif des connaissances, les personnes enquêtées mesurent bien l'importance du maire (75%) et de ses conseillers (17,9%) dans la gestion locale du risque, au détriment du préfet (7,1%), représentant légal de l'Etat.

Vis-à-vis du volcan, les quelques questions orientées vers ces aspects ont montré une très bonne connaissance (87%) du dispositif de surveillance assuré par l'Observatoire Volcanologique de la Montagne Pelée (OVMP) dont le directeur (désormais la directrice) incarne la prévention du risque volcanique en Martinique pour la majorité de la population. Par contre, la capacité de prévoir le réveil du volcan (au jour de l'enquête) est surestimée (39%, contre 36%). Il se peut néanmoins que cette question ait mal été comprise et que les 39% concernent des personnes ayant conscience qu'il est possible de prévoir le réveil d'un volcan en général, comme ce fut le cas pour Montserrat, 2 ans à l'avance. Enfin, 37% des personnes ont une certaine idée de la façon dont on peut se protéger d'une éruption volcanique (au moins par la fuite), ce qui peut attester d'un peu moins de fatalisme à l'égard de ce phénomène prévisible longtemps à l'avance, contrairement aux cyclones ou aux séismes.

Dans le cas du risque sismique, l'application ou non des consignes de protection, pendant et juste après les secousses a été évaluée dès le lendemain du séisme de juin 1999. Malgré une bonne connaissance générale des réflexes qui sauvent en cas de séismes (Mavoungo, 1997) cet évènement (dernier séisme fortement ressenti d'intensité V) a révélé d'énormes lacunes dans la capacité des individus à retranscrire physiquement ces consignes élémentaires, pourtant régulièrement rappelées par les autorités, comme en témoigne le corpus de documents d'information préventive rassemblé sur la **figure 2.26**. Notre enquête concernait uniquement des personnes se trouvant à l'intérieur de bâtiments au moment des fortes secousses. Elle a montré une grande majorité de comportements inadaptés au moment des secousses (79,6% : fuite, immobilisme) et juste après les secousses (57,5% : téléphoner, pas d'évacuation, pas de coupures des réseaux) (**figure 2.25**). Ce constat doit interpeller les autorités sur la nécessité de renforcer les campagnes d'information préventive par des exercices pratiques de mise en situation et des simulacres d'évacuation. Trop de décalage existe encore entre des connaissances théoriques et leur mise en pratique, par manque d'entraînement ou par peur du ridicule ! Par ailleurs, il apparaît que ces personnes n'ont majoritairement prises aucune disposition préventives à leur domicile (70,1%), même les plus élémentaires comme la fixation des objets lourds, ce qui semble traduire soit une méconnaissance de ces mesures, soit une certaine négligence liée à un manque d'expérience d'évènement catastrophique

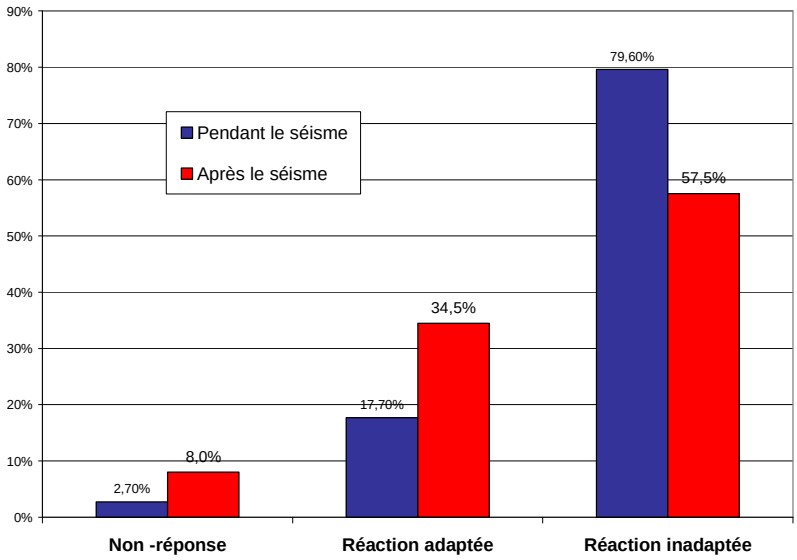


Figure 2.25. Qualité des réactions pendant et juste après les secousses du séisme du 8 juin 1999. Personnes situées à l'intérieur des bâtiments (n=224).

Figure 2.26. Différents documents d'information préventive sur le risque sismique aux Antilles (photo. F. Leone, 2002).

Adaptation des comportements potentiel (IRCR = 0,67)

D'une manière générale, la qualité des comportements au moment d'une crise augmente les chances de survie. Ces comportements vont dépendre fortement des représentations *a priori* du phénomène et des connaissances acquises pour s'en protéger. Seulement dans le cas du risque volcanique, ils ont été appréhendés dans l'hypothèse d'une future éruption, donc en tant que comportements potentiels et intentionnels. Les principaux résultats de cette analyse rejoignent les observations de l'enquête précédente réalisée par D'Ercole et Rançon (1999) sur d'autres communes. Il apparaît qu'en cas de réveil de la montagne Pelée, 50% des personnes interrogées estiment vouloir évacuer spontanément avant que ne soit émis un ordre officiel, contre 36% qui attendraient cet ordre (**figure 2.27**). Si on constate *a priori* très peu de refus d'évacuation (2%), ce qui est bien, il faut rester très vigilant sur cette propension à l'évacuation spontanée. Elle n'est en effet pas prise en compte dans les scénarios d'évacuation officiels du Plan de Secours Spécialisé Volcan (PSSV). De tels plans de secours fonctionnent sur des schémas types, avec des secteurs à évacuer en fonction des seuils d'alerte prédéfinis, et on imagine la confusion qui pourrait régner un jour, si les autorités exigeaient l'évacuation de populations déjà en chemin… Côté positif, en cas d'évacuation et en espérant que tout le monde arrive à bon port, la grande majorité des personnes (67%) accepterait de vivre loin de chez elle autant que l'exigera la situation. N'oublions pas en effet, qu'une crise éruptive s'inscrit généralement dans la durée, sur des mois voire des années, avec des perturbations parfois irréversibles, et qu'il convient de s'y préparer, surtout sur un petit territoire insulaire aussi vulnérable.

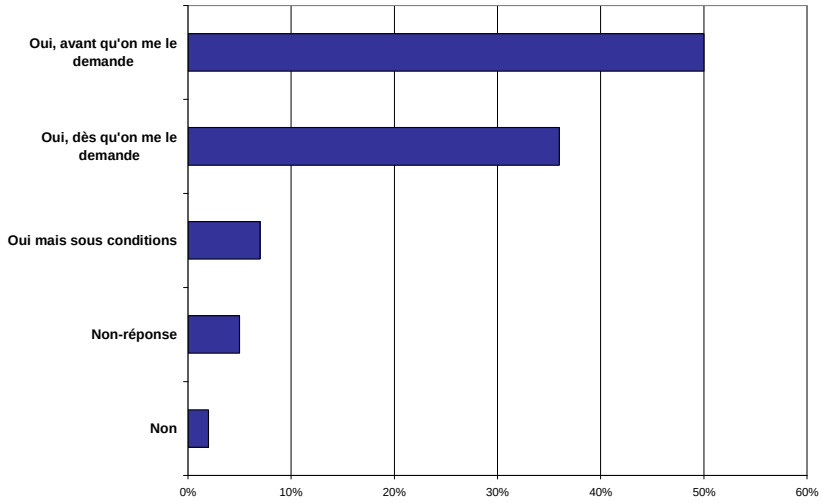


Figure 2.27. Comportements potentiels attendus en cas de demande d'évacuation face au réveil de la Montagne Pelée (n=129)

Capacité d'initiative dans la recherche d'information et de protections (IRCR = 2,23)

Adopter un comportement actif et volontaire dans la recherche d'information sur les risques c'est aussi un moyen de développer une culture de prévention et une conscience du risque. Cette capacité d'initiative, tant dans la recherche d'informations préventives que de mesures de protection individuelles a pu être cernée par quelques questions pour les trois aléas. Alors

même que les enquêtes ont fait ressortir une forte demande d'informations sur les trois risques, on constate que dans la pratique peu de démarches sont entreprises pour accéder aux documents existants. L'effet de surprise (84,8%) entraîné par la houle de 1999 peut s'expliquer en partie par ce manque d'initiative alors qu'un cyclone était pourtant annoncé sur la Caraïbe plusieurs jours auparavant. Lors du passage de la houle, 84,9% de l'échantillon déclarent ne pas avoir cherché d'explications sur ce qui était en train de se passer et sur ce qu'il convenait de faire. Le fait que plusieurs mois après cette houle, 91,4% des sinistrés enquêtés n'avaient pas pris de mesures spécifiques pour se protéger d'une future houle, peut également révéler un manque de curiosité sur les solutions envisageables, et un certain fatalisme face à un phénomène isolé (la houle), pas toujours bien relié à sa cause première, le cyclone. Pour les séismes, la recherche d'explications semble plus importante (69,2%), ce qui explique probablement de bonnes connaissances sur certains paramètres du séisme (magnitude), tandis que pour les éruptions volcaniques, 40% des foyers déclarent ne pas évoquer en famille les dangers associés au volcan (26% très rarement).

Confiance dans les autorités (IRCR = 2,5)

Le rôle des autorités dans la gestion des différentes phases d'une crise n'est plus à démontrer. Son efficacité va dépendre fortement du degré de confiance qu'en ont les populations, via en particulier le discours véhiculé par les médias. Cette confiance a été mesurée uniquement pour le risque cyclonique. La perception du travail des autorités en matière de gestion du risque cyclonique est assez mitigée (47% bien, 39% moyen, 6% excellent). Pour les autres risques, l'autorité et la compétence exercée par l'OVMP en matière de surveillance sismique et volcanique, semble bien acceptée, reconnue de tous et ce grâce à un effort de communication et de pédagogie soutenu de la part de la direction de l'observatoire (visites, conférences, communiqués de presse). Il faut également reconnaître aux médias martiniquais, un effort d'information quasi-permanent sur les risques naturels, sans catastrophisme exacerbé, basé notamment sur une bonne exploitation pédagogique des évènements locaux ou internationaux. Ce bon traitement médiatique du risque nous semble très profitable pour l'ensemble de la société antillaise et pour les autorités en charge de faire appliquer la réglementation et d'informer les populations.

Sentiment de sécurité (IRCR = 2,57)

Ce sentiment doit être interprété sous deux formes. Une mauvaise sensation de sécurité peut révéler une défaillance du soutien des autorités ou bien une fragilité propre aux individus. En tout cas elle doit attirer l'attention car elle peut être tout à fait justifiée dans un contexte de risque objectif. A contrario, un excès de confiance peut être préjudiciable, notamment à l'égard d'ouvrages de protection dont la résistance n'est jamais garantie totalement. Ce sentiment de sécurité, lorsque le risque est déclaré, peut aussi entraîner des résistances, par exemple à l'évacuation, en plus de l'attachement au lieu de vie qui peut aussi jouer sur des comportements réfractaires. Ce sentiment a été cerné plus ou moins directement au lendemain du séisme du 8 juin. Il est apparu que près de la moitié de l'échantillon se sentait en sécurité juste après le séisme (47,8%), alors que la possibilité de répliques était encore possible au moment de l'enquête et connue du plus grand nombre. Ces résultats peuvent être interprétés comme une bonne capacité à surmonter psychologiquement l'évènement pour la moitié des personnes interrogées. Par contre, près de 61 % des personnes interrogées estimaient ne pas être suffisamment préparés et informés pour affronter un séisme plus fort, résultats qui peuvent traduire indirectement une certaine défaillance de l'information préventive et un besoin de sécurité.

Qualité de la mémoire des évènements historiques (IRCR = 2,17)

L'état de la mémoire collective des évènements du passé est un bon indicateur du niveau de conscience de risque. Il est *a priori* plus facile de se projeter dans un évènement potentiel lorsqu'on en connaît les manifestations possibles tirées des enseignements du passé. Pour mesurer directement certains aspects de cette mémoire, nous avons orienté plusieurs questions sur les souvenirs d'évènements marquants, sur la localisation de leurs effets et sur leur date de survenue. Ainsi, seulement 48% des personnes savent que la Martinique a subi au moins un séisme très destructeur dans le passé avec de nombreuses victimes. La référence historique (également retenue pour les scénarios du BRGM, Martin et al., 1997) est celle du séisme de 1839, de période de retour estimée à 150 ans, et qui a probablement fait au moins 3 000 victimes (Leone, 2002 et Péray, 1991). Elle n'a jamais été citée !

Par ailleurs, le traitement statistique des années de manifestation réelles de séismes a été confronté aux dates citées sur la période 1950–1997 (**figure 2.28**). Ce traitement quantitatif montre une mémoire collective de la sismicité historique relativement partielle et sélective, avec 15 années qui ont été inventées, pour seulement 8 années citées sur 22 réellement concernées par des séismes fortement ressentis, de magnitude supérieure ou égale à 5. Les évènements des années 1969, 1970 et 1990 ont bien marqué les esprits.

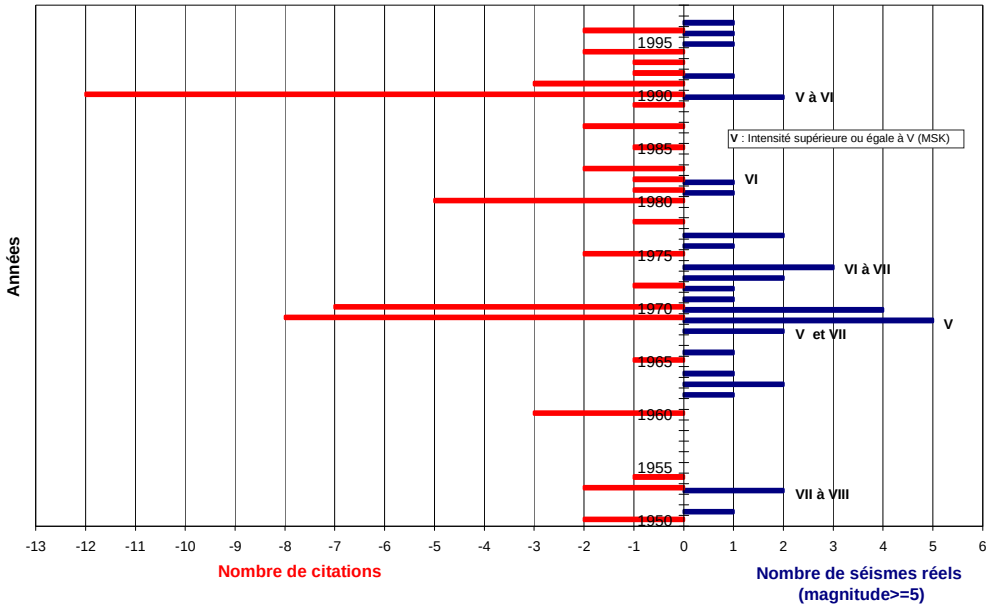


Figure 2.28. Confrontation statistique entre les fréquences annuelles de séismes réels et les citations des années sismiques. Etat de la mémoire collective des séismes (n=129).

En matière de risque volcanique, la mémoire des évènements dommageables est également partielle. Seulement 52% des personnes ont le souvenir des dégâts graves (36%) à modérés (16%) occasionnés par les éruptions antérieures. Il est vrai que les effets des lahars de 1902 (Chrétien & Brousse, 1988) sur les quatre communes étudiées ont été moins graves et moins relatés que ceux des nuées et des retombées de cendres sur Saint-Pierre, le Prêcheur ou Morne Rouge. Selon nous l'ignorance totale de la terrible éruption plinienne des années 1300 (Boudon & Villemant, 1997) et le caractère bénin des éruptions phréatiques de 1792 et 1851, ont fortement pesé dans la sous-estimation des phénomènes précurseurs annonçant le réveil de la Montagne Pelée en 1902. Mais comment pouvait-on demander en 1902, à une population

issue en majorité de l'esclavage, d'accorder une attention particulière à une montagne peu fréquentée et peu documentée, en l'absence de traces écrites des premiers habitants de l'île, de surcroît exterminés.

Pour ce qui est des cyclones, la mémoire des évènements semble également partielle. A la question « Selon vous, est-ce que l'île a déjà subi un cyclone très destructeur dans le passé, avec de nombreuses victimes ? », 38,7% répondent « oui », 34,4% n'en savent rien et 26,9% pensent que non. C'est effectivement ignorer dans de fortes proportions les effets destructeurs de près de 80 cyclones cyclones dévastateurs recensés depuis les premières traces écrites de la colonisation, et en particulier ceux de 1780, 1766, 1813, 1834, 1891, 1903, 1963, 1967, 1970 qui a eux seuls ont fait près de 10 500 victimes !

Persistance de croyances populaires (IRCR = 2)

L'analyse des croyances populaires n'a pas fait l'objet d'analyse quantitative. On peut cependant évoquer quelques rumeurs populaires persistantes en particulier sur les causes de certains phénomènes et sur leurs effets « catastrophiques ». Hormis le caractère divin et punitif souvent avancé pour expliquer ces manifestations de la nature, le déclenchement des séismes est parfois associé aux fortes chaleurs tandis que l'on entend parfois dire que la Martinique se coupera en deux ou bien qu'une partie de l'île va s'effondrer ou être engloutie en cas de gros séisme. Cette représentation imaginaire du phénomène est probablement à relier à la présence de grandes failles qui traversent l'île d'Est en Ouest. Mais dans les croyances les plus tenaces, qui sont associées à un grand fatalisme, apparaît la certitude qu'il est impossible de se protéger des effets des séismes. Or, il est bon de rappeler que ce ne sont pas les séismes qui tuent directement, mais l'effondrement des bâtiments mal conçus (**figure 2.29.**)…

Figure 2.29. Dessin humoristique donnant un aperçu des croyances populaires en matière de protection contre les séismes en Martinique (source France Antilles, 1999)

Synthèse quantitative

Sans prétendre à l'exhaustivité, les différents indicateurs psycho-sociologiques décrits à travers cette analyse des facteurs de représentations collectives, permettent de dresser un tableau comparatif de l'état de la vulnérabilité intrinsèque de la population martiniquaise face aux trois risques majeurs retenus (**tableau 2.8.** et **figure 2.30**). La pondération de ces indicateurs montre que c'est pour le risque volcanique que cette forme de vulnérabilité humaine est la plus élevée (IRCR=2,18), suivi de près par le risque sismique (2,14) et de plus loin par le risque cyclonique (1,84). Cette approche pseudo-quantitative et indicative confirme des impressions d'ensemble qui se dégagent de 5 années passées au sein de la société antillaise (1996-2001). Autrement dit, c'est pour affronter le risque cyclonique que la population semble la mieux préparée, psychologiquement parlant, tandis que les deux autres risques, plus abstraits car moins vécus, recueillent des perceptions, des connaissances et des comportements potentiels ou déclarés encore trop défaillants.

Tableau 2.8. Bilan quantitatif de l'état des représentations collectives des risques naturels en Martinique. Incidence sur la vulnérabilité humaine.

	IRCR / 3			
Facteurs de vulnérabilité humaine	**Risque sismique**	**Risque volcanique**	**Risque cyclonique**	**Total**
Capacité de détection du phénomène (houle)	1,5	x	3	**2,25**
Représentation et connaissance du phénomène	1,7	1,86	1,7	**1,75**
Représentation du risque (effets et espaces)	x	2,5	1,5	**2**
Connaissance et application des dispositifs de prévention et de protection (dont consignes)	3	1,7	1,63	**2,11**
Adaptation des comportements potentiels	x	2	x	**0,67**
Confiance dans les autorités	x	x	2	**0,67**
Sentiment de sécurité	2,5	x	x	**2,5**
Capacité d'initiative dans la recherche d'informations et de protections	1	3	2,7	**2,23**
Qualité de la mémoire	2,5	2	2	**2,17**
Persistance de croyances	2	x	2	**2**
IRCR total / 3 :	**2,14**	**2,18**	**1,84**	

x : facteur non analysé

Si on retient uniquement les facteurs mesurés pour les trois aléas, c'est globalement au niveau des connaissances, de l'application des dispositifs de prévention et de protection (dont consignes), dans la capacité d'initiative dans la recherche d'informations et de protection, et la qualité de la mémoire que les déficiences sont les plus marquées.

Les nombreuses distorsions mises en évidence, entre les représentations collectives et les connaissances scientifiques acquises sur ces risques, doivent être comblées au moyen d'une stratégie préventive mieux ciblée. A notre avis, la priorité doit être donnée pour le risque sismique à la maîtrise des réflexes qui sauvent et à l'adoption de mesures simples au domicile, pour le risque volcanique à l'entretien d'une mémoire non-sélective et à la préparation d'une évacuation massive, et enfin pour le risque cyclonique à la préparation aux effets de la houle.

En conclusion, ce diagnostic permet de nuancer le niveau de conscience de trois risques naturels majeurs par la population martiniquaise et par ce biais avoir une idée de son aptitude à affronter collectivement de futures crises. Globalement, nous pouvons dire que cette conscience est bonne, malgré les lacunes constatées. Il reste à mener des comparaisons similaires avec d'autres communautés confrontées aux mêmes risques pour s'en assurer.

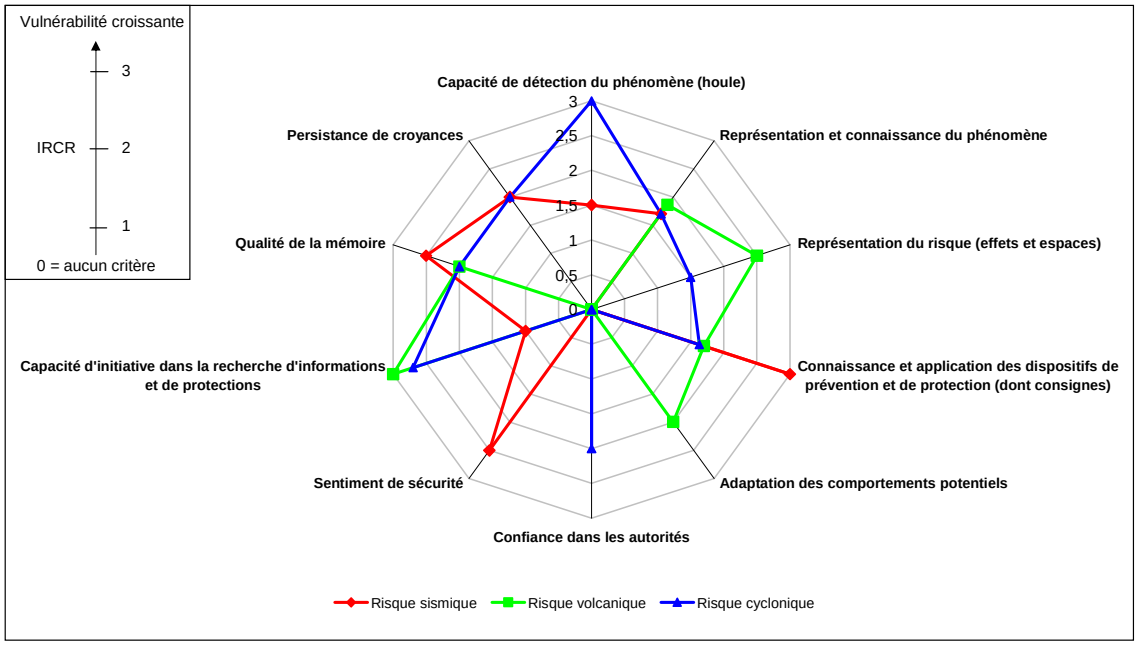


Figure 2.30. Synthèse graphique de la vulnérabilité humaine face à 3 menaces naturelles majeures en Martinique. Prise en compte de 10 facteurs psycho-sociologiques des représentations collectives des risques (IRCR).

Conclusion sur la situation antillaise

Ce diagnostic de vulnérabilité territoriale et humaine mené en Martinique au cours de nos différentes recherches permet de mesurer assez finement l'importance des risques encourus, tant à travers l'appréciation des enjeux présents (l'exposition) que celle des pertes potentielles pouvant survenir en cas d'éruption volcanique, de cyclone, ou de séisme majeurs. Le constat est alarmant, d'autant plus que les bâtiments sont en majorité de facture fragile au regard de la menace sismique en particulier et que les prévisions démographiques laissent entrevoir un effectif probable de 450 000 habitants en 2 010, contre 399 000 actuellement, du fait essentiellement du retour de migration depuis la métropole (source INSEE).

La Martinique et la Guadeloupe qui bénéficient des mêmes contextes géodynamiques, climatiques et socio-démographiques - avec une prédisposition encore plus forte aux cyclones et beaucoup plus d'enjeux en zone volcanique pour la Guadeloupe - sont deux exceptions françaises au regard des risques encourus. Les espaces exposés aux aléas naturels sont si importants proportionnellement à la superficie de ces îles que l'on est obligé de vivre avec ces menaces et par conséquent d'adopter des stratégies de prévention renforcées. Le traitement statistique des arrêtés d'état de catastrophe naturelle pris entre 1990 et 2000 suite à des cyclones démontre une fois de plus toute la fragilité de ces petits espaces insulaires (**figure 2.31.**).

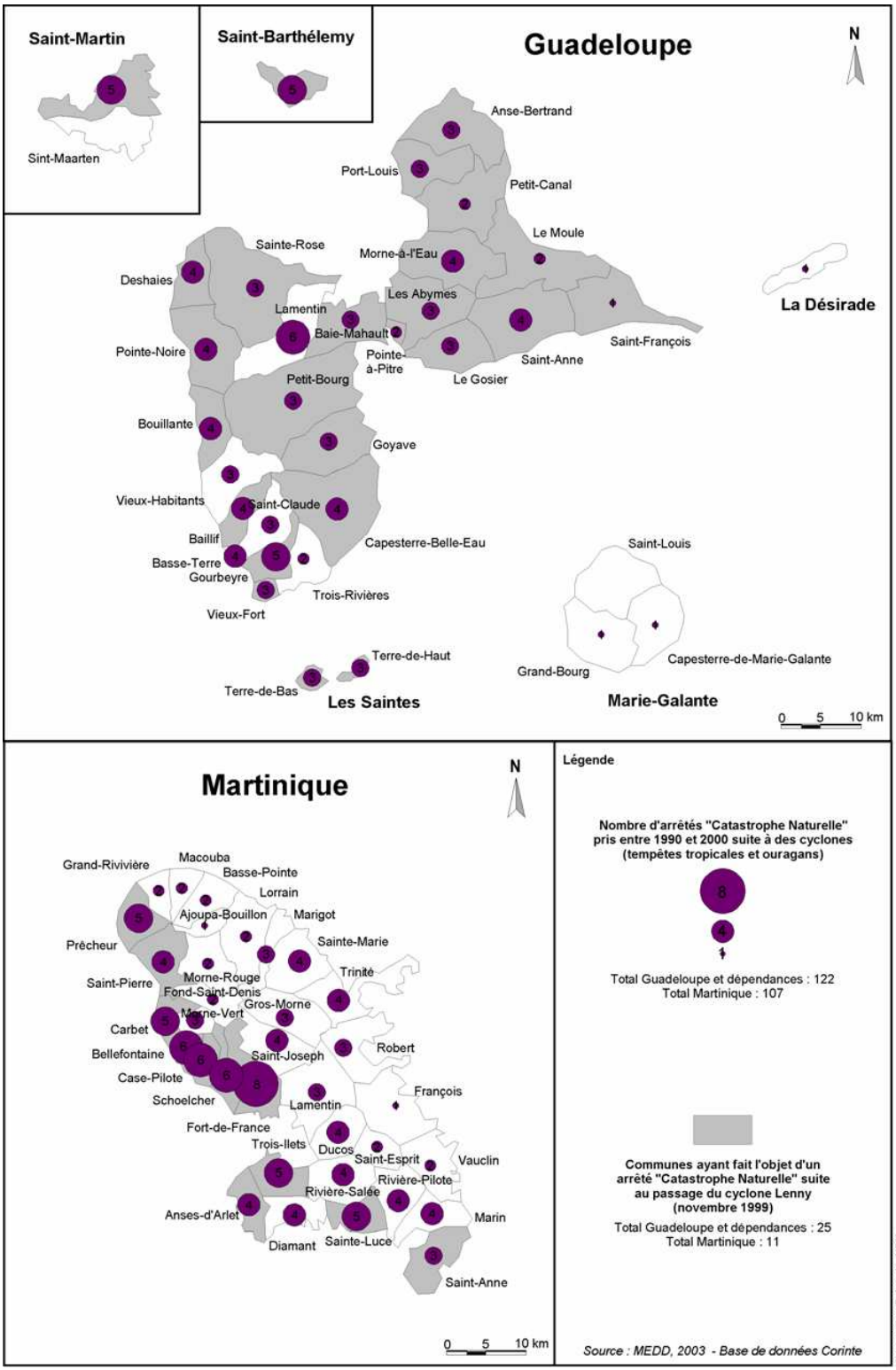


Figure 2.31. Etat des arrêtés cat. nat. pris en Martinique et en Guadeloupe à la suite d'un cyclone entre 1990 et 2000.

Passé le stade des inventaires de menaces et des études d'aléas qui a prévalu jusqu'à maintenant, cette prévention doit s'articuler sans attendre autour de trois grandes catégories d'actions et de mesures complémentaires les unes des autres : la protection des enjeux existants et futurs par la prescription de règles d'urbanisme et de construction adaptées ; la réduction des enjeux futurs en zone d'aléa fort par le biais d'une réglementation ferme et contrôlée de l'occupation du territoire ; la sensibilisation, l'information et la formation de tous les acteurs locaux et en tout premier lieu les populations pour améliorer leur perception et connaissance des risques, mais aussi favoriser des comportements adaptés en cas de crise.

C'est en renforçant cette véritable culture naissante de prévention et gestion des risques naturels, que les sociétés antillaises pourront réduire les conséquences de manifestations naturelles futures et faire l'économie de quelques catastrophes, condition indispensable du développement durable de ces petits espaces insulaires.

2.3. Conclusion

Nous avons vu dans cette partie la diversité des procédures de retours d'expérience pouvant être menées suite à un évènement de dimension catastrophique. Nos recherches se sont nourries de ces enseignements du terrain. Ces expériences participent à l'élaboration progressive d'une capacité d'expertise du risque que nous avons commencé à mettre en œuvre sur les territoires de la Martinique et de l'île de Luzon aux Philippines (Pinatubo). Cette expertise du risque s'est fondée sur des enquêtes, des observations et des analyses spatiales quantitatives assistées par des SIG. Pour mener à bien cette analyse, le chercheur doit se construire une représentation propre du risque et de ses effets qui soit la plus proche d'une future réalité. En cela, le vécu d'évènements déjà produits permet de réduire cette distorsion et de se préparer à des scénarios de catastrophes déjà imaginés. D'un point de vue scientifique, ces scénarios doivent être affinés et quantifiés de manière à exprimer les pertes potentielles dans des unités de valeur compréhensibles par tous, d'où le recours à une expression économique des dommages. Ce travail de quantification nécessite au préalable de construire des protocoles d'analyse compatibles avec les outils de la modélisation spatiale et quantitative disponibles. Le risque doit alors être considéré sous son acception mathématique et la vulnérabilité intégrée sous une forme synthétique donnée par son principal indicateur : le niveau d'endommagement potentiel. Cette mesure du risque qui passe par la modélisation prédictive des pertes potentielles est rendue complexe par la diversité des interactions possibles, directes et indirectes, entre le phénomène et les éléments exposés. Cette analyse de la vulnérabilité ne peut donc être dissociée d'une bonne connaissance de l'aléa dans ses processus d'endommagement comme va le montrer la troisième partie de ce mémoire.

PARTIE 3

L'INTEGRATION DE LA VULNERABILITE DANS LA MESURE DU RISQUE : APPROCHE QUANTITATIVE

3.1. Essai de formalisation analytique de la mesure du risque

3.1.1. Le risque au sens commun

Nous l'avons vu, les analyses de risque, technologique ou naturel, font appel à un certain nombre de concepts et notions apparemment bien établis mais auxquels correspondent souvent des divergences de définition qui peuvent devenir déroutantes pour le néophyte et même pour le spécialiste. Or il semble primordial, d'adopter un vocable commun indispensable à toute tentative d'harmonisation des politiques internationales de prévention, de gestion et d'évaluation des risques naturels. Dans cet esprit il semble aussi important de définir et structurer quelques-unes de ces notions, notamment les concepts fondamentaux de risque, d'aléa et de vulnérabilité suivant une approche analytique, préalable à toute tentative d'évaluation quantitative des pertes ou des dommages potentiels. Cette tentative de formalisation quantitative du risque est ici appliquée plus spécifiquement au cas des phénomènes naturels à effets rapides et dommageables observés ou analysés au cours de divers retours d'expérience. Il s'agit principalement des cyclones, des inondations, des mouvements de terrain, des séismes, des tsunamis et des éruptions volcaniques, phénomènes naturels qui ont entraîné au moins 107 000 victimes sur la période 1973-2002 (Thouret & Leone, 2003) (**figure 3.1.**). Dans ces approches quantitatives, la vulnérabilité sera appréhendée à travers le niveau d'endommagement potentiel d'un élément ou d'un groupe d'éléments exposés.

Le terme de risque a été popularisé par les médias depuis un certain nombre d'années déjà, notamment du fait de certaines menaces technologiques apparues avec le développement de l'énergie nucléaire et des premières analyses de risque qui en ont découlé (Rasmussen, 1974). Sa définition la plus précise et concise apparaît dans le dictionnaire Littré : « péril dans lequel entre l'idée de hasard ».
Il faut retenir de cette définition littéraire l'idée d'événement dommageable, de danger, de péril, de perte et celle d'aléa. En résumé, ce terme recouvre une dualité fondamentale réunissant deux notions indépendantes, celle de perte et celle de probabilité. Cette probabilité traduit les chances qu'a le phénomène de se matérialiser.

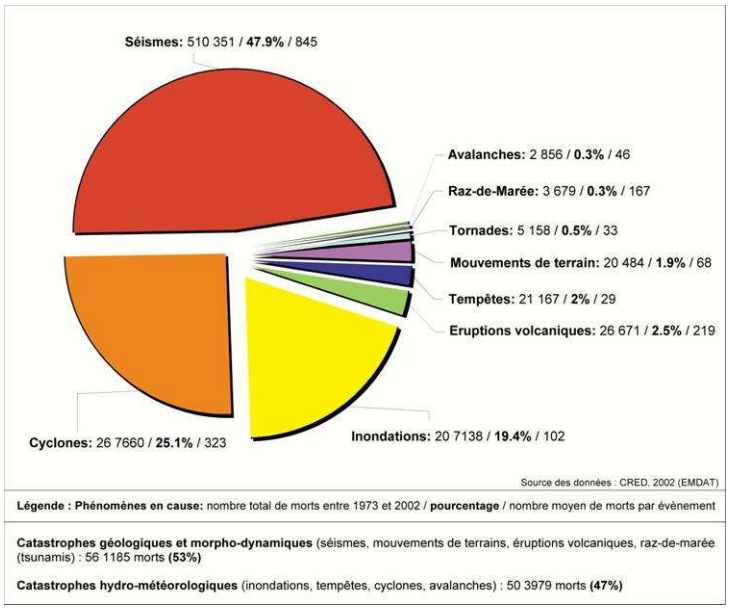


Figure 3.1. Classification des principaux aléas naturels dommageables en fonction du nombre de victimes sur 30 ans (1973-2002) (Thouret & Leone, 2003).

Certains glissements de sens sont apparus dans le domaine des sciences de la terre avec l'emploi abusif du terme « Risque naturel » qui semble être le plus souvent la mauvaise traduction du terme anglo-saxon "*Natural hazard*" et qui pour sa part a un sens beaucoup plus précis en désignant l'aspect aléatoire du phénomène naturel dommageable (l'aléa en français).

On considère généralement que le terme de **Risque encouru** est préférable au terme de risque tout seul ou de risque naturel, car il traduit mieux l'aspect virtuel des pertes attendues par une communauté ou une société donnée exposée à un phénomène potentiellement dommageable. Il s'agit bien du risque de perdre quelque chose, que cette perte soit humaine, économique ou de tout autre nature.

Le risque apparaît donc là où il y a possibilité de voir se manifester un phénomène naturel dommageable et où existent des éléments susceptibles d'être endommagés. Il en découlera une politique appropriée de prévention et de gestion mettant en œuvre des stratégies particulières de réduction ou d'élimination de ce risque après une évaluation consensuelle de son niveau d'acceptabilité (Asté, 1994).

3.1.2. Risque spécifique et risque global

Si on arrive à quantifier les deux notions de pertes et de probabilité d'occurrence pendant une période donnée, on peut exprimer le risque comme le produit des deux, ce qui correspond à la définition de l'espérance mathématique (Canceill, 1983). Le risque se traduit alors comme l'espérance mathématique des pertes ou du dommage. Ce principe est à peu près admis par un certain nombre d'organisations internationales mais son application semble difficile à mettre en œuvre dans le cas de phénomènes naturels souvent complexes. Cela tient à première vue à la difficulté :

– d'une part de comptabiliser dans une même unité les vies humaines perdues, les biens détruits, les atteintes à l'environnement, les préjudices sociaux, etc. ;

– d'autre part d'affecter à ces phénomènes une probabilité d'occurrence du fait de la méconnaissance et de la complexité des mécanismes mis en jeu.

On propose ci-dessous une tentative de formulation analytique du risque qui reprend les bases de celle avancée par Varnes (1984), précurseur en la matière. Cet essai théorique vise à structurer ce concept pour en dégager les composantes fondamentales qu'il faudra par la suite considérer pour toute tentative d'évaluation quantitative.

En supposant un élément exposé donné, le risque encouru par cet élément peut être appelé Risque spécifique ou unitaire **(Rs),** qui se distingue du Risque global **(Rg)** encouru par une communauté donnée constituée d'un ensemble de ces éléments exposés. Notons au passage que le terme « d'élément exposé ou vulnérable» est préférable à son équivalent anglo-saxon "*element at risk*" (Varnes, 1984), qui introduit trop prématurément la notion de risque.

On propose ainsi une définition du risque spécifique qui peut se définir comme l'espérance mathématique de l'endommagement d'un élément exposé donné (**figure 3.2.**) :

$$Rs = fct\ (Po, Pa, Pp) * D$$

avec : Po : probabilité d'occurrence du phénomène ;
Pa : probabilité pour que le phénomène atteigne l'emplacement de l'élément exposé ;
Pp : probabilité pour que l'élément exposé soit présent au moment où le phénomène l'atteint ;
D : niveau d'endommagement potentiel de l'élément exposé si le phénomène l'atteint (vulnérabilité).

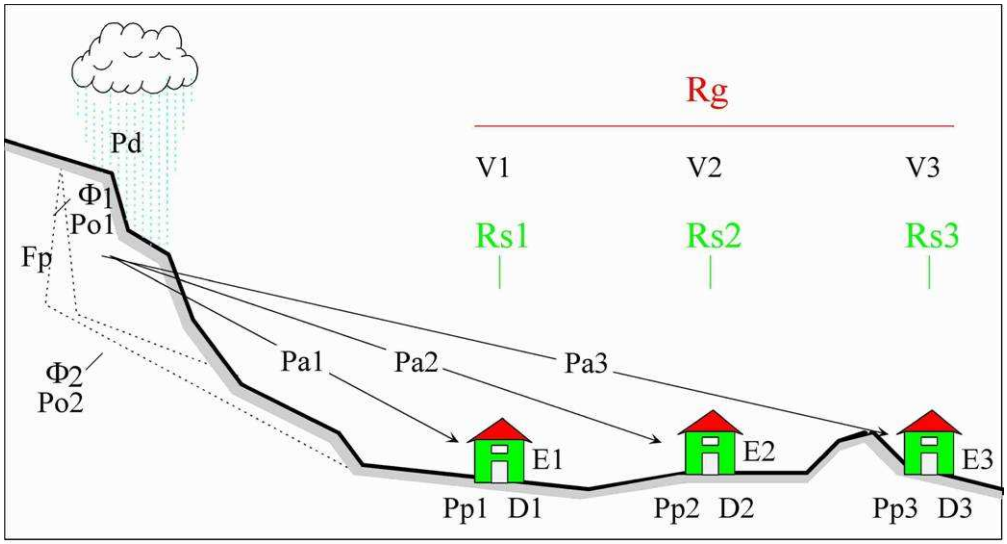


Figure 3.2. Illustration des différentes composantes entrant dans la mesure du risque : application au cas des phénomènes de mouvements de terrain (Leone, 1997).

La mesure de ce risque spécifique, à établir pour une période de retour donnée, s'effectue sur une échelle de valeurs comprises entre 0 et 1 valable aussi pour chacune de ses composantes. La valeur 0 correspond à un risque nul et la valeur 1 étant réservée à un risque maximal.

Cette définition se différencie de celle de Varnes (1984) par le perfectionnement de ce qu'il appelle la composante aléatoire du risque ou en d'autres termes l'Aléa («*Hazard H* en anglais) avec $Rs = H * D$. On introduit en effet ici deux nouvelles composantes dans la définition de cet aléa qui devient fonction de trois probabilités. Leur prise en compte est justifiée par le fait que si l'une d'entre elles est nulle, alors le risque spécifique s'annule à son tour :

– **Po est la dimension temporelle de l'aléa**. Cela correspond à la probabilité de voir se produire un phénomène potentiellement dommageable de magnitude donnée dans une période de temps et un secteur donnés. Dans le cas particulier des phénomènes de mouvements de terrain par exemple, cette occurrence du phénomène est fonction :

– *de facteurs de prédisposition* ou de présomption (facteurs dits permanents ***Fp***) : morphologie du terrain avec tous ses attributs, nature des matériaux, degré de saturation en eau, mode d'occupation du sol ;

– *d'une probabilité d'occurrence* ***Pd*** (au sens strict) de facteurs aggravants ou de déclenchement, qui sont soit naturels (conditions hydro-météorologiques, activités sismique ou volcanique), soit anthropiques (tr:avaux de terrassement, d'excavation ou de chargement, fuites de réseaux). Soit : ***Po = fct (Fp, Pd)***

– **Pa représente la probabilité pour que le phénomène atteigne l'élément exposé.** Cela suppose que ce dernier soit présent (Pp = 1) à ce moment-là. Pa correspond à une valeur relative calculée pour un élément exposé donné par rapport à un autre élément exposé. On peut parler de chance (ou de malchance !) qu'a le phénomène d'atteindre sa cible dans des conditions de déplacement données (**figure 3.3.a**). Par exemple, un élément exposé à des chutes de blocs aura plus de chance d'être touché s'il est situé sur la zone de réception des blocs (dans une cuvette par exemple), plutôt que sous la zone de propagation des blocs (en déplacements rebondissants) ou à l'arrière d'un obstacle. On peut même affiner le raisonnement pour l'élément répondant au premier cas. En effet, selon Ritchie (1963), la pente du talus influence le mode de chute du bloc et donc la probabilité pour que l'élément soit atteint (**figure 3.3.b**) : pour des pentes très raides, supérieures à 75°, le bloc qui se détache du haut du talus ou qui provient d'un fond supérieur, a de grandes chances d'effectuer une chute directe jusqu'au pied du talus sans impacts intermédiaires. Pour des pentes voisines de 65°, la probabilité d'impacts intermédiaires sur le talus avec rebondissements donnant au bloc une composante horizontale de vitesse le propulsant loin du pied du talus est beaucoup plus élevée. Il semble que ces valeurs de pente soient d'ailleurs les plus dangereuses au regard des trajectoires qu'elles engendrent. Enfin, pour des pentes plus faibles de 45 à 35°, les blocs auront tendance à rouler ou glisser sur la pente (LPC, 1978).

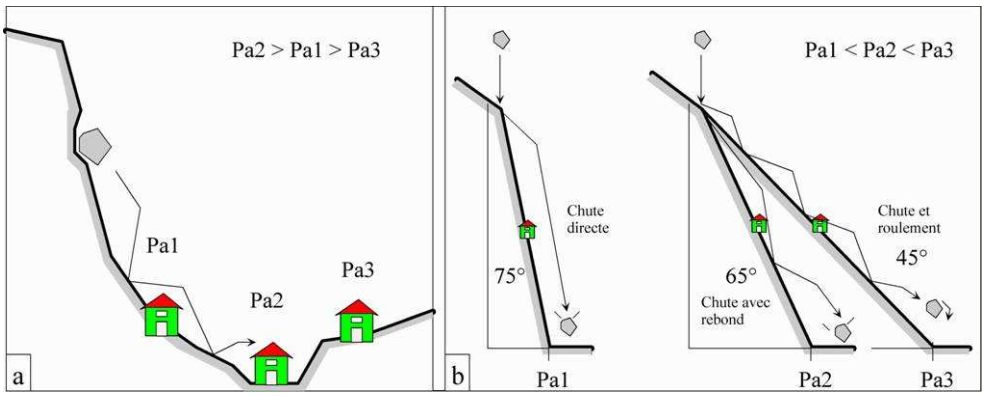


Figure 3.3. Probabilités Pa pour q'un bloc atteigne un élément exposé (a : suivant la position de l'élément, b : suivant la pente de la trajectoire) (Leone, 1997).

– **Pp caractérise la probabilité de présence de l'élément exposé** au moment où le phénomène se déclenche ou atteint cet élément. Cette composante s'applique préférentiellement aux éléments exposés mobiles tels que des personnes, des véhicules, etc. Par exemple, une personne qui circule sur une route aura moins de chance d'être touchée directement par un phénomène dynamique qu'une autre personne qui occupe en permanence une habitation exposée au même phénomène. Suivant l'échelle de temps à laquelle on raisonne pour évaluer un quelconque risque, et si celle-ci est importante, Pp permet d'introduire pour certains éléments structurels (matériels) fixes, la notion de durée de vie de l'élément. On peut prendre l'exemple d'une infrastructure routière prévue pour résister à un certain nombre d'années et pour laquelle on évalue un risque de destruction élevé du fait de l'imminence d'un écroulement rocheux. Le risque s'annule si cet écroulement rocheux survient au delà de la durée de vie prévue de cette infrastructure. Notons que la considération de Pp permet aussi de mesurer le risque encouru par des éléments inexistants mais programmés par des projets d'aménagement.

– **D représente le niveau d'endommagement potentiel de l'élément exposé** sous l'effet du phénomène pressenti de magnitude donnée. Il s'agit d'une expression synthétique de la vulnérabilité communément admise et adaptée à la mesure du risque et à sa cartographie. Cette conception de la vulnérabilité sera développée plus loin pour différents aléas naturels à travers les notions de matrices, de fonctions et de courbes d'endommagement.

Le passage au **risque global Rg** encouru par un espace exposé donné peut se faire en sommant les risques spécifiques des différents éléments présents sur cet espace, mais après traduction en taux de perte les niveaux d'endommagement D de chacun des éléments exposés. Cette quantification prend en compte la notion de valeur unitaire initiale, c'est-à-dire avant endommagement potentiel, de l'élément exposé. Cette valeur peut être de nature économique, humaine, ou fonctionnelle suivant la nature de l'élément considéré et les applications recherchées.

Le risque global encouru apparaît ainsi comme une quantification économique (monétaire), humaine ou fonctionnelle des dommages potentiels. On pourra alors parler de risque économique, humain ou fonctionnel suivant la nature des pertes considérées. Son expression analytique sera de la forme :

$$Rg = \sum_i Rs_i * Vi_i$$

avec : Rg : risque global encouru par un espace exposé donné ;
Rs : risque spécifique encouru par chaque élément exposé, présents sur cet espace ;
Vi : valeur unitaire initiale de chaque élément exposé ou d'un ensemble d'éléments exposés ayant le même niveau d'endommagement D.

Les pertes encourues peuvent être exprimées, soit en valeur absolue, par exemple pour les coûts ou les préjudices humains (nombre de morts, de blessés potentiels, etc.), soit en valeur relative par rapport à un capital de départ correspondant à différents éléments exposés. Pour une communauté exposée donnée, c'est-à-dire circonscrite à la zone d'effet supposé d'un phénomène pressenti, ce capital de départ définit ce qu'on peut appeler les enjeux (la mise de départ), par opposition aux pertes (le résultat).

3.1.3. La mesure de l'endommagement : indicateur de vulnérabilité

Nous proposons donc de caractériser cette vulnérabilité technique par le niveau d'endommagement constaté ou potentiel d'un élément exposé donné, soumis à l'action d'un phénomène déclaré ou pressenti, de magnitude donnée (Leone, 1996a). A l'échelle de l'élément exposé (unitaire), ce niveau pourra être mesuré par un taux d'endommagement D compris entre 0 et 1 (*cf.* équation du risque spécifique précédente), un dommage nul donnant la valeur 0 et un dommage total la valeur 1. D'un point de vue théorique, ce taux pourra être calculé en référence à la valeur initiale de l'élément exposé, avant endommagement. Il s'obtient par la formule suivante :

$$D = (Vi - Vf) / Vi$$

Avec : Vi : valeur unitaire initiale de l'élément (avant endommagement)
Vf : valeur unitaire finale de l'élément (après endommagement)

Toute la difficulté d'une évaluation quantitative et prédictive de la vulnérabilité réside donc dans l'appréciation de ce que sera le niveau d'endommagement potentiel D recherché. En théorie, le niveau d'endommagement D d'un élément exposé E donné est fonction de la nature, d'une part du phénomène φ impliqué et d'autre part de cet élément exposé E. Soit:

$$D = fct\ (\varphi\ ,\ E)$$

Une telle fonction exprimant l'interaction élément/phénomène en terme de niveau d'endommagement potentiel est appelée fonction d'endommagement, ou par extension, fonction de vulnérabilité. Elle peut s'exprimer de manière discontinue au moyen de matrices d'endommagement ou bien de façon continue au moyen de courbes d'endommagement. L'introduction de cette fonction d'endommagement nécessite de distinguer au moins trois grandes familles d'éléments exposés. Il s'agit :

– des biens physiques ;
– des personnes ;
– des activités ou fonctions diverses.

Elles permettent de distinguer trois types particuliers de fonctions d'endommagement décrivant le mode et le niveau d'endommagement potentiel D de chaque type d'élément. Il s'agit:

– de la fonction d'endommagement structurel, qui s'applique aux biens physiques et qui définit les dommages structurels (ou matériels) ;

– de la fonction d'endommagement corporel, qui s'applique aux personnes et qui définit les dommages corporels ou préjudices corporels ;

– de la fonction d'endommagement fonctionnel, qui s'applique aux activités et fonctions diverses, et qui définit les dysfonctionnements.

Chaque type de fonction d'endommagement est défini par un certain nombre de variables, ou facteurs, que l'on peut classer de la façon suivante :

– **Fonctions d'endommagement structurel et corporel** : le niveau d'endommagement structurel ou corporel d'un bien matériel ou d'une personne interagissant avec un phénomène est fonction de la magnitude du phénomène, de la sensibilité de ce bien ou de cette personne et de la durée de cette interaction. Cette fonction peut être étendue à la prise en compte de phénomènes induits, soit directement, soit indirectement par le phénomène d'origine et susceptibles d'entraîner à leur tour des dommages structurels ou corporels.
Dans le cas des biens structurels, la sensibilité est généralement définie par des facteurs de résistance ou au contraire de fragilité mécanique. Dans le cas des personnes, la sensibilité peut se décomposer en sensibilités intrinsèque **SI** et extrinsèque **SE** suivant la nature des facteurs qui la définissent :

> – **SI** est fonction de *facteurs intrinsèques* (ou psycho-sociologiques et comportementaux) tels que le comportement de la personne en cas de danger, donc de son niveau de perception du danger (facteurs perceptifs), de sa connaissance des moyens de s'en protéger (facteurs cognitifs) et de sa capacité de mobilité face au danger (facteurs de mobilité).

– **SE** est fonction de *facteurs extrinsèques* tels que le niveau de protection apporté par les structures susceptibles d'abriter la personne en temps normal (facteurs de protection physique), de l'efficacité des mesures et moyens d'alerte, d'évacuation, de secours, de soins, etc., au moment de la crise (facteurs conjoncturels, techniques et fonctionnels).

– **Fonction de dysfonctionnement** : le niveau de dysfonctionnement d'une activité ou d'une fonction dépend des niveaux d'endommagement structurel (facteurs techniques) et corporel (facteurs humains) des structures ou personnes qui en assurent habituellement le maintien, de dysfonctionnements secondaires (facteurs fonctionnels) et de la capacité de la communauté affectée à trouver des solutions pour restaurer cette activité ou fonction. Cette capacité dépend essentiellement de facteurs conjoncturels, socio-économiques, institutionnels et politico-administratifs.

Comme on peut le voir, la résolution, ou du moins l'explicitation des fonctions d'endommagement, en particulier structurel et corporel, passe par la connaissance des modes d'interaction physiques entre éléments exposés et phénomènes impliqués, d'où l'introduction des deux notions fondamentales suivantes :

– **La notion de capacité d'endommagement** d'un phénomène donné vis-à-vis d'un élément exposé donné : d'une façon générale elle peut être décrite par deux notions fondamentales, qui sont le type de processus d'endommagement du phénomène et sa magnitude :

– *Le processus d'endommagement* caractérise l'action préférentielle du phénomène sur l'élément exposé. On peut aussi l'appeler « sollicitation apportée par le phénomène ». Il en existe plusieurs types pour les phénomènes de mouvements de terrain ou les tsunamis par exemple, et cela peut constituer un nouveau procédé de classification de ces phénomènes (Leone, 1996a).

– *La magnitude* caractérise l'ampleur du processus d'endommagement apporté par le phénomène. C'est une grandeur physique que l'on doit quantifier à travers des critères physiques simples. Elle n'est en aucun cas définie par le niveau des dommages susceptibles d'être générés par le phénomène. Elle est représentative seulement du phénomène.

– **La notion de mode d'endommagement** d'un élément donné exposé à ce phénomène : comme on l'a vu précédemment, en fonction de sa propre nature, de la magnitude du phénomène ou d'autres dommages et dysfonctionnements, l'élément exposé va subir des dommages variables aussi bien en nature qu'en intensité. On parle de mode d'endommagement pour décrire l'allure des dommages des éléments exposés en général.

Concrètement, en matière de caractérisation de la vulnérabilité dans une optique de quantification du risque, les efforts doivent porter sur les deux notions fondamentales de magnitude du phénomène et de mode d'endommagement des éléments exposés. Conformément aux fonctions d'endommagement décrites précédemment, l'évaluation des dommages corporels et fonctionnels dépend principalement des dommages structurels. Il convient donc d'apporter une attention particulière à la notion d'endommagement structurel.

C'est d'ailleurs surtout à ce niveau d'analyse que se différencient les effets des différents phénomènes naturels. En d'autres termes, perfectionner notre connaissance de la vulnérabilité « technique » revient à compléter progressivement la matrice des correspondances, en terme de mode et niveau d'endommagement, entre types d'éléments exposés et types de phénomènes impliqués. Nous verrons plus loin que certains de nos travaux ont contribué à cet effort, en particulier pour les mouvements de terrain et les tsunamis.

3.1.4. Risque et décision

Cette formalisation mathématique du risque s'inscrit dans un processus de prise de décision, couramment appelé "théorie statistique de la décision" (Lagadec, 1981; 1992 ; Cohen, 1992). Elle traduit le fait que l'appréciation du risque n'a de raison d'être qu'en fonction des décisions susceptibles d'être prises pour en atténuer les conséquences et que s'il y a décision à prendre, le décideur retiendra celle qui conduit à l'espérance des pertes la plus acceptable. Ce n'est pas parce que la quantification exacte des probabilités et du dommage n'est pas accessible qu'il faut nier l'importance de ce concept et de sa formalisation mathématique : l'une peut éclairer l'autre, et aider à ce qu'il soit employé correctement, même sous une forme qualitative. C'est en essayant de définir cette espérance mathématique qu'on conserve à l'esprit que risque et probabilités ne désignent pas la même chose, ni en français, ni en mathématiques. Il est pourtant important et souvent réalisable, de classer les risques. Même si on ne peut avoir des valeurs exactes de dommages et de probabilité, on peut leur affecter des valeurs numériques tenant lieu d'indicateurs, ce qui permet de comparer les risques entre eux en mettant en œuvre différents scénarios (Canceill, 1982).

Cette démarche quantificatrice du risque est devenue courante et fiable depuis le début des années 1980 dans le milieu du risque technologique (*cf.* Leroy & Signoret, 1992 et Kervern & Rubise, 1992) mais difficiles sont encore les applications dans le milieu des risques naturels, hormis pour le séismes et les inondations. Il n'est pas toujours possible de traduire le niveau d'endommagement D, ou de conséquences potentielles, en unité monétaire (par exemple pour des dommages environnementaux ou esthétiques). De la même façon, suivant le contexte décisionnel dans lequel on se trouve, un niveau d'endommagement D donné n'aura pas toujours les mêmes répercussions. Par exemple, la possibilité d'apparition de fissures non-réparables sur une habitation pourra être tout à fait tolérable pour un propriétaire qui ne veut pas vendre, alors qu'elle pourra devenir une cause de difficultés de vente, et probablement de dévalorisation du bien, pour quelqu'un qui désirerait s'en séparer. Ces préjudices seront fonction de l'état du marché de l'immobilier au moment de la prise de décision.

Sur le plan probabiliste (Canceill, 1983; Einstein, 1988), cette variabilité des conséquences en fonction du contexte décisionnel se traduit par ce qui est classiquement appelé fonction d'utilité, U(D). Celle-ci doit représenter une sorte d'indicateur de l'intérêt attaché à telle ou telle situation et dont les conséquences ne sont pas forcément monétaires. U représente l'utilité de prendre telle ou telle mesure s'appliquant à un niveau d'endommagement potentiel D. Dans certains cas complexes, la fonction d'utilité est elle-même le résultat d'un calcul d'espérance mathématique. Canceill (1983) rappelle que cette fonction d'utilité se retrouve dans la bibliographie sous les synonymes les plus divers : fonction de gain ou fonction de perte, fonction de coût, fonction de poids, fonction objectif ou fonction économique.

3.2. Contribution à la modélisation prédictive des dommages multi-phénomènes

3.2.1. Les composantes d'un scénario de pertes spatialisé

Les évaluations des risques d'origine naturelle et leurs représentations cartographiques sont encore trop souvent réduites à la simple considération des menaces naturelles et négligent les autres composantes fondamentales de l'équation du risque que sont les enjeux présents et leur niveau d'endommagement potentiel. Cela donne des cartes dites d'aléas - parfois abusivement dénommées cartes de risque - qui expriment seulement des niveaux de menaces potentielles. Si ces cartes d'aléas revêtent un intérêt certain pour réglementer l'occupation du territoire (cas des Plans de Prévention des Risques en France), prescrire des normes de construction (cas du zonage sismique de la France par exemple), ou bien sensibiliser les populations (cas des atlas des zones inondables par exemple), elles ne permettent pas de visualiser l'importance des pertes potentielles encourues lors de la manifestation des phénomènes naturels concernés. Or, l'expérience montre que pour anticiper les décisions à prendre en matière de réduction des risques et appuyer l'effort de sensibilisation et de concertation inhérent à toute action efficace dans ce domaine, décideurs et aménageurs ont aussi besoin d'être confrontés à des scénarios d'endommagement (ou de risque) quantifiés en terme de pertes potentielles (par exemple monétaires ou humaines, mais aussi environnementales, patrimoniales, etc.).

Conformément aux principes d'une formalisation analytique du risque décrits précédemment, ces scénarios sous-entendent la possibilité de moduler les risques de pertes potentielles en faisant varier tant dans l'espace que dans le temps les composantes des aléas (extension, enchaînement, probabilité d'occurrence, magnitude, durée) et des enjeux (localisation, nature, fonction d'endommagement ou de vulnérabilité, valeur, probabilité de présence). Les cartes qui en découlent en sont des images quantitatives et un éventail de ces cartes, pour différents scénarios, doit permettre de restituer la dynamique spatio-temporelle du risque en un territoire donné (**figure 3.4.**).

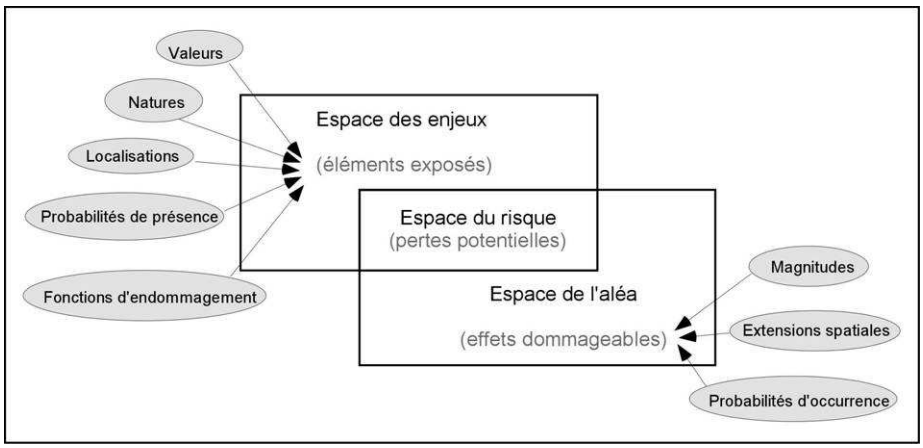


Figure 3.4. Les composantes et variables d'un scénario de risque spatialisé (Leone, 2004).

De tels scénarios d'endommagement ont été abondamment développés dans le domaine du risque sismique, essentiellement à l'échelle urbaine, sur au moins une quarantaine d'agglomérations dans le monde et en se basant pour l'essentiel sur la prise en compte du patrimoine bâti, plus rarement sur les réseaux. En France, des applications ont été menées assez récemment sur les villes de Pointe-à-Pitre (Martin et al., 1993, 1994, 1996, 1997), Fort-

de-France (Monge et al., 1999), Nice (Lutoff, 2000), Mulhouse (Beck (2007) ; plus anciennement sur la région de Lambesc (Bastet et al., 1985). L'**annexe 11** regroupe d'autres exemples de scénarios de quantification des pertes, pour d'autres phénomènes (volcanisme, vents forts, mouvements de terrain, grêle). Les scénarios menés à l'échelle régionale, nationale et internationale sont beaucoup plus rares. Ils introduisent en général les enjeux sous forme de macro-indicateurs économiques (PNB) (Amendola et al., 2000 ; Chan et al., 1998 ; Chen et al., 1997, 2002, Badal et al., 2005). Mais ces applications ne donnent pas forcément lieu à des restitutions cartographiques des pertes potentielles.

Cependant, lorsque ces cartes existent, les unités géographiques de codage de l'information (géocodes) sont fixées par les découpages administratifs qui agrègent les données sur les enjeux (Bommer et al., 2002), ou les limites de groupes d'enjeux de même nature (Chatelain et al., 1994 ; Faccioli et al., 1999), ce qui réduit les possibilités de modulation des échelles de restitution. Aucune application cartographique intégrant le risque unitaire encouru par chaque élément exposé ne semble exister, ce qui permettrait pourtant de s'affranchir des limites précédentes pour afficher le risque sur la base géographique et à l'échelle souhaitées, en fonction des applications recherchées. Une telle application sera proposée en quatrième partie du mémoire pour la Martinique.

3.2.2. Processus d'endommagement, critères et échelles de magnitude

Nous l'avons vu, le zonage de l'aléa repose sur la prise en compte de trois composantes fondamentales (spatiale, temporelle et énergétique) qui peuvent être déterminées et combinées suivant des règles d'expertise très variables. Ces trois composantes s'appliquent au phénomène naturel attendu, plus précisément à l'effet dommageable qu'il est susceptible de générer (ou processus d'endommagement physique). En effet, plusieurs effets sont souvent associés à un même phénomène (par exemple, des effets thermiques et mécaniques pour un écoulement pyroclastique) et, inversement, plusieurs phénomènes peuvent se traduire par un même effet (par exemple, l'impact associé aussi bien à un écroulement rocheux, qu'à une coulée de débris chargée de gros blocs et aux retombées balistiques d'une éruption volcanique). Notons par ailleurs que ces effets peuvent se relayer dans le temps comme dans l'espace, d'où la nécessité d'établir des scénarios de déclenchement et d'enchaînement des phénomènes. Le zonage s'applique alors au scénario retenu.

La composante spatiale correspond à la délimitation de l'extension potentielle de l'effet attendu. Elle est déduite d'approches soit naturalistes ou déterministes (hydro-géomorphologique par exemple), soit mathématiques (modélisations numériques et analogiques, par exemple), soit, le plus souvent, du couplage des deux. Dans sa version minimale **la composante temporelle** correspond à la probabilité d'occurrence de ce même effet dans un délai de temps donné. Cette dernière peut être établie soit à partir de fréquences historiques permettant de calculer une période de retour théorique (par exemple pour une inondation), soit d'indices d'activité relevés in situ (par exemple pour un glissement de terrain). **La composante énergétique** correspond à la magnitude (puissance) de l'effet. C'est une grandeur physique que l'on doit s'efforcer de mesurer à travers des critères physiques simples. Elle n'est en aucun cas définie par le niveau des dommages susceptibles d'être générés par le phénomène. Toute la difficulté réside dans le fait de trouver les critères de magnitude les plus représentatifs des différents effets. Ce qui apparaît comme relativement simple pour un effet hydraulique - en prenant comme critères des hauteurs d'eau, des temps de submersion ou bien des vitesses d'écoulement – se complique davantage dans le cas d'une éruption volcanique ou bien de certains mouvements de terrain.

Tableau 3.1. Essai de synthèse des processus d'endommagement physiques associés aux principaux aléas naturels et proposition de critères d'évaluation de leur magnitude. Contribution à une quantification multi-risque.

| | Phénomènes concernés | | |

Processus et critères de magnitude multi-phénomènes

En se basant sur des recherches bibliographiques et diverses observation de terrain menées sur deux séismes (El Quindio, Colombie 2001 ; Al Hoceima, Maroc 2004), des mouvements de terrain (Josefina, Equateur 1993 ; Diois et Trièves, France, 1994), deux cyclones (Lenny, Petites Antilles, 1999 ; Infanta, Philippines, 2004) et un tsunami (Banda Aceh, Indonésie, 2004), nous proposons d'éclairer la notion de processus d'endommagement pour les principaux aléas naturels à effet brutal (de quelques secondes à quelques jours). L'objectif est de fournir des critères de construction des différentes échelles de magnitude, existantes ou à créer, et qui pourront servir d'entrée à la construction des futures matrices et courbes de vulnérabilités indispensables aux calculs des dommages potentiels.

Cette synthèse des processus d'endommagement multi-aléas, de leurs principaux critères de magnitude, est présentée dans le **tableau 3.1**. Pour les six grandes familles d'aléas génériques retenues (volcanisme, sismicité, inondations, tsunami, mouvements de terrain, cyclone) et décomposés en sous-aléas, on distingue 6 grandes familles d'effets (mécaniques, hydrauliques, chimiques, thermiques, électriques et magnétiques) englobant 19 processus dominants et pouvant être décrits par une quinzaine de paramètres physiques (géométriques, cinématiques et temporels), assortis de leurs unités de mesure.

Ce tableau à entrées multiples permet également en lecture verticale de hiérarchiser et de comparer les phénomènes naturels au regard du nombre de processus associés, ce qui peut être un bon indicateur de la complexité de leurs mécanismes de ruine et des difficultés d'une éventuelle modélisation de leurs effets. Ce sont les mouvements de terrain (57) et les éruptions volcaniques (48) qui se distinguent par la plus grande diversité de modes d'endommagement physiques ; suivis des inondations, des cyclones, des séismes et des tsunamis. On comprend dès lors les difficultés de mener des scénarios d'endommagement réalistes sur des volcans actifs, et tout l'intérêt de développer des recherches dans ce sens pour affiner les analyses d'aléas. A contrario, les inondations, les tsunamis et les séismes présentent en théorie des mécanismes d'action relativement plus simples à décrire à partir de quelques paramètres physiques indépendants qui sont de mieux en mieux modélisés dans l'espace. Ainsi, les scénarios sismiques ont pu largement se développer ces dernières années sur la base d'une simulation numérique de l'accélération maximale au rocher (PGA) ou mieux, des différents spectres de réponse.

Le programme de recherche Tsunarisque auquel nous avons participé, a permis une avancée significative dans la modélisation de la progression de ce phénomène dans les terres. Les algorithmes de nos partenaires du CEA débouchent sur des simulations dynamiques des champs de vitesse du tsunami dans la région de Banda Aceh (**figure 3.5.**). Cette reconstitution numérique de l'extension et de la cinématique du phénomène offre des perspectives de simulation des pertes potentielles à court terme. Reste à affiner la résolution spatiale des modèles et à y intégrer des coefficients d'endommagement de divers types d'enjeux.

Une lecture horizontale du tableau fait apparaître les processus les plus communs à l'ensemble des aléas retenus : il s'agit des effets de déplacements à composante horizontale dominante et de pression latérale continue exercés sur d'éventuelles infrastructures situées dans le premier cas sur le phénomène, dans le second cas, au niveau de son contact. Viennent ensuite les processus dominants d'impacts latéraux et d'affouillement, communs à 19 des 40 sous-aléas naturels.

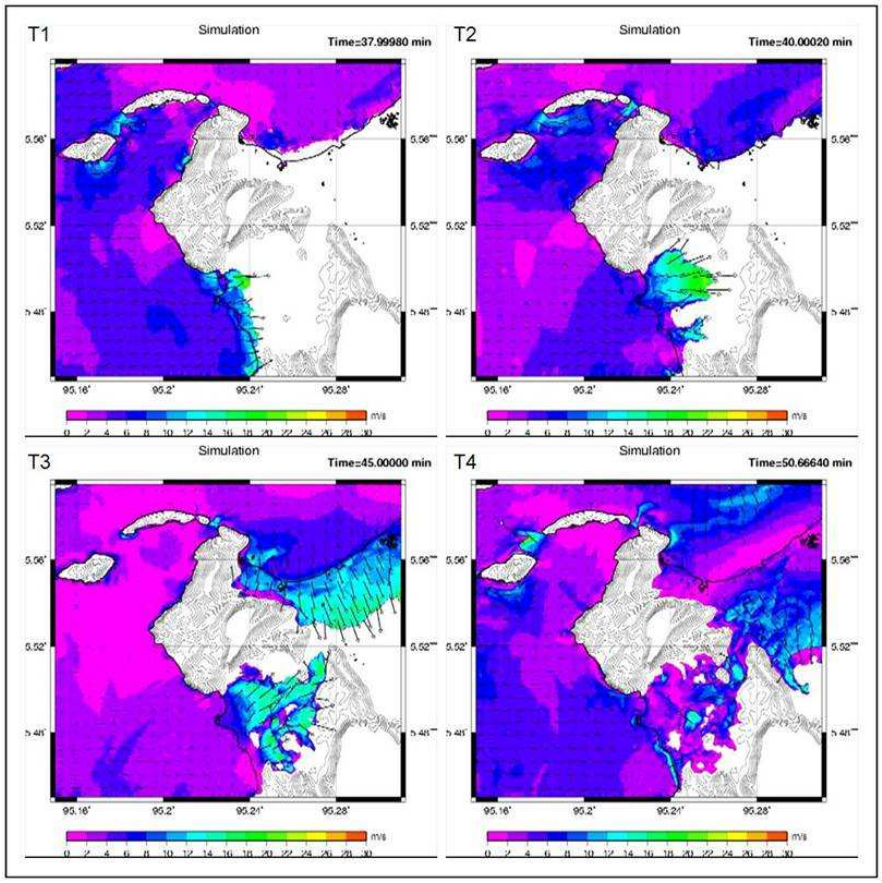


Figure 3.5. Modélisation dynamique de la progression du tsunami du 26 décembre sur Banda Aceh (Indonésie) – Source CEA (H. Hébert), programme Tsunarisque.

Ce tableau offre également la possibilité de voir les effets d'enchaînement potentiellement induits entre phénomènes (en majorité hydrauliques) et devant être considérés dans un scénario d'évaluation du risque, comme par exemple sur le site de Séchilienne en France (Asté et al., 1993). Ce site offre les mêmes conditions de réalisation d'un scénario catastrophe en trois phases comparables à ce que nous avons pu analyser en Equateur en 1993 : (1) glissement avec embâcle, (2) lac d'inondation, (3) rupture avec onde de submersion et glissements induits (Leone & Velasquez, 1997) (**figure 2.6**).

Au moins 16 échelles de magnitude des phénomènes naturels dommageables existent dans la littérature. On en dénombre trois pour les séismes, cinq pour les vents forts, quatre pour les tsunamis, une pour la grêle, deux pour les mouvements de terrain et une pour le volcanisme (**tableau 3.2**). Elles respectent toutes le principe d'indépendance vis-à-vis des effets de ces phénomènes et la moitié présente des corrélations avec les dommages potentiels. On réservera le terme « intensité » pour les échelles basées sur l'observation des conséquences dommageables de ces phénomènes. Ce sont les plus nombreuses (une trentaine) et certaines, mixtes ou uniquement basées sur les dommages, permettent de remonter à certains paramètres de la magnitude (vitesse, magnitude sismique, hauteurs de submersion, pressions). Cet état des lieux permet de mesurer la pertinence des échelles de magnitude disponibles au regard d'une évaluation quantitative du risque. Il apparaît clairement qu'elles ne sont pas toujours adaptées à une évaluation quantitative et locale du risque et que la recherche d'autres paramètres physiques de magnitude s'imposent. Dans les développements qui suivent, nous verrons nos apports en la matière pour les aléas mouvements de terrain et tsunami.

Tableau 3.2. Principales échelles de magnitude et d'intensité disponibles dans la littérature pour caractériser des aléas naturels dommageables.

Aléa	Appellation	Critères principaux	Nombre de niveaux	Source principale	CDP	
	Echelles de magnitude pure (paramètres physiques)					
Séismes	Echelle de magnitude locale (Ml) de Richter et variante Gutenberg (MS)	Amplitude maximale des ondes de surface	ouverte	Richter, 1935 ; Gutenberg & Richter, 1936 ; Gutenberg, 1945		
	Echelle de magnitude des ondes de volume (Mb) de Gutenberg et Richter	Amplitude maximale des ondes de volume	ouverte	Gutenberg & Richter, 1956		
	Echelle de magnitude de moment de Kanamori (Mw)	Moment sismique	ouverte	Kanamori, 1977		
Vents forts	Echelle de Beaufort (tempêtes)	Vitesse du vent à 10 m de hauteur et divers effets en mer et à terre	12	Meadena, 2007 ; http://www.meteofrance.com	x	
	Echelle de Douglas (état de la mer)	Hauteur moyenne des vagues	10	http://www.wmo.ch	x	
	Echelle de Saffir-Simpson (cyclones)	Vitesse moyenne du vent, élévation du niveau de la mer	5	Simpson et al, 1981	x	
	Echelle de TORRO (T-scale) (tornades)	Vitesse du vent	12	http://www.torro.org.uk	x	
	Echelle Australienne (cyclones tropicaux)	Vitesse maximale du vent (3 secondes)	5	Crowder, 1995	x	
Tsunami	Echelle de Iida	Hauteur maximale du runup	7	Iida, 1963	x	
	Echelle de Murty & Loomis	Energie potentielle	?	Murty & Loomis, 1980		
	Echelle d'Hatori	Amplitude de l'onde et distance du séisme	?	Hatori, 1986		
	Echelle d'Abe	Amplitude de l'onde et distance du séisme	?	Abe, 1981		
Grêle	Echelle de TORRO (grêle)	Diamètre des grêlons et dommages	11	Webb et al, 2001 et http://www.torro.org.uk	x	
Mouvements de terrain	Echelles de Leone (tous types de mouvements)	Multicritères	variable	Leone, 1996		
	Echelle de Mouroux et al. (gonflement-retrait)	Mouvement différentiel unitaire	?	Mouroux et al, 1988	?	
Eruption volcanique	Indice d'explosivité volcanique (VEI)	Volume des tephra et hauteur du panache éruptif	9	Newhall & Self, 1982		
	Echelles mixtes (paramètres physiques et dommages)				**CM**	**PM**
Vents forts	Echelle de Fujita (tornades)	Vitesse moyenne du vent à 10 m de hauteur et dommages	13 (6 utilisés)	Fujita, 1981	x	vitesse
	Echelle de Fujita améliorée (EF) (tornades)	Vitesse moyenne du vent à 10 m de hauteur et dommages	13 (5 utilisés)	http://www.spc.noaa.gov/efscale	x	vitesse
	Echelle de Saffir-Simpson (cyclones)	Vitesse moyenne du vent et dommages	5	Simpson et al, 1981	x	vitesse
Avalanche	Echelle d'intensité des avalanches	Divers critères physiques et dommages sur les infrastructures	?	http://www.anena.org	x	?
Incendie de forêt	Echelle du CEMAGREF	Vitesse de progression et dommages divers	6	http://www.cemagref.fr	x	vitesse
Multi-aléas	Échelles du MEDD	Paramètres physiques et dommages divers	5	GSC et al., 2002 et Chiroiu, 2004	x	divers
	Echelles d'intensité pure (dommages)					
Séismes	Echelle Mercalli modifiée (MM)	Dommages divers dont dommages aux bâtiments	12	Wood & Neumann, 1931	x	magnitude
	Echelle Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK)	Dommages divers dont dommages aux bâtiments	12	Sponheuer et al, 1964	x	magnitude
	Echelle Macrosismique Européenne (EMS-98)	Dommages divers dont dommages aux bâtiments	12 (5 pour bâti)	Grünthal, 1998	x	magnitude
	Echelle Japan Meteorological Agency (JMA ou Shindo)	Dommages divers dont dommages aux bâtiments	7	http://www.jma.go.jp	x	magnitude
	Echelle HAZUS	Dommages aux infrastructures, aux réseaux et aux personnes	variable	FEMA, 1999		
	Echelle de Rossi-Forel	Dommages divers dont dommages aux bâtiments	10	Tiedemann, 1992	x	
Vents forts	Echelle de Leicester et al.	Dommages aux bâtiments résidentiels	10	Leicester & Reardon G, 1976		
Tsunami	Echelle "macro-tsunamique" de Leone	Dommages aux bâtiments	6	Leone et al, sous presse (2007)	x	hauteur
	Echelle de Sieberg	Dommages divers	6	Sieberg, 1927	?	
	Echelle de Soloviev	Dommages divers	7	Soloviev, 1970	?	
	Echelle d'Ambraseys	Dommages divers	6	Ambraseys, 1962	?	
	Echelle de Shuto	Dommages divers	?	Shuto, 1991		
	Echelle de Papadopoulos & Imamura	Dommages divers	12	Papadopoulos & Imamura, 2001	x	hauteur
Mouvements de terrain	Echelle de Leone (tous types de mouvements)	Dommages aux bâtiments, réseaux, biens, fonctions et personnes	variable	Leone, 1996	x	hauteur
	Echelle DRM (tous types de mouvements)	Dommages aux bâtiments	5	DRM, 1990		
	Echelle du NHRC (glissements)	Dommages aux bâtiments	?	NHRC, 1999	?	
	Echelle du BRED (subsidence)	Dommages aux murs	6	BRED, 1981	x	
	Echelle de Mouroux et al. (gonflement-retrait)	Dommages aux bâtiments	?	Mouroux et al, 1988	?	
	Echelle d'Alexander (glissements de terrain)	Dommages aux bâtiments	7	Alexander, 1988		
	Echelle de Zihri (effondrement de cavités)	Dommages divers (multi-dimensionnelle)	variable	Zihri, 2004		
Eruption volcanique	Echelle de Baxter et al. (coulées pyroclastiques, Montserrat)	Dommages aux bâtiments	6	Baxter et al., 2005	x	Pression
	Echelle d'intensité des phénomènes éruptifs du BRGM	Dommages aux infrastructures	4	Stieltjes & Mirgon, 1998		
Multi-aléas (catastrophes)	Échelle des catastrophes de Bradford	Pertes humaines	?	Keller, 1989 in Zihri, 2004		
	New Damage Index	Dommages aux bâtiments	4	Blong, 2003		

CDP : corrélation avec dommages potentiels / CM : corrélation avec magnitude / **PM** : paramètres de magnitude

Le cas des séismes

Pour les séismes, il existe deux manières d'exprimer la magnitude de l'aléa, pas au sens de Richter, mais toujours dans une perspective d'évaluation locale du risque au moyen de scénarios de pertes. Il s'agit de :

– *L'accélération maximale du sol* (ou PGA, « *peak ground acceleration* ») : bien qu'il représente les accélérations maximales observées lors des séismes, ce paramètre est de moins en moins utilisé car il est restrictif dans sa représentation de l'aléa. Cependant, quelques courbes d'endommagement sont encore exprimées en fonction du PGA. Il est progressivement abandonné au profit du spectre de réponse qui intègre d'autres paramètres importants tels que le contenu fréquentiel, la vitesse maximale et le déplacement maximal.

– *Le spectre de réponse* : c'est la représentation de l'accélération subie par une série d'oscillateurs à un degré de liberté soumis à un accélérogramme donné. Ce paramètre est de plus en plus utilisé grâce à l'utilisation de plus en plus importante des méthodes en déplacement.

Processus et échelles de magnitude pour les mouvements de terrain

Pour une grande famille de phénomènes, la considération de ces processus d'endommagement peut offrir de nouvelles possibilités de classification, plus simples et plus adaptées à une évaluation spatialisée de l'aléa et du risque. Ce travail a été entrepris pour les « mouvements de terrains », appellation générique désignant une multitude de processus morpho-dynamiques caractérisés par une grande diversité de mécanismes et d'effets. Ainsi on a été amené à distinguer quatre grandes familles de processus d'endommagement associés à la multitude de phénomènes connus (Leone, 1996a) :

– des déplacements et des déformations associées ;
– des pressions, résultat d'un impact ou d'une poussée latérale ;
– des accumulations, résultat d'une propagation ;
– des ablations (ou affouillement), résultat d'une érosion.

Ces sollicitations sont de nature mécanique et agissent de façon soit dynamique, soit statique sur les éléments exposés. Plusieurs processus sont souvent associés à un même phénomène, aussi bien dans l'espace que dans le temps et inversement plusieurs phénomènes peuvent se traduire par un même processus. Ils différent d'un phénomène à l'autre par leur magnitude (volume mobilisé, vitesse du mouvement, distance de propagation par exemple), ou bien par le rythme et l'allure du champ des déformations. Ainsi, on peut opérer des distinctions dans la localisation des ces processus. De manière schématique, il apparaît sur la **figure 3.6**. que :

– **L'effet d'accumulation** (ou d'ensevelissement) est aussi bien représenté en pied de certains glissements (il succède alors à l'effet de poussée latérale), qu'en zone de réception aval d'écroulements rocheux ou bien de coulées diverses (de boue, de débris, lahars, etc.). Il peut être plus ou moins progressif dans le cas des glissements et des coulées, tandis qu'il est souvent instantané dans le cas des phénomènes d'écroulements et d'éboulements.

– **Les déplacements à composante dominante verticale** caractérisent les têtes de certains glissements rotationnels (zone de départ), tout comme la zone de remaniement d'origine des écroulements de falaises ainsi que l'aplomb des zones d'effondrements, d'affaissements et d'expansion de sols.

– **Les déplacements à composante dominante latérale** (horizontale) se retrouvent pour leur part à l'aplomb de la surface e rupture de la majorité des glissements translationnels et des zones de fluage. Tout comme les déplacements précédents, ils se caractérisent par des déformations différentielles d'intensité et d'expression morphologique variables pour une même zone d'instabilité.

– **Les effets d'impact** sont traditionnellement associés aux phénomènes de chutes de blocs isolés ou issus d'éboulements plus généralisés, mais peuvent également se retrouver au niveau de la zone de transport des diverses coulées, dont la densité est parfois telle qu'elle permet le transport de blocs de plusieurs tonnes à des vitesses élevées.

– **L'effet de souffle** est également une caractéristique de certains phénomènes de mouvements de terrain rapides et discontinus le plus généralement regroupés sous l'appellation d'éboulements d'extension catastrophique. Cependant, rares sont les témoignages qui font état d'effet de souffle associé à des mouvements de terrain. On peut néanmoins citer les cas de la catastrophe de la Salle-en-Beaumont et de Madison Canyon (Montana, USA, 1959) pour lesquels un violent effet de souffle a été signalé.

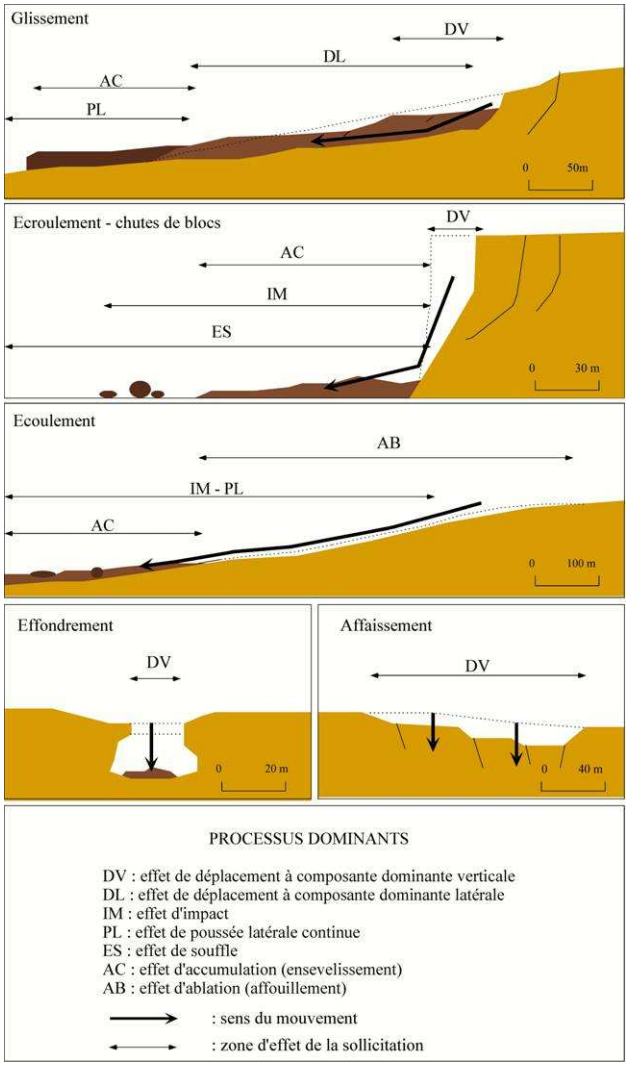


Figure 3.6. Les principaux processus d'endommagement associés aux mouvements de terrain (Leone, 1996a)

– **Les effets de poussées latérales continues** s'exercent le plus généralement au niveau du front de contact entre le bourrelet de certains glissements ou écoulements visqueux et les structures exposées. Ils précédent l'effet d'accumulation progressive.

– **L'effet d'ablation**, qui dépend notamment du pouvoir abrasif des matériaux transportés, est fréquemment associé aux phénomènes d'écoulements, en particulier les laves torrentielles et s'exerce sur la zone de transport.

Cette typologie simplifiée des mécanismes des mouvements de terrain permet donc de distinguer au total huit sous-classes de sollicitations élémentaires caractéristiques du potentiel d'endommagement de ces phénomènes. Cependant, conformément à ce qui a pu être décrit dans l'analyse en retour de la catastrophe de la Josefina (Leone & Velasquez, 1997 et 2002), l'apparition de phénomènes induits nécessite de considérer parfois, dans toute tentative de prévision du risque, d'autres types de sollicitations, en particulier de nature hydraulique. Dans le cas précis de la Josefina, les processus hydrauliques regroupaient :

– **Des effets de submersion statique temporaire** pour les zones ayant été comprises entre le niveau maximum du lac temporaire et celui du lac rémanent d'octobre 1993. Ces zones ont connu une montée des eaux progressive et lente caractérisée par des vitesses faibles et peu de charges solides. Cela a correspondu à une tranche de hauteur d'eau de 40 m (dénivelé maximum entre les deux lacs) et à une durée d'immersion de 33 jours.

– **Des effets de submersion statique permanente** pour les zones couvertes par le lac résiduel toujours présent à l'heure actuelle. Sa profondeur atteint par endroits environ 30 m et la sédimentation y est prononcée. En 1993, on devait aussi y associer les effets d'une pollution par hydrocarbures.

– **Des effets de submersion dynamique** associés à la crue, pour lesquels on a distingué trois classes de magnitude :

– **forte** : pour les zones exposées à des vitesses de 20 m/s durant quelques heures et à un transport solide élevé. Le résultat a été une forte abrasion (de plusieurs mètres) associée à des dépôts tels (jusqu'à 4 m) qu'on a constaté un remodelage total du lit de la rivière. Les hauteurs d'eau y ont atteint 15 m et même plus ;
– **moyenne** : pour les zones exposées à des vitesses plus modérées (5 à 10 m/s) et où l'érosion du lit a été moins marquée (seuls les dépôts dominaient) ;
– **faible** : pour les secteurs ayant connu surtout des débordements latéraux du lit (simple inondation avec des hauteurs d'eau jusqu'à 5 m) et où l'érosion et les dépôts ont été insignifiants du fait de vitesses d'écoulement faibles.

Sur ce cas, les différents processus on pu être reconstitués et cartographiés au moyen de photographies aériennes (non redressées) et de reconnaissances de terrain (**figure 3.7**). La principale difficulté a été d'apprécier l'extension des différentes classes de magnitude de la crue. Cela a nécessité de faire la synthèse d'indices très variés et dispersés (indices de terrain, témoignages oraux, coupures de presse, photographies, extraits de films, etc.). On a restreint cette reconstitution spatiale des phénomènes à la portion de vallée la plus sinistrée, dans un secteur compris entre la plaine d'El Descanso et la ville de Paute, sur une distance d'environ 20 km.

En cartographie préventive, cette traduction du phénomène en terme de processus (s) associé (s) revêt un intérêt important car elle sous-entend que l'on s'intéresse à l'extension prévisible du phénomène. On peut ainsi prétendre franchir un pas dans la cartographie du phénomène potentiel en passant de cartes de facteurs de prédisposition à des cartes de modes de sollicitations mécaniques. Cette opération est encore rarement réalisée, du moins en cartographie opérationnelle classique, compte tenu des difficultés propres à la modélisation de la propagation des phénomènes de mouvements de terrain. On voit donc ici que les études de vulnérabilité sont tributaires de la capacité à caractériser l'aléa, du moins dans sa dimension spatiale et qu'analyses de vulnérabilité et d'aléa sont forcément liées.

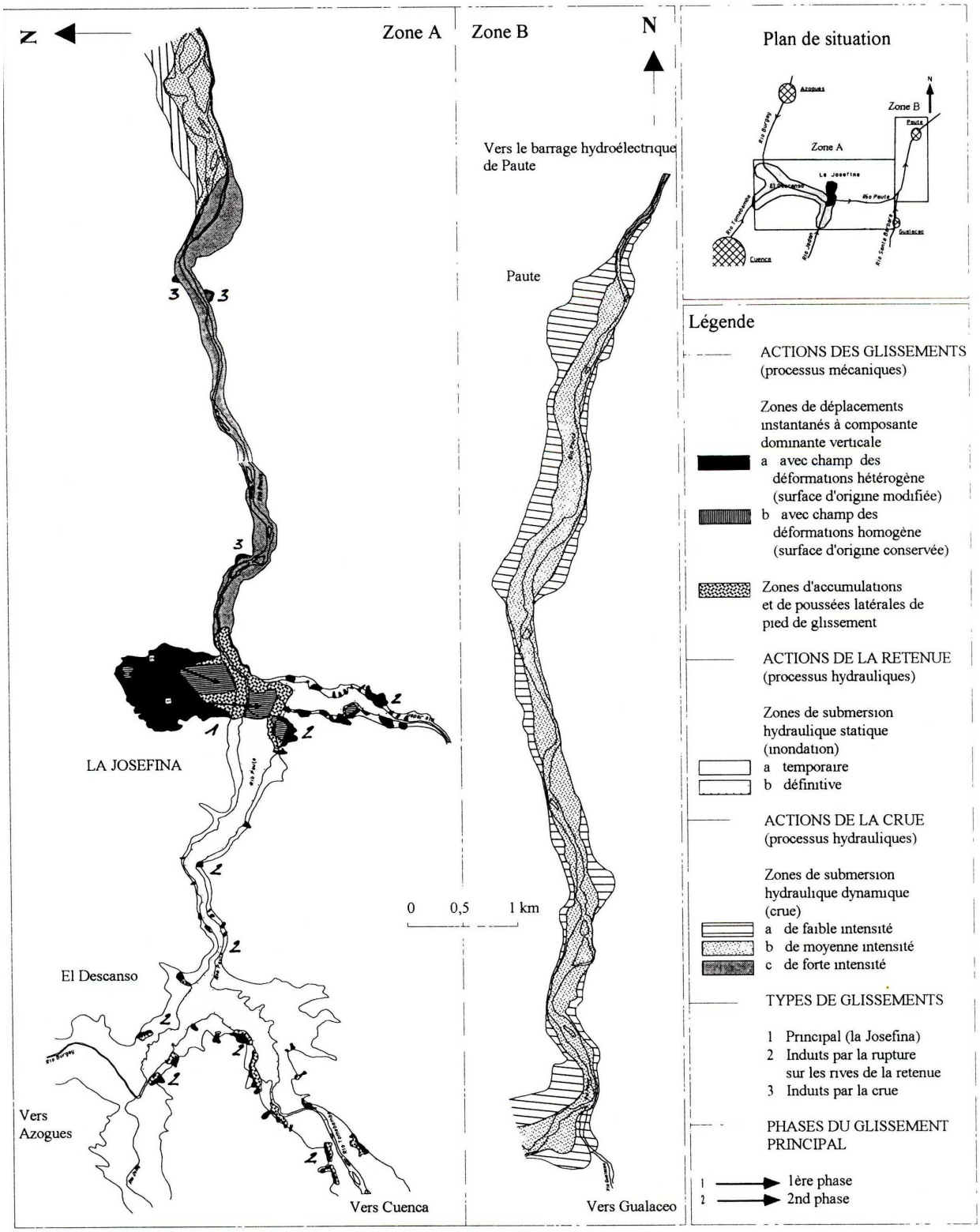


Figure 3.7. Décomposition de la catastrophe de la Josefina (Equateur, 1993) en processus d'endommagement associés aux différents phénomènes impliqués (glissement de terrain, retenue hydraulique, onde de submersion, glissements induits par la rupture). Application à la construction de matrices d'endommagement (Leone & Velasquez, 1997 et 2002).

Avant nous, D. Alexander semble être le seul auteur à avoir mené une réflexion sur cette notion de processus d'endommagement des mouvements de terrain. Il propose (Alexander, 1991), une classification reposant sur la notion de mode et d'action des contraintes entre phénomène et structure. Il s'agit de ce qu'il dénomme les « *stress categories* » comportant trois fonctions primaires qui sont les « *pulse* », « *step* » et « *ramp functions* ». Les « *pulse functions* » caractérisent des contraintes s'exprimant de façon transitoire. Les « *step functions* » décrivent une augmentation brutale de contraintes qui se maintiennent ensuite de façon permanente. Les « *ramp functions* » caractérisent une augmentation progressive des niveaux de contraintes.

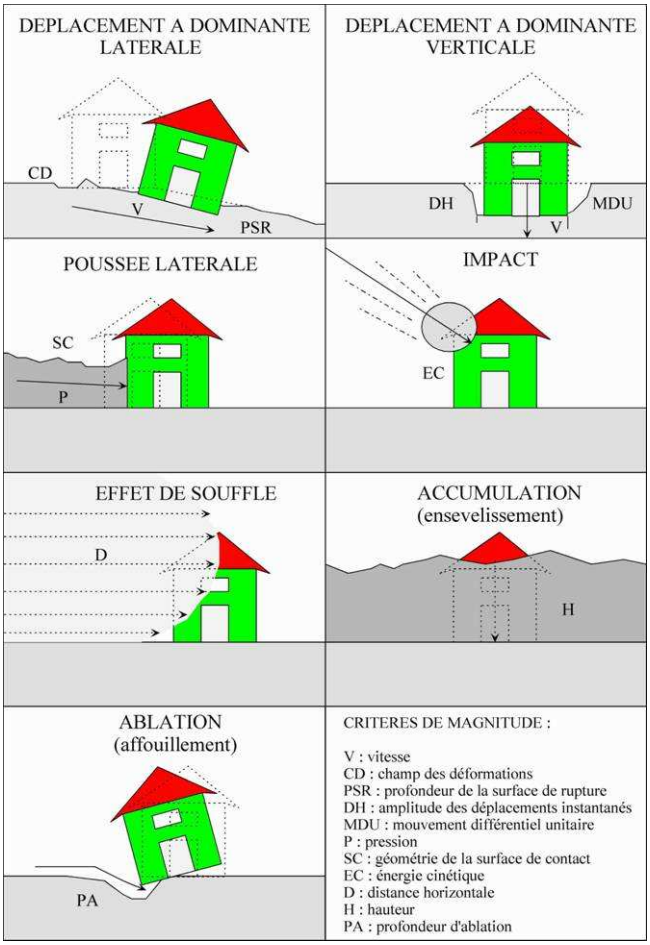


Figure 3.8. Principaux critères retenus pour caractériser la magnitude des phénomènes de mouvements de terrain (Leone, 1996a).

Associée à la diversité de ces processus d'endommagement, la notion de magnitude demeure très mal définie pour les mouvements de terrain. Or, il semble a priori fondamental de déterminer la puissance d'un phénomène potentiel pour pouvoir juger différentiellement du niveau de comportement des structures et des personnes qui y sont exposées. Nous proposons ainsi de reconsidérer les phénomènes de mouvements de terrain à travers 13 processus d'endommagement élémentaires. Ce choix semble suffisant pour définir des critères et des échelles de magnitude couvrant l'ensemble des phénomènes désignés par le terme « mouvements de terain ». Il s'agit (**figure 3.8.)** :

– Pour les zones soumises à des déplacements à composante dominante latérale (DL) :
  – de la vitesse (VL) des déplacements latéraux ;
  – de l'importance (CDL) du champ des déformations de surface associé à ces déplacements ;
  – de la profondeur (PSR) de la surface de rupture de la masse en mouvement ;

– Pour les zones soumises à des déplacements à composante dominante verticale (DV) :
  – de la vitesse (VV) des déplacements verticaux ;
  – de l'amplitude (DH) des déplacements verticaux instantanés ;
  – de l'importance (CDV) du champ des déformations de surface associé à ces déplacements ;
  – du mouvement différentiel unitaire (MDU) associé aux déplacements continus.

– Pour les zones soumises à une poussée latérale continue (PL) :
  – de la pression (P) exercée au front de la masse en mouvement ;
  – de la géométrie (SC) de la surface de contact entre le front de la masse en mouvement et la structure ;

– Pour les zones soumises à des impacts (IM) : de l'énergie cinétique (EC) de la masse en mouvement ou de son équivalence pour un volume donné (ECv) ou une vitesse donnée (ECc) ;

– Pour les zones soumises à un effet de souffle (ES) : de la distance (D) entre la zone de départ de la masse en mouvement et l'élément exposé ;

– Pour les zones soumises à des accumulations (AC) : de la hauteur (H) des dépôts ;

– Pour les zones soumises à de l'ablation (AB) : de la profondeur (PA) d'ablation du sol.

Ce travail de caractérisation de l'aléa mouvements de terrain, outre son intérêt typologique, permet de proposer différentes échelles de magnitude basée sur des valeurs (cinématiques ou géométriques) à considérer au niveau de la zone d'interaction entre le phénomène et l'élément exposé. Ces valeurs constitueront une des entrées des futures matrices d'endommagement élaborées pour les mouvements de terrain au cours de nos recherches.

Ainsi, on a défini les **vitesses latérales** (VL) par cinq classes de valeurs d'ordre de grandeur du cm/an au m/s. Les vitesses verticales (VV) bénéficient pour leur part de deux classes supplémentaires (mm/an et dm/an). On estime en effet que ces deux classes sont relativement discriminantes, en terme de niveau d'endommagement, pour des structures soumises à des déplacements verticaux progressifs. Ceci tient au fait que l'on connaît mieux, par expérience, l'effet des déplacements verticaux plutôt que latéraux sur les structures, notamment celles du bâti (*cf.* Philipponnat, 1978 ; D.R.M., 1992 et Toulemont, 1994).

L'importance du **champ des déformations de surface** (CDL et CDV) est décomposée en trois classes d'intensité croissante : faible (surface d'origine conservée en partie ou en totalité), moyenne, et forte (surface d'origine bouleversée). Cela reste un critère purement qualitatif qui dépend notamment de la vitesse des déplacements, de la géométrie et profondeur de la surface de rupture ainsi que de la nature des terrains en mouvement. Pour plus de rigueur, il serait intéressant de considérer, dans le cas où existent des déformations, l'allure homogène ou au contraire hétérogène du champ des déformations. Certaines études permettent de prévoir l'évolution de ces déformations et vitesses associées, du moins dans le cas théorique d'un glissement simple (*cf.* Cartier & Delmas, 1984 et Delmas et al., 1987).

La **profondeur de la surface de rupture** (PSR) comporte quatre classes d'ordre de grandeur du demi-mètre à la dizaine de mètres et plus. Ces classes sont intéressantes à considérer pour juger du cisaillement ou non des fondations de différentes infrastructures exposées, autrement dit des déformations en profondeur. On suppose alors que la vitesse des déplacements latéraux est suffisamment importante pour cisailler les fondations dont la profondeur est supérieure ou égale à la profondeur de la surface de rupture (supérieure au cm/jour).

L'**amplitude des déplacements verticaux instantanés** (DH), à composante dominante verticale, est décomposée en quatre classes de valeur allant de l'ordre du cm à la dizaine de mètres et plus. On peut également nommer ce critère "mouvement absolu" en référence à la terminologie suivante.

Le **mouvement différentiel unitaire** (MDU) est l'unité de mesure des mouvements différentiels. En effet, les mouvements différentiels sont traditionnellement exprimés en fraction, comme le rapport du mouvement différentiel sur la distance entre les deux points d'appui où s'appliquent ces mouvements. Un mouvement différentiel unitaire de 1/250 correspond donc à une différence de mouvement de 1 cm entre deux points d'appui distants de 250 cm, indépendamment de l'amplitude du mouvement en chaque point (Mouroux et al., 1988). On en retient quatre classes de magnitude croissante allant de 1/1 000 à 1/150. Elles s'appliquent spécifiquement à l'action des phénomènes de gonflement et de tassement de sols sur le bâti.

La **pression (P) exercée au front** d'une masse en mouvement est difficilement quantifiable. Elle est probablement de l'ordre du MPa à quelques dizaines de MPa au front de certains glissements de grande ampleur et jusqu'à dix fois supérieure à la pression hydrostatique au niveau du bourrelet frontal de certaines coulées de débris (Sauret, 1987). Il semble à priori très délicat d'en proposer une échelle de valeur. Aussi est-il préférable d'adopter un autre critère d'appréciation, beaucoup plus qualitatif, qui repose sur la géométrie de la surface de contact entre front de la masse en mouvement et élément exposé. Cela permet, faute de mieux, de distinguer pour le bâti trois cas de figures auxquels seront associés des niveaux d'endommagement variables.

Concernant le critère **énergie cinétique** (EC), on a retenu pour la quantification en unité kilo-joules, 5 classes de valeurs allant de l'ordre du millième de kJ au millier de kJ. L'effet d'impact étant réservé à des volumes rocheux indépendants (blocs), la valeur maximale de EC retenue a été calculée à partir d'une hauteur de chute libre fixée à 200 m, ce qui donne une vitesse critique théorique en fin de chute de 60 m/s, cas extrême, mais possible dans la nature.

Le critère **distance horizontale (D)** entre élément exposé et zone de départ de la masse en mouvement a été retenu pour qualifier l'effet de souffle. On suppose que cet effet de souffle apparaît à partir d'une énergie cinétique libérée de l'ordre du méga-joules (MJ) et qu'il se propage alors, dans tous les cas de figure, au delà de 100 m, ce qui semble en accord avec les rares cas réels analysés. Trois tranches de distance d'éloignement de l'élément exposé ont été retenues : 0-20 m, 20-100 m, 100 m et plus.

On a retenu pour la **hauteur (H) des accumulations** cinq classes de hauteurs s'étendant du demi-mètre à la centaine de mètres et davantage.

Enfin, le critère **profondeur des ablations** (PA) comporte pour sa part quatre classes allant du demi-mètre à la dizaine de mètres et plus.

Tab. 3.3. Critères et échelles de magnitude applicables aux phénomènes de mouvements de terrain (Leone, 1996)

MAGNITUDE		TYPES DE PROCESSUS														
ECHELLES DE MAGNITUDE	CRITERES	I	DL		DV			PL	IM			ES	AC	AB
	CINEMATIQUES	1	VL (cm/an)			VV (mm/an)	MDU (1/1 000)		ECv (cm3)	EC (0,1 kJ)	ECc (m/s)			
		2	VL (m/an ou mm/jour)			VV (cm/an)	MDU (1/500)		ECv (m3)	EC (1 kJ)	ECc (10 m/s)			
		3	VL (cm/jour)			VV (dm/an)	MDU (1/250)		ECv (10 m3)	EC (10 kJ)	ECc (>= 100 m/s)			
		4	VL (m/jour)			VV (m/an ou mm/jour)	MDU (1/150)	P (N/m2)	ECv (>= 100 m3)	EC (100 kJ)				
		5	VL (>= m/s)			VV (cm/jour)				EC (1000 kJ)				
		6				VV (m/jour)								
		7				VV (>= m/s)								
	GEOMETRIQUES	1	CDL (faible à nul)	PSR (0,5 m)	DH (cm)	CDV (faible à nul)		SC (SF=1/3 SE)				D (0-20 m)	H (0,5 m)	PA (0,5m)
		2	CDL (moyen)	PSR (1m)	DH (dm)	CDV (moyen)		SC (SF=2/3 SE)				D (20-100 m)	H (2 m)	PA (1 m)
		3	CDL (fort)	PSR (5m)	DH (m)	CDV (fort)		SC (SF=SE)				D (> 100 m)	H (10 m)	PA (5m)
		4		PSR (>= 10m)	DH (>= 10 m)								H (>= 100 m)	PA (>= 10 m)
		5												

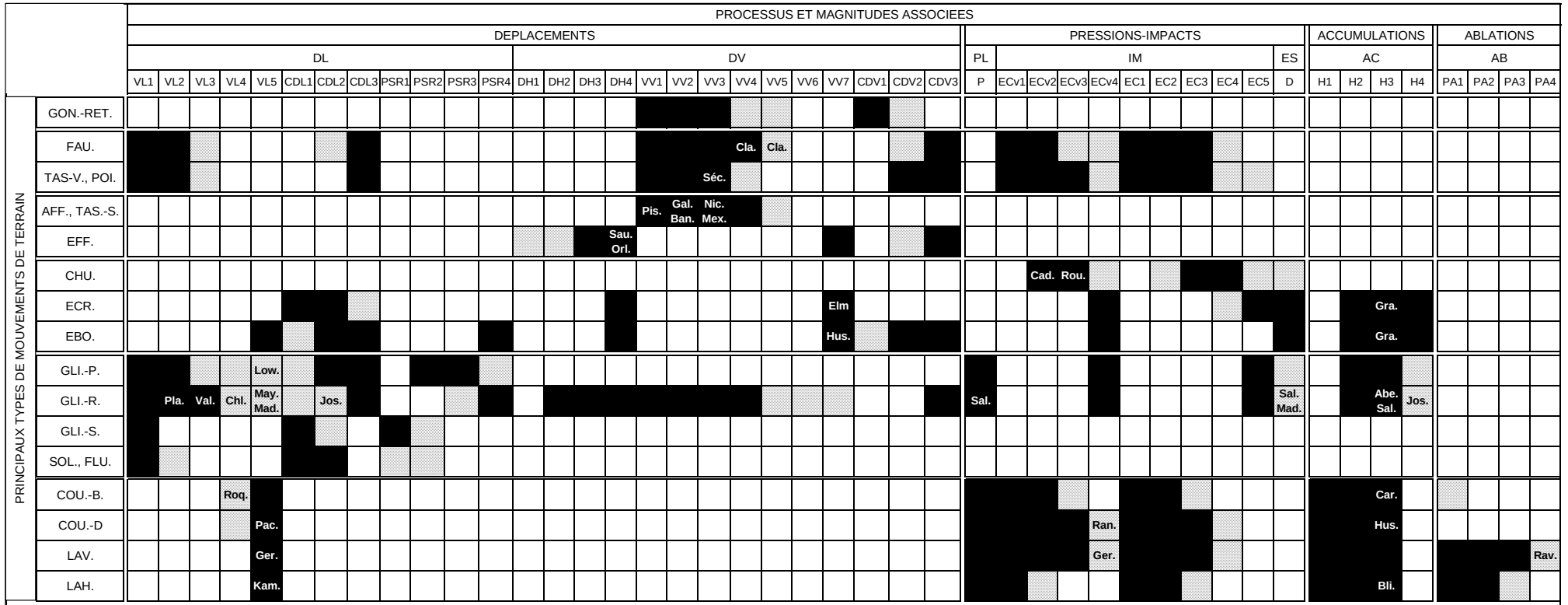
CRITERES DE MAGNITUDE

MDU : mouvement différentiel unitaire au contact de la structure exposée
SC : géométrie de la surface de contact entre masse en mouvement et structure exposée
(avec SF : surface du front de la masse en mouvement, SE : surface exposée de la structure)
CD : importance du champ des déformations de surface (avec CDL quand associé aux DL et CDV quand associé aux DV)
DH : amplitude des déplacements verticaux instantanés
P : pression de poussée latérale au front de la masse en mouvement
V : vitesse des déplacements (avec VL pour latéraux et VV pour verticaux)
D : distance entre élément exposé et source de la masse génératrice de l'effet de souffle
(supposé apparaitre pour EC > 1 MJ et se propager au delà de 100 m)
H : hauteur des accumulations
PA: profondeur d'ablation du sol
EC : énergie cinétique de la masse en mouvement
(avec équivalences ECv pour un volume donné et ECc pour une vitesse donnée)
PSR : profondeur de la surface de rupture de la masse en mouvement

TYPES DE PROCESSUS

DL : déplacements à composante latérale (horizontale) dominante
DV : déplacements à composante verticale dominante
PL : poussées latérales continues
IM : effets d'impact
ES : effets de souffle
AC : accumulations
AB : ablations

Tableau 3.4. Classification des phénomènes de mouvements de terrain en fonction de plusieurs gammes de magnitude des processus d'endommagement associés (Leone, 1996).



PRINCIPAUX TYPES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN

GON.-RET. : gonflement - retrait
FAU. : fauchage des couches
TAS.-V., POI. : tassement de versant et poinçonnement
AFF., TAS.-S : affaissement, tassement de sol
EFF. : effondrement rocheux
CHU. : chute de blocs
ECR. : écroulement rocheux
EBO. : éboulement d'extension catastrophique
GLI.-P. : glissement plan
GLI.-R. : glissement rotationnel
GLI.-S. : glissement superficiel ou pelliculaire
SOLI., FLUA. : solifluxion, fluage
COU.-B. : coulée de boue
COU.-D. : coulée de débris
LAV. : lave torrentielle
LAH. : lahar

CRITERES DE MAGNITUDE

CD : importance du champ des déformations de surface
(avec CDL quand associé aux DL et CDV quand associé aux DV)
DH : amplitude des déplacements verticaux instantanés
V : vitesse des déplacements (avec VL pour latéraux et VV pour verticaux)
H : hauteur des accumulations
PA: profondeur d'ablation du sol
EC : énergie cinétique de la masse en mouvement
(avec ECv pour énergie cinétique correspondant à un volume donné)
PSR : profondeur de la surface de rupture de la masse en mouvement

EXEMPLES

Abc. : référence des exemples détaillés dans le tableau III.4 de Leone (1996)

TYPES DE PROCESSUS

DL : déplacements à composante latérale dominante
DV : déplacements à composante verticale dominante
PL : poussées latérales continues
IM : effets d'impact
ES : effets de souffle
AC : accumulations
AB : ablations

NIVEAUX DE REPRESENTATIVITE

: fréquent
: exceptionnel
: nul ou non-observé

HDR – Frédéric Leone – Mémoire

Les gammes de valeur de ces critères de magnitude sont présentées dans le **tableau 3.3**. tandis que le **tableau 3.4** donne un aperçu du niveau de représentativité de ces différentes classes de magnitude pour les principaux phénomènes de mouvements de terrain. On obtient ainsi une nouvelle classification des phénomènes de mouvements de terrain en termes de magnitude, ou de pouvoir destructeur, et ce indépendamment de la nature et du niveau des dommages possibles.

Sur le plan opérationnel, certains de ces critères peuvent être approchés par modélisation (*cf.* Mirgon et al., 1993 et Rochet, 1987), mais des progrès considérables restent à faire à ce niveau, comparé à ce qui se fait dans d'autres disciplines, notamment l'hydraulique (*cf.* Farissier, 1995) ou bien le génie parasismique (*cf*. Bard et al., 1987 et Godefroy, 1989). Cela est dû à la complexité des mécanismes et comportements mis en jeu par les mouvements de terrain, notamment ceux de grande ampleur (Durville, 1992).

Processus d'endommagement associés aux tsunamis

Nos recherches sur les tsunamis nous ont amené également à mieux cerner la dynamique propre du phénomène sur les terres et ses modalités d'endommagement au sein de la ville de Banda Aceh (**figure 3.9**). Cette compréhension *a posteriori* des processus d'endommagement du tsunami est un pas accompli en faveur d'une future modélisation de l'impact de ces phénomène sur les infrastructures.

Le tsunami est avant tout un phénomène hydraulique de submersion marine caractérisé à terre par un écoulement à forte charge solide non-newtonien (Chanson, 2005). L'action dommageable d'un tsunami se traduit sur le continent par plusieurs processus pouvant se succéder et/ou se surimposer dans le temps et l'espace. Chaque processus produit des mécanismes de ruine spécifiques qui renseignent à leur tour sur la magnitude du phénomène. Les reconnaissances de terrain ont permis de diagnostiquer 7 processus majeurs associés au passage d'un tsunami sur le milieu terrestre. Chacun peut être décrit par un ou plusieurs paramètres physiques (critères de magnitude) en théorie quantifiable et modélisable (**figure 3.10**).

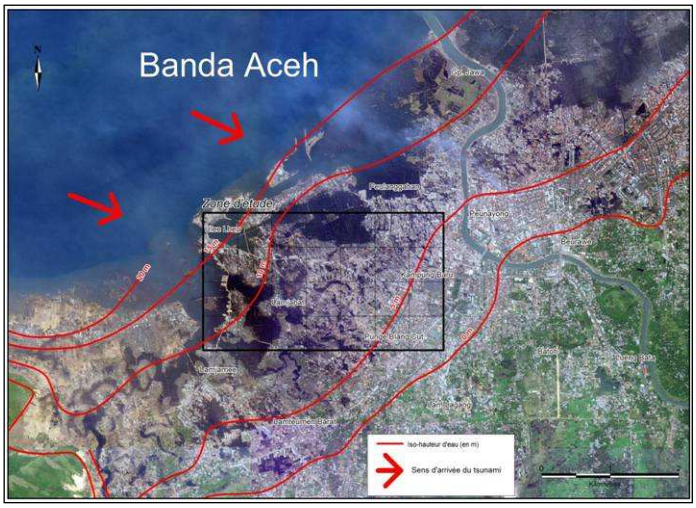
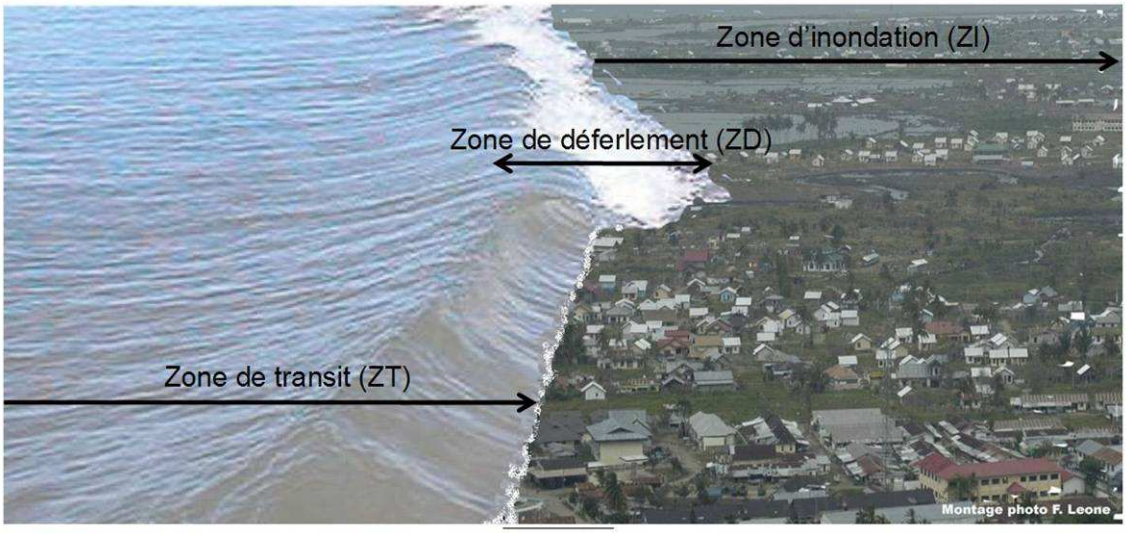


Figure 3.9. Zone d'étude des effets du tsunami du 26 décembre 2004 sur la ville de Banda Aceh (Sumatra, Indonésie) (Source Ikonos, janvier 2005).

En lien avec la dynamique d'une vague de type plongeant (cas de la seconde vague), on peut différencier ces processus élémentaires en nature et en nombre selon que l'on se trouve en amont (zone de transit ou de transfert), au sein, ou à l'aval (zone d'inondation) de la zone de déferlement (cassage de la vague). Les zones de transit et de déferlement se caractérisent par des écoulements turbulents de très forte énergie tandis que la zone d'inondation donne des écoulements laminaires beaucoup moins rapides. Ce découpage spatial simplifié et donc chronologique devient évidemment beaucoup plus complexe à modéliser lorsque plusieurs vagues se succèdent comme ce fût le cas à Banda Aceh. Les processus dominants associés

sont des actions hydrodynamiques temporaires impliquant des forces de pression et d'impact qui sont fonction de la vitesse de l'écoulement, de sa hauteur et de sa charge solide. Y sont également associés des effets d'érosion (abrasion, affouillement) et d'accumulation de débris divers, arrachés, charriés puis déposés par le tsunami. Les gros objets flottants tels des bateaux ou les voitures peuvent provoquer des effets d'impact et d'embâcle très dommageables pour les infrastructures, parfois à plusieurs kilomètres du rivage. On trouve à Banda Aceh un bateau de 63 m de long et 20 m de large appartenant à la compagnie nationale d'électricité (PLN) et qui a été déposé à 2,6 km de sa zone de stationnement habituelle.



		Localisation			
Processus d'endommagement	**Critères de magnitude et unités de mesure**	**ZT**	**ZD**	**ZI**	**Modes d'endommagement dominants du bâti**
Impact latéral	Vitesse (m/s), Pression (N / m2)	X	X		Explosion, rupture des piliers et des murs, défonçage, perforation, arrachement
Impact vertical	Vitesse (m/s), Pression (N / m2)		X		Ecrasement des toitures et des structures
Pression latérale continue	Vitesse (m/s), Pression (N / m2), Durée (mn)	X			Fléchissement à rupture des structures
Pression verticale continue	Vitesse (m/s), Pression (N / m2), Durée (mn)	X	X	X	Soulèvement des planchers et/ou écrasement suivant le sens
Accumulation	Epaisseur (m)	X	X	X	Ensevelissement des structures, comblement des pièces
Erosion/Affouillement	Profondeur (m)	X	X		Déchaussement des fondations, basculement, effondrement
Inondation durable	Hauteur (m) / Durée (mois)			X	Endommagement des matériaux, salinisation

ZT : Zone de transit
ZD : Zone de déferlement
ZI : Zone d'inondation

Figure 3.10. Décomposition du tsunami en processus d'endommagement dominants et critères de magnitude associés (montage photo F. Leone).

Le retrait des eaux (*backwash*) joue un rôle dommageable mineur sur les infrastructures. La fin du processus laisse subsister des poches d'inondation plus ou moins permanentes d'eaux salées préjudiciables pour certains matériaux. Un an après le passage du tsunami, certains secteurs affouillés, très anciennement marécageux (puis asséchés), ou subsidés, laissaient entrevoir des bâtiments avec les fondations dans l'eau.

Toute tentative de mise au point de matrices d'endommagement nécessite de quantifier au préalable les processus d'endommagement avec des critères physiques simples débouchant sur des échelles de magnitude. La vitesse des écoulements et leur hauteur sont les deux paramètres physiques les plus accessibles et pertinents pour tenter de modéliser a priori ou a posteriori le potentiel de destruction d'un tsunami, faute de pouvoir reconstituer facilement le champ des pressions et donc d'en déduire les effets directs sur les infrastructures.

Des auteurs mentionnent des pressions d'environ 6,8 tonnes/m^2 sur le front de mer de Kamala Beach (Phuket) en Thaïlande pour une hauteur de vague de 3 m (Srivichai et al.,

2005). Les forces de pression exercées sont en effet fonction des masses en mouvement et donc des innombrables débris transportés, ce qui laisse supposer un champ des déformations sur le bâti très anisotrope et aléatoire. Les nombreux embâcles formés par ces mêmes débris et les effets d'abri liés aux bâtiments, ne feraient que complexifier une éventuelle modélisation.

A Banda Aceh, la vitesse de l'écoulement a pu être déterminée ponctuellement à partir de deux vidéos amateurs. L'une tournée à environ 2,5 km de la côte dans le centre de Banda Aceh (près de la Grande Mosquée) montre un flot de débris de 1,5 m de hauteur dont le front avance à une vitesse de l'ordre de 1,5 à 1,7 m/s (Chanson, 2005). Il s'agit pour Lavigne et al. (2006) de la première vague en fin de course. L'autre vidéo tournée à 8h50 en zone péri-urbaine au sud-ouest de l'agglomération à 2,4 km de la côte, soit près de 36 mn après la seconde vague, montre un écoulement beaucoup plus fluide mais très chargé, de 3 m de hauteur et de vitesse environ 2 fois supérieure à la précédente (**figure 3.11**).

Figure 3.11. Captures des deux vidéos montrant l'écoulement chargé en débris. 1 : près de la Grande Mosquée (première vague en fin de course, V=1,5 m/s, H = 1,5 m, distance à la côte = 2,5 km) ; 2 : point de coordonnées UTM WGS84 m : x=752952m et y=612274 m et photo de la zone en janvier 2006 (36 mn après la seconde vague, V=3 m/s, H=3m, distance à la côte = 2,4 km).

A côté de ces quelques valeurs ponctuelles de pression et de vitesse, l'autre grandeur exploitable spatialement pour caractériser la magnitude du tsunami est la hauteur atteinte par l'onde de submersion sur les terres. La mesure et la cartographie systématique des hauteurs de submersion ont fait l'objet de plusieurs campagnes, américaines, japonaises et françaises. La cartographie obtenue par l'équipe française dans le cadre du programme de recherche Tsunarisque montre un gradient de hauteur d'eau s'étendant de 0 et 15 m sur notre secteur d'étude (Lavigne et al., 2006) (**figure 3.9**). Rappelons qu'au contact des côtes, la vitesse de l'onde marine décroît tandis que son amplitude augmente pour satisfaire l'équation de conservation de l'énergie, jusqu'au moment où la vague déferle. Jusqu'à ce point de rupture, la hauteur des vagues est donc proportionnelle à la capacité de destruction du tsunami (son énergie potentielle) et constitue en cela un très bon indicateur de magnitude du phénomène. Les échelles de magnitude proposées successivement depuis 75 ans par Imamura et Iida, Soloviev, Abe, Hatori, Murty et Loomis sont basées sur des valeurs maximales de hauteurs de vagues *(*H_{max} en m*)* sur la côte (Papadopoulos G. A & Imamura F., 2001). Les valeurs maximales mesurées sur la côte dans notre secteur d'étude de Ulee Lheu (14 m) correspondent à une magnitude de 3 sur l'échelle d'Imamura et Iida ($M = \log_2 H_{max}$) et de 9.1 selon la classification de Abe (1981).

3.2.3. Classes de vulnérabilité et indicateurs de valeurs des éléments exposés

Classes de vulnérabilité

Par éléments exposés ou enjeux, on définit les composantes d'un territoire donné tant du point de vue de sa constitution (bâti, infrastructures diverses, aires naturelles, etc.) que de son fonctionnement : activités, fonctions diverses et individus associés aux éléments physiques précédents (objets géographiques) et que l'on peut donc renseigner dans un SIG sous forme de données attributaires. Le terme équivalent anglo-saxon est "*elements at risk*" (Varnes, 1984).

Ces éléments exposés vont réagir différentiellement à la sollicitation d'un aléa en fonction de leur capacité de résistance physique ou fonctionnelle, autrement dit leur nature. Il convient par conséquent de les hiérarchiser a priori sur la base d'indicateurs de vulnérabilité. Dans le cas le plus courant du patrimoine bâti, ces indicateurs donnent lieu à des typologies spécifiques en fonction des aléas concernés. Ainsi, l'Echelle Macrosismique Européenne (EMS 98) propose un « standard » dans la définition des typologies du bâti face aux séismes, basé sur la compilation des dommages observés lors des séismes passés (Grünthal, 2001). Dans une démarche de simulation des dommages, ces typologies standards européennes sont ensuite souvent adaptées aux contextes locaux. Il est évident que la simple utilisation du type de bâtiment considéré comme analogue à la vulnérabilité est insuffisante. Dans le premier cas, les variations de résistance à l'intérieur d'un même type de bâtiment peuvent être souvent tout aussi importantes que les variations entre des types de bâtiment différents. Dans le second cas, un système de cette nature est relativement peu souple dès lors qu'il s'agit d'ajouter de nouveaux types de bâtiment. Pour cela, l'EMS 98 a introduit des notions de conception des structures, en distinguant le degré de conception parasismique (sans, moyen, bon) pour les structures en béton, des systèmes de renforcement employés pour les structures en maçonnerie.

Les typologies utilisées doivent être bien représentatives du patrimoine du pays ou de la région étudié sans être trop exhaustives. Il faut donc toujours, au moins en théorie, analyser les grandes périodes de construction avant d'entamer l'étude d'un parc immobilier, d'une ville ou d'une région. Souvent hétérogène par sa nature et sa distribution spatiale, des outils doivent être utilisés afin de réduire les coûts de cette caractérisation. Plusieurs sources d'information peuvent être exploitées pour établir ou affiner ces typologies à grande échelle (1/ 25 000 au 1 / 500) :

– Les *bases de données INSEE* (http://www.insee.fr) : ces données disponibles par commune fournissent les informations suivantes : position du bâtiment, son âge, sa hauteur et son type (maison individuelle ou habitation collective).

– La *base de données topographique* de l'IGN (BD TOPO®) (http://ign.fr) : ce référentiel géographique national à grande échelle (RGE) permet de localiser avec précision un certain nombre d'infrastructures (bâti, réseaux, équipements). Les bâtiments y sont différenciés en grandes catégories et leurs hauteurs sont renseignées dans la table attributaire.

– La *base de données de la Direction Générale des Impôts (*DGI) : en plus d'offrir un fond parcellaire pour la majeure partie du territoire, cette base géoréférencée confidentielle offre de multiples renseignements sur le bâti, sa valeur, son âge, ses occupants et certaines caractéristiques physiques.

– Les *images satellites de haute résolution* (Quick Bird par exemple) : avec un traitement d'image approprié, des informations sur quelques critères structuraux entrant dans la définition de la typologie peuvent être identifiées (par exemple forme du toit, forme en plan…) (**figure 3.12**).

Figure 3.12. Extrait de scène du satellite Quick Bird (600 km d'altitude). Secteur de Banda Aceh avant le passage du tsunami du 26 décembre 2004. De résolution comparable aux photo-aériennes, ce support permet de différencier le bâti sur de vastes étendues (source http://www.digitalglobe.com).

– Les *photographies aériennes 2D/3D* : couplées aux cadastres des communes, cet outil permet d'avoir des informations sur la nature du toit, la hauteur des bâtiments, la forme en plan et parfois en élévation. Elles aident à l'identification des zones de bâti homogène.

– Les *itinéraires* : développée à Nice dans le cadre du programme GEMITIS (1999) et poursuivies dans RISK-UE (2003), la méthode des itinéraires, choisis aléatoirement dans un quartier préalablement défini comme homogène, permet de caractériser tous les bâtiments le long de ces itinéraires. La répartition des types sera reportée à l'ensemble du quartier.

– Les *pages jaunes* : pour quelques grandes villes, les pages jaunes proposent une base de données des photographies des façades de l'ensemble des constructions. Repérées suivant l'adresse géographique, elles permettent d'analyser le long d'un itinéraire certaines typologies de construction (**figure 3.13**).

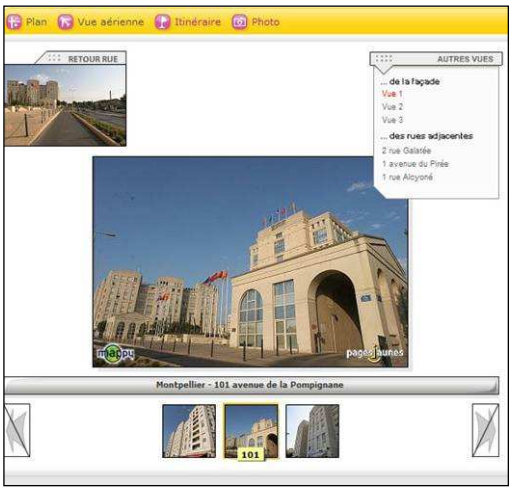


Figure 3.13. Exemple de consultation de façade proposée par le site des Pages jaunes (Hôtel de Région Languedoc-Roussillon à Montpellier, situé en zone inondable)

– Des *enquêtes* : menées auprès de la population, des services techniques d'une commune ou d'un propriétaire de parc immobilier, elles permettent d'approcher des critères structuraux simples, utiles dans la définition d'un niveau de vulnérabilité élémentaire. L'utilisation d'Internet peut s'avérer utile pour travailler à grande échelle et collecter via le web les réponses aux enquêtes directement sous format numérique.

Ces typologies représentatives des classes de vulnérabilité du bâti sont courantes pour les séismes et présentent quelques variantes suivant les pays. Si on tient compte des subdivisions suivant la hauteur et l'année de construction, la typologie américaine comporte plus de 90 typologies différentes qui rendent difficile son utilisation (ATC, 1988). Dans sa dernière version, la méthode américaine d'estimation des dommages (HAZUS^{TM}) intègre quatre types principaux d'enjeux (FEMA, 1999) : le bâti courant, les constructions spéciales, les infrastructures de transport et les réseaux d'eau, d'énergie et de communication. Chaque type d'enjeux est à son tour différencié en sous-types. Ainsi, pour le bâti courant sont définies 38 typologies différentes de constructions, sur la base notamment de leur système structural et de leur hauteur. Les constructions spéciales (les hôpitaux, les établissements d'enseignement, les stations de police et de pompiers) sont quant à elles différenciées en 8 classes, en fonction de leur affectation. On distingue également les infrastructures liées aux transports, c'est à dire les autoroutes, les chemins de fer, les transports publics, les ports et enfin les aéroports. Chaque infrastructure liée aux transports est également différenciée en plusieurs catégories et sous catégories, en fonction de leur destination ainsi que du type de structure. A titre d'exemple, pour les chemins de fer il existe 7 classes comportant un total de 56 sous-classes ; pour les aéroports, 7 classes et 87 sous classes. Enfin, les réseaux d'approvisionnement en eau, d'assainissement, de transport de pétrole et gaz naturel, électriques ainsi que de télécommunication sont regroupés dans la dernière catégorie. Il existe également des sous classes pour les réseaux : 20 pour les réseaux en eau ou encore 12 pour les réseaux électriques.

Cet exemple de typologie fait apparaître la difficulté d'utiliser une méthode d'étude de la vulnérabilité développée dans un autre pays ou pour une autre ville : les typologies définies dans la méthode HAZUS^{TM} sont ainsi représentatives des bâtiments construits en Amérique du Nord, certaines ne se retrouvent pas en Europe et une partie du patrimoine immobilier comme les centres urbains les plus anciens n'est pas représentée.

Une fois la typologie définie, l'indice de vulnérabilité de base de chacune des typologies est modulé en fonction des critères structuraux relevés lors de l'analyse visuelle. Les critères recherchés au moment de l'analyse visuelle sont le plus souvent (AFPS, 2005) :

- le nombre d'étages (bâtiments de grande hauteur),
- les conditions d'entretien,
- la régularité verticale,
- la présence d'un étage pilotis,
- la capacité de torsion,
- la régularité en plan,
- la possibilité d'entrechoquement,
- la présence d'éléments lourds,
- la présence de poteaux courts,
- l'année de construction (par rapport, à l'année d'entrée en vigueur des normes parasismiques).

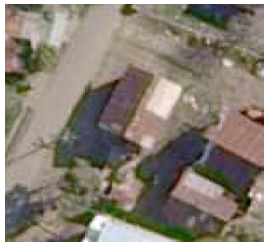
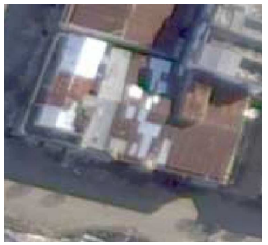
Une note est attribuée à chacun de ces critères de vulnérabilité. Le résultat du relevé est donc une note – ou critère de vulnérabilité global – permettant d'estimer la vulnérabilité sismique du bâtiment indépendamment du niveau d'aléa.

Une typologie du bâti adaptée aux tsunamis

Nos travaux sur le tsunami de l'Océan indien du 26 décembre 2004 ont contribué à la mise au point d'une typologie du bâti (classes de vulnérabilité) spécifiquement adaptée aux tsunami dans le contexte indonésien mais adaptable aux zones côtières des outremers français.
Le premier objectif recherché était d'établir une toute première échelle « macro-tsunamique » des effets du tsunami sur différentes classes de bâtiments, par analogie aux échelles macro-sismiques et dans un même objectif d'application. Cette échelle a permis de reconstituer la dynamique du phénomène sur les terres et de cartographier avec précision la zone de déferlement de la vague principale après interpolation numérique et spatiale des observations de terrain. Le second objectif était d'ébaucher les toutes premières courbes d'endommagement permettant de corréler la hauteur de la vague avec les niveaux d'endommagement de différentes classes de bâtiments.

Pour ce faire nous avons établi, après plusieurs phases de validation terrain à Banda Aceh (Sumatra), deux typologies simplifiées et facilement réutilisables. La première typologie concerne la nature du bâti (au regard de sa vulnérabilité) et la seconde les principaux modes et niveaux d'endommagement constatés de ce bâti. Cette dernière sera abordée dans le paragraphe suivant.

Tableau 3.5. Typologie du bâti (classes de vulnérabilité) adaptée à l'analyse des dommages post-tsunami. Application à la reconstitution du phénomène et aux scénarios de pertes (Leone et al, sous presse)

	Classes de vulnérabilité du bâti (tsunami - Banda Aceh)					
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	
Critères d'indentification terrain	Bâtiment individuel avec structure bois, remplissage de bois ou de briques, couverture de tuiles plates rouges ou de tôles brutes, pas d'étage, parfois sur pilotis	Bâtiment individuel avec structure béton à peine renforcée (poteaux de 20 cm * 20 cm), maçonnerie de briques ou de moellons, 0 à 1 étage, couverture de tôle brute ou peinte, ou de panneaux-tuiles rouges ou gris	Bâtiment individuel avec structure béton renforcée, maçonnerie de briques, moellons ou béton, 1 étage, couverture de panneaux-tuiles rouges, bleus, gris ou verts ou de tuiles rouges	Bâtiment collectif avec structure béton non renforcée, 1 à 3 étages, couverture de tôles ou de panneaux-tuiles	Bâtiment collectif avec structure béton renforcée, 1 à 3 étages, couvertures diverses	
Vue terrain						
Critères d'identification aérienne	Géométrie en plan simple (rectangle ou carré). Toitures rouillées et planes. Petite dimension.	Géométrie en plan simple (rectangle ou carré). Toitures planes rarement rouillées et plus souvent de couleur uniforme grise ou rouge. Dimension petite à moyenne.	Géométrie en plan plus complexe. Plusieurs niveaux de toitures. Toitures inclinées et de couleurs vives. Dimension moyenne à grande.	Géométrie en plan simple (rectangle). Toitures planes ou inclinées, rouillées le plus souvent. Grande dimension.	Géométrie en plan plus ou moins simple. Terrasses ou toitures diverses. Grande dimension.	Les mosquées présentent une géométrie simple (carré) avec un toit plat ou à quatre pans surmonté d'une coupole.
Vue aérienne (échelles variables)				 Echelle réduite par 1,5	Echelle réduite par 2	

Nous avons proposé pour les tsunamis 5 classes de bâtiments de vulnérabilité décroissante (A, B, C, D, E) assez facilement distinguables sur le terrain et sur photo-aériennes selon des critères de forme, de dimension et de nature de toiture (**tableau 3.5**). Cette classification se base entre autre sur les observations de nature et de vulnérabilité effectuées par Ghobarah et al. (2006) et Boen (2006). Le type A est le moins résistant. Il s'agit de constructions très légères faites de bois et de tôles, parfois sur pilotis comme c'était le cas en bordure des lagunes du secteur de Ulee Lheu. Le type B correspond à du bâti maçonné (briques) à structure légère comportant des poteaux de 20 x 20 cm renforcés par 4 fers lisses de 8 mm de diamètre au quatre coins de l'édifice. C'est le type le plus représenté dans le secteur d'étude. Il s'agit le plus souvent d'habitations auto-construites appartenant à des classes sociales moyennes. Le type C correspond toujours à une habitation individuelle du style villa, parfois de haut standing. La construction présente une géométrie en plan plus complexe et toujours un étage. La structure est renforcée et calculée. Le type D est celui des bâtiments collectifs (blocs) à usage d'habitation, de commerce ou de service public (enseignement, administrations). La structure est en général moyennement renforcée pour la taille de ces bâtiments à plusieurs poteaux, de un à deux étages mais de géométrie simple. Ils dominent dans le centre ville de Banda. Le type E caractérise également des bâtiments collectifs, le plus souvent à usage administratif, religieux (mosquées) ou privé (hôtels), mais de très bonne conception avec des structures en béton armé renforcées et calculées. Les nombreuses mosquées présentes sur le secteur d'étude (16) ont été regroupées dans la classe E précédente compte tenu de la qualité de leur construction et de leur bonne transparence hydraulique. Sur les photos aériennes, des incertitudes de distinction peuvent se poser entre les classes A et B, ou B et C lorsque les toitures sont respectivement semblables à A ou C. Une classe NI (Non Identifié) a été réservée aux très nombreux bâtiments rasés (4095) et dont il est difficile de connaître la nature initiale à posteriori. La typologie retenue est assez adaptée à la classification du bâti en contexte de pays en développement des zones tropicales. Cela concerne aussi la plupart des territoires français d'Outre-Mer exposés à d'éventuels tsunamis (Martinique, Guadeloupe, Guyane, La Réunion, Mayotte, Tahiti, etc.).

Une typologie multi-éléments adaptée aux mouvements de terrain

Dans le même esprit et en vue de la préparation de matrices d'endommagement, nous avons établi pour les phénomènes de mouvements de terrain une typologie de 5 grandes familles d'éléments exposés dont on a cherché à apprécier les modalités et niveaux d'endommagement spécifiques (**tableau 3.6**). Cette typologie recouvre la majorité des éléments structurels susceptibles d'être recensés sur une carte topographique : le bâti, les réseaux et les surfaces dites naturelles (c'est à dire non-urbanisées) auxquels sont associés des personnes, des sous-éléments le plus souvent mobiles ou temporaires (animaux, végétaux, mobilier, véhicules, stocks, récoltes) et des fonctions diverses (économiques, sociales, de transport-communication-distribution, etc.).

Tableau 3.6. Typologie des éléments exposés retenus pour la construction des matrices d'endommagement « mouvements de terrain » (Leone, 1996a).

BATIS :	B1 : constructions vétustes ou de qualité médiocre, sans fondations et sans liaisons structurelles, le plus souvent construites hors normes traditionnelles (granges, appentis, certaines résidences secondaires). Cette catégorie peut être étendue aux constructions du type suivant lorsque celles-ci ont fait l'objet de dégradations structurelles non consolidées. B2 : constructions traditionnelles, en maçonnerie, ou préfabriquées individuelles légères, sans ossature armée. Généralement des habitations ou des immeubles collectifs anciens. B3 : constructions de type habitat individuel de bonne qualité, réalisées en matériaux traditionnels, en béton ou en composants préfabriqués et pourvues d'une ossature armée. B4 : constructions de type habitat collectif d'au moins trois niveaux, de bonne qualité, réalisées en matériaux traditionnels, en béton ou en composants préfabriqués et pourvues d'une ossature armée.
RESEAUX :	R1 : routes de viabilité médiocre (1 voie à deux voies étroites) R2 : routes de bonne à très bonne viabilité (2 voies larges à 4 voies) C : conduites souterraines L1 : lignes traditionnelles (sur poteaux simples) aériennes L2 : lignes traditionnelles souterraines L3 : lignes aériennes montées sur armatures renforcées (haute tension) VF : voies ferrées traditionnelles Ca : canaux aériens
SURFACES NATURELLES :	T : terrains naturels et sols associés (foncier) CE : cours d'eau naturels PE : plans d'eau naturels ou artificiels
SOUS-ELEMENTS :	OA : occupations animales sauvages (faune) ou d'élevage (cheptel vif) OV : occupations végétales naturelles (flore) ou cultivées (cultures) M,V : biens mobiliers et véhicules
PERSONNES :	Pr : personnes situées sur le réseau routier Pvf : personnes situées sur le réseau ferroviaire Pt : personnes à l'air libre situées sur terrains naturels

Les différenciations les plus fines dans le degré de vulnérabilité sont proposées pour le bâti (4 classes de B1 à B4). Cette typologie des éléments exposés repose à la base sur un découpage du territoire et son principe s'apparente à celui qui était préconisé à l'époque de son élaboration par la Délégation au Risques Majeurs (D.R.M., 1985) pour l'élaboration des plans d'exposition aux risques. La typologie de la D.R.M. reposait pour sa part sur un découpage du territoire beaucoup moins discriminant : celui donné par les plans d'occupation des sols (P.O.S.).

Indicateurs de valeurs des éléments exposés

Nous avons vu dans la partie théorique que les enjeux et les pertes potentielles doivent s'exprimer dans des systèmes de valeurs que l'on affecte à un ensemble d'éléments exposés. Des valeurs souvent marchandes, basées sur les prix d'acquisition ou de remplacement des biens, ou bien d'utilité (économique, stratégique, fonctionnelle, patrimoniale, environnementale, affective, esthétique, etc.). C'est l'expression de ces valeurs qui permet de traduire le risque encouru en tant que pertes potentielles d'où la nécessité de les intégrer du moment où l'on cherche à établir des scénarios de pertes. Dans le cadre d'une application, ces différentes valeurs unitaires peuvent être récoltées avec plus ou moins de facilité. On peut par exemple retenir des valeurs standards fournies par la bibliographie ou bien affiner celles-ci par des enquêtes de terrain. Tout dépend des objectifs recherchés.

A titre indicatif et exploratoire, on propose dans le **tableau 3.7.** quelques indicateurs permettant d'exprimer les valeurs unitaires (marchande, d'usage, fonctionnelle et humaine) de 9 catégories d'éléments exposés.

Tableau 3.7. Quelques indicateurs d'expression des différentes valeurs attribuables aux éléments exposés dans une démarche de scénario de risque

<table>
<tr><th>ELEMENTS EXPOSES</th><th>Valeur marchande</th><th>Valeur d'usage</th><th>Valeur fonctionnelle (emploi)</th><th>Valeur fonctionnelle (logement)</th><th>Valeur fonctionnelle (transport-communication-distribution)</th><th>Valeur humaine</th></tr>
<tr><td>BATI</td><td>Prix de vente au m² ou à l'unité</td><td>Chiffre d'affaire annuel</td><td>Nombre d'emplois</td><td>Nombre de lits</td><td>-</td><td>Nombre de personnes</td></tr>
<tr><td>RESEAU ROUTIER</td><td rowspan="5">Coût de construction à l'unité linéaire</td><td rowspan="5">Chiffre d'exploitation annuel</td><td rowspan="7">-</td><td rowspan="7">-</td><td rowspan="6">(1)
$VFt = \frac{\frac{1}{Nd+1} * Tt}{Tt + \sum_{i=1}^{n} \frac{Ndi * Tdi}{Nd}}$</td><td rowspan="7">-</td></tr>
<tr><td>RESEAU FERROVIAIRE</td></tr>
<tr><td>RESEAU ELECTRIQUE</td></tr>
<tr><td>RESEAU D'ADDUCTION D'EAU</td></tr>
<tr><td>RESEAU TELEPHONIQUE</td></tr>
<tr><td>TERRAIN AGRICOLE</td><td>Prix de vente à l'unité de surface</td><td>Prix de vente de la production à l'unité de surface/an</td><td rowspan="2">-</td></tr>
<tr><td>PERSONNE</td><td>Prix d'une vie humaine</td><td>Valeur d'activité humaine annuelle</td></tr>
<tr><td>STOCK, RECOLTE, VEHICULE</td><td>Prix de vente à l'unité</td><td colspan="5">-</td></tr>
<tr><td colspan="7">(1) t : section de réseau touché d : section de réseau de déviation Nd : nombre de déviations possibles T : trafic journalier pour une route
: nombre de passagers journaliers pour une voie ferrée
: nombre d'abonnés pour un réseau téléphonique ou d'adduction d'eau
: puissance transportée pour une ligne électrique</td></tr>
</table>

Nos recherches sur les mouvements de terrain nous ont amené à proposer une formulation originale d'appréciation de la valeur fonctionnelle (en l'occurrence la fonction de communication-transport-distribution) d'un réseau, quelle que soit sa nature. Cette valeur, exprimée de 0 à 1, s'applique à chaque section de réseau. Elle prend en compte la capacité de cette section (trafic journalier, etc.) et la possibilité ou non de la dévier en cas d'endommagement. Plus cette valeur sera proche de 1 et plus cette section de réseau sera vitale et difficilement substituable. L'importance de ces critères a pu être mise en évidence lors des investigations menées sur la région du Diois (Leone, 1996a). Ce critère, combiné à la probabilité de rupture d'un tronçon donné, permettrait d'aboutir à un indice de risque de dysfonctionnement du réseau routier concerné.

Notons que le prix de la vie humaine a déjà fait l'objet de tentatives d'évaluation dans le passé, même si la mesure du risque de pertes humaines ne peut se réduire à des considérations purement économiques (à actualiser). Cette quantification économique de la valeur humaine est un problème délicat et difficile qui a surtout été étudié jusqu'à présent dans le domaine routier. Différentes approches permettent cependant de l'évaluer. Elles aboutissent à des ordres de grandeur comparables (**tableau 3.8.**). La première repose sur le principe de la "**disponibilité à payer**" (Commissariat Général du Plan, 1994), plus précisément de la disposition des personnes à payer pour une réduction de leur probabilité de décès. Mais la mise en oeuvre directe et complète de ce principe se heurte à des obstacles d'ordre à la fois théorique et pratique. Une méthode d'estimation de la disponibilité à payer est celle dite des "valeurs déclarées", où la disponibilité à payer se déduit de réponses à des enquêtes d'intention auprès des usagers. Mais ces enquêtes sont délicates à mener et il n'en existe pas encore en France. Une autre approche repose sur le principe du "**capital humain compensé**" (Le Net, 1994, *in* Commissariat Général du Plan, 1994). Elle revient à évaluer les pertes de production actualisées résultant du décès. Ainsi, certaines études évaluent la valeur collective de la vie d'un individu comme la somme actualisée des satisfactions qu'il recueillera dans le futur. La dernière approche permettant d'évaluer le prix de la vie humaine est celle de l'estimation du "**coût pour la collectivité**" des accidents (qui n'est supporté que partiellement par les assurances), en tenant compte en particulier des frais médicaux et de la perte de production (Le Net, 1978 et Merlin, 1994). Selon les Nations Unies (1979), la valeur d'usage ou d'activité annuelle d'une vie humaine, peut se chiffrer approximativement et en moyenne par 7 à 10 fois le P.I.B. par habitant et par an du pays concerné.

Tableau 3.8. Différentes estimations de la valeur économique de la vie humaine.

	Approche 1 (valeurs 1992)	Approche 2 (valeurs 1994)	Approche 3 (valeurs 1993)
Blessé léger	2 744 €	2 744 €	1 982 €
Blessé grave	31 250 €	56 402 €	35 061 €
Décès	686 000 €	548 780 €	304 878 €

Approche 1 : "disponibilité à payer" (Commissariat général au plan, 1994)
Approche 2 : "capital humain compensé" (Le Net, 1994)
Approche 3 : "coût pour la collectivité" (Merlin 1994 et Ledoux, 1989)

3.2.4. Modalités d'endommagement structurel et échelles d'intensité

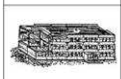
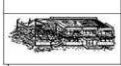
La mise en œuvre de scénarios de risque, en complément d'une bonne connaissance des différents processus d'endommagement des phénomènes évoqués plus haut, doit également reposer sur un diagnostic rétrospectif des modalités d'endommagement de différentes catégories d'éléments exposés, matériels, humains ou fonctionnels. Cet effort d'analyse des facteurs de sensibilité intrinsèque de ces enjeux (typologies) et de hiérarchisation des dommages sous forme d'échelles d'intensité qualitatives, doit permettre de compléter progressivement les courbes et matrices d'endommagement des futurs scénarios.

A titre d'exemple, nos recherches menées consécutivement au séisme survenu dans la région d'Al Hoceima au Maroc en février 2004 (628 morts) (Cornet et al., 2004), ont permis d'identifier les principaux facteurs de fragilité, directs et indirects, du bâti en zones urbaines et rurales dans un contexte socio-économique spécifique caractérisé par de l'auto-construction, des modifications préjudiciables de techniques de construction ancestrales, et l'absence de normes de construction. Les principaux facteurs de vulnérabilité physique du bâti diagnostiqués sur le terrain un mois après le séisme sont illustrés en **annexe 12**. Ils permettront d'affiner à terme les typologies de vulnérabilité du bâti spécifiques à cette région du Maroc. Ils contribuent dans l'immédiat à expliquer la variabilité socio-spatiale des intensités des dommages et certaines caractéristiques du séisme (effets de sites éventuels, épicentre).

Les échelles d'intensité « macro-sismiques » qui découlent de ces analyses rétrospectives sont purement qualitatives, mais restent très utilisées car c'est la seule donnée accessible pour les séismes historiques. De nombreuses méthodes d'évaluation de la vulnérabilité du bâti sont basées sur ce paramètre dans des pays très sismiques comme l'Italie ou la Grèce. Ce paramètre présente l'avantage d'être parfaitement défini en Europe grâce à l'échelle d'intensité européenne EMS98 (Grünthal, 2001). L'échelle EMS98 comprend 5 degrés de dommage. Le **tableau 3.9.** donne la définition de ces 5 degrés de dommage pour les bâtiments en maçonnerie et en béton armé respectivement. Purement qualitative, elle décrit la nature des dommages observables. Cependant, le niveau de l'intensité n'est pas totalement indépendant de la vulnérabilité bien qu'il soit évalué à partir des dommages observés sur les constructions réparties suivant leurs typologies en sept classes de vulnérabilité. Les premières échelles qui n'établissaient pas de distinction entre les types de bâtiments étaient généralement celles qui étaient conçues pour être utilisées dans des zones géographiques limitées où il était possible de définir des "maisons moyennes", sans distinction complémentaire. Ces échelles ne prenaient pas non plus en compte des zones avec de nombreuses constructions en béton armé et en acier comme les centres urbains modernes. Par contre, les échelles ultérieures qui étaient prévues pour s'appliquer à un environnement de bâtis modernes et être d'une application plus générale (par exemple l'échelle de Mercalli modifiée MM dans sa formulation de 1931 par Wood & Neumann (1931) ou l'échelle MSK en 1964

Tableau 3.9. Exemples d'échelles d'intensités macro-sismiques : EMS98 (Grünthal, 2001).

Echelle EMS98 – Classification des dégâts aux bâtiments en MAÇONNERIE		
	Degré 1	**Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structurel, légers dégâts non structuraux)** Fissures capillaires dans très peu de murs. Chute de petits débris de plâtre uniquement. Dans de rare cas, chute de pierres descellées provenant des parties supérieures des bâtiments.
	Degré 2	**Dégâts modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)** Fissures dans de nombreux murs. Chutes de grand morceau de plâtre. Effondrement partiel des cheminées.
	Degré 3	**Dégâts sensibles à importants (dommages structuraux modérés, dommages non structuraux importants)** Fissures importantes dans la plupart des murs. Les tuiles se détachent du toit. Fracture des cheminées à la jonction avec le toit. Défaillance d'éléments non structuraux séparés (cloisons).
	Degré 4	**Dégâts très importants (dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants)** Défaillance sérieuse des murs, défaillance structurale partielle des toits et planchers.
	Degré 5	**Destruction (dégâts structuraux importants)** Effondrement total ou presque total.

Echelle EMS98 – Classification des dégâts aux bâtiments en BETON ARME		
	Degré 1	**Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structurel, légers dégâts non structuraux)** Fissures fines dans le plâtre sur les parties de l'ossature ou sur les murs à la base. Fissures fines dans les cloisons et les remplissages.
	Degré 2	**Dégâts modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)** Fissures dans les structures de types portiques (poteaux et poutres) et dans les structures avec murs. Fissures dans les cloisons et les murs de remplissage ; chute des revêtements friables et du plâtre. Chute du mortier aux jonctions entre les panneaux des murs.
	Degré 3	**Dégâts sensibles à importants (dommages structuraux modérés, dommages non structuraux importants)** Fissures dans les poteaux et dans les nœuds à la base de l'ossature et aux extrémités des linteaux des murs avec des ouvertures. Ecaillage du revêtement de béton, flambement des barres d'armature longitudinale. Fissures importantes dans les cloisons et les murs de remplissage, défaillance de certains panneaux de remplissage.
	Degré 4	**Dégâts très importants (dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants)** Fissures importantes dans les éléments structuraux avec défaillance en compression du béton et rupture des barres à haute adhérence ; perte de l'adhérence acier-béton ; basculement des poteaux. Ecroulement de quelques poteaux ou d'un étage supérieur.
	Degré 5	**Destruction (dégâts structuraux très importants)** Effondrement total du rez-de-chaussée ou de parties de bâtiments.

(Medvedev et al., 1967) avaient traité ce problème avec attention. Elles l'ont fait en divisant les bâtiments en différentes classes en fonction de leur type, c'est-à-dire des matériaux de construction utilisés pour résister au système de charges latérales. Cette prise en compte explicite de la vulnérabilité des bâtiments dans l'échelle EMS98 est dans le droit fil des échelles MSK et MM (AFPS, 2005).

D'autres échelles d'intensité pures, établies pour d'autres phénomènes, existent dans la littérature. On en recense une trentaine, principalement indexées sur les niveaux de dégâts structurels, en particulier pour les bâtiments (*cf.* **tableau 3.2.**). Elles sont parfois corrélées à certains paramètres physiques de magnitude. Tout comme pour les séismes, elles présentent une utilité pour hiérarchiser les dommages, estimer indirectement la puissance d'un phénomène (notamment historique), préciser sa variabilité spatiale (effets de site, discontinuités spatiales, distance d'effet). Cependant, contrairement à l'échelle EMSS98, elles présentent très rarement des distinctions entre des sous types d'éléments exposés et sont donc peu adaptées à une simulation fine des pertes potentielles qui nécessite de considérer plusieurs catégories de bâtiments par exemple.

En mettant à profit d'autres retours d'expérience et recherches bibliographiques, nos recherches nous ont conduit à définir différentes typologies des principaux modes et niveaux d'endommagement spécifiques aux mouvements de terrain, aux tsunamis et au volcanisme. Les analyses réalisées pour le volcanisme n'en sont encore qu'à un stade préliminaire de qualification de l'endommagement et sans travail de hiérarchisation sous forme d'échelle d'intensité (*cf.* **annexe 13**). Il est de même niveau que la réflexion menée sur les processus d'endommagement associés à la diversité des aléas volcaniques (**tableau 3.1.**). La complexité et la diversité des phénomènes volcaniques justifient un effort de recherche à part entière qui doit d'abord se baser sur des constats d'endommagement aussi exemplaires que celui mené par Baxter et al. (2000 et 2005) sur Montserrat (*cf.* **tableau 3.10.**).

Tableau 3.10. Echelle d'intensité des dommages sur le bâti provoqués par des écoulements pyroclastiques à Montserrat. Relation avec les pressions exercées (Baxter et al, 2005)

1 Level	2 Description	3 Effects: observed	4 Effects: estimated	5 Approx pressure range (kPa)
Level 0	No Damage	Windows and roof intact Minimal external burn damage to buildings, including even lightweight wooden houses. No evidence of pushed over fences or posts, but light charring of wooden posts and vegetation, including trees in places *No or minimal ash penetration. Infiltration of ash due to window catch or frame in bad condition.*	Little damage except to occasional window panes.	Less than 1
Level 1	Light Damage	One or two windows on side facing crater with windowpane broken. No, limited or even extensive fire damage to roof. Effects mainly due to intense heat, not dynamic pressure. Fencing and posts intact and unbent. PVC guttering melted *Thin layer of ash inside. Heat damage localised to impacted room or rooms, and even to within a corner of a room.*	PVC louvers melted, aluminium frame catches in bad condition break allowing ingress of ash. Window panes break.	1 to 3
Level 2	Moderate Damage	Old wood window and door frames imploded on side facing crater, exit windows or panes blown outwards, but window frames intact, or roof partially burned through in places from external heat of flow. In surrounding area visible effects of dynamic pressure and heat. Patchy sandblasting of walls facing volcano, scattered flow debris. All ordinary wooden houses consumed *Deep layer of ash in rooms where penetration has occurred, but fine layer only in remainder of building. Fire caused by combustion of furnishings by hot ash deposit. If no furnishings, roof stays intact but externally damaged by heat of flow. Complete combustion in rooms where fire occurs, part of roof burnt out from internal fire.*	Aluminium window and door frames damaged or destroyed.	2 to 6
Level 3	Heavy damage	All windows on side of volcano imploded, frames missing, and windows on opposite sides blown out or outwards, including frames, roofs lifted off. Evidence of flow missile damage. Missiles such as galvanised sheets and wood more abundant and gathered against walls facing crater. Tops of sturdy trees cut off, most trees and utility poles downed or pushed over. Fences and posts pushed over *Widespread internal fire with ash deposit throughout, roof burnt away by internal fires, radiant heat from deposit, or heat transfer from flow*	Some serious damage to masonry structures. Masonry in-fill panels of reinforced concrete (RC) structures fail in numerous buildings Many one- and two-storey weak non aseismic RC structures collapse; some multi storey strong non-aseismic and weak aseismic RC structures collapse.	4 to 10
Level 4	Partial devastation	As for Level 3, but loss of parts of external and/or internal walls. Large single or multiple small missile impacts to wall facing volcano, most or all of roof missing from fire or lifting off of non-RC roofs. No lightweight buildings left standing. Abundant missile debris.	All masonry in-fill panels collapse. Widespread serious damage to masonry buildings, most RC structures collapse except for strong aseismic RC structures	8 to 25
Level 5	Total devastation	Walls removed, only parts or none of the structure still standing. Multiple large missile impacts. Complete devastation from heat, dynamic pressure and missiles; ground scoured with little deposit or remaining debris.	All masonry and non-aseismic RC structures collapse. Only strong aseismic 1 and 2-storeys RC structures survive, but these are seriously damaged.	>25

Secondary effects from the heat of the ash in italics

Echelles d'intensités des dommages multi-éléments liés aux mouvements de terrain

Nos recherches sur les mouvements de terrain sont plus abouties. Elles ont conduit à proposer, pour la typologie des éléments exposés retenue (**tableau 3.6**), 55 modes d'endommagement différents classés par niveau d'intensité (ID) croissante (**tableau 3.12**). Les dommages y sont classés en trois grandes catégories, suivant la nature des éléments affectés : structurels (ou physiques), corporels (ou préjudices corporels), fonctionnels (ou dysfonctionnements).

A titre d'exemple, la typologie des dommages structurels sur le réseau routier résulte du retour d'expérience mené consécutivement aux intempéries de janvier 1994 dans la région du Diois (mouvements de terrain et inondations). Une analyse systématique des rapports de la DDE couplée à des observations de terrain, a permis de recenser et de renseigner 112 points d'endommagement sur la totalité du réseau routier (68 sur le réseau départemental et 44 sur le réseau communal) (**figure 3.14**). On a pu ainsi définir quatre catégories distinctes de modes d'endommagement de gravité croissante, tant sur le plan économique (coût des réparations) que sur le plan fonctionnel (durée d'interruption du trafic) (**figure 3.22**). Cela va de la rupture de plate-forme pour le plus grave à la simple dégradation de chaussée pour le moins grave, en passant par les obstructions de chaussée et les affaissements de plateforme. Une analyse détaillée des coûts moyens de réparation portant sur 32 cas a permis de définir les taux moyens correspondants (DS) pour une portion moyenne de route de 10 m de long (**tableau 3.11**). Ces taux ont été reportés dans l'échelle globale d'endommagement (**tableau 3.12**).

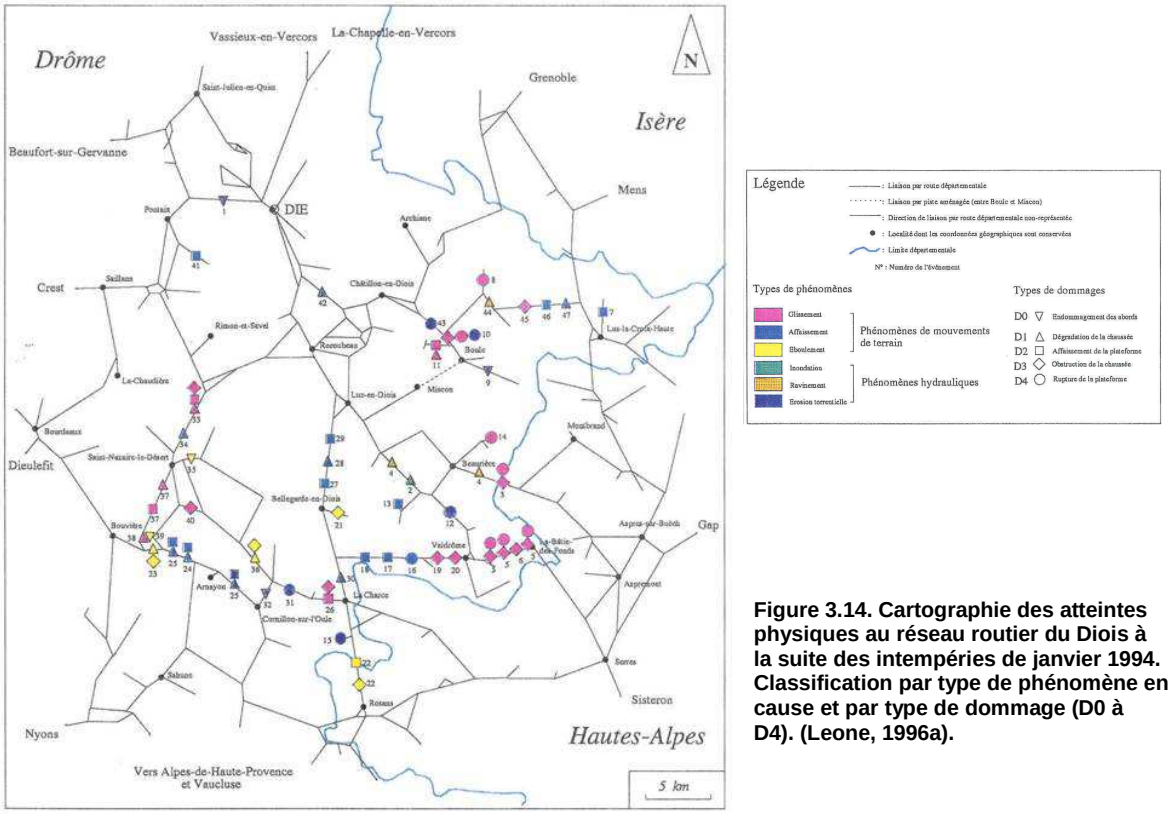


Figure 3.14. Cartographie des atteintes physiques au réseau routier du Diois à la suite des intempéries de janvier 1994. Classification par type de phénomène en cause et par type de dommage (D0 à D4). (Leone, 1996a).

Tableau 3.11. Echelle d'intensité des dommages structurels et fonctionnels du réseau routier et taux correspondants (Ds). Exploitation des évènements de janvier 1994 sur le Diois (26).

Modes et niveaux d'endommagement structurel	Coût moyen des réparations (en kF 1993)	Taux d'endommagement structurel DS *	Dysfonctionnements induits
Dégradation de la chaussée	21,3	**0,15**	Limitation de gabarit nécessaire
Affaissement de la plate-forme ou obstruction de la chaussée de faible volume (dizaine de m^3)	46,5	**0,33**	Interruption momentanée du trafic routier (en heures)
Obstruction de la chaussée de volume élevé (centaine de m^3)	97	**0,7**	Interruption prolongée du trafic routier (en jours)
Rupture de la plate-forme	138,2	**1**	Interruption durable à définitive du trafic routier (en semaines ou mois)

Tableau 3.12. Echelle d'intensité des dommages structurels, corporels et fonctionnels induits par des phénomènes de mouvements de terrain et taux correspondants (D) (Leone, 1996a).

NATURE DES ELEMENTS EXPOSES			ID	MODES D'ENDOMMAGEMENT	TAUX D			NATURE DES DOMMAGES
					Ds	Dc	Df	
BATI		B	I	Dommages légers non-structurels (gros oeuvre non-touché). Stabilité non-affectée. Mobilier endommageable.	0,01-0,1			STRUCTURELS (matériels)
			II	Fissuration des murs, mais la stabilité n'est pas affectée. Réparations non-urgentes	0,2-0,3			
			III	Déformations importantes, lézardes largement ouvertes, fissures apparaissant dans des éléments de la structure. Stabilité affectée. Portes et fenêtres inutilisables. Evacuation nécessaire.	0,4-0,6			
			IV	Fracturation des structures. Désolidarisation des parties. Effondrement partiel du plancher et brèches dans les murs. L'évacuation s'impose. La réhabilitation semble compromise	0,7-0,8			
			V	Effondrement partiel à total qui nécessite une évacuation du site et compromet toute réhabilitation.	0,9-1			
RESEAUX	ROUTE	R	I	Dégradation de la chaussée	0,05-0,3			
			II	Affaissement de la plate-forme ou obstruction de la chaussée de faible volume (dizaines de m3)	0,3-0,6			
			III	Obstruction de la chaussée de volume élevé (centaines de m3)	0,5-0,8			
			IV	Rupture de la plate-forme	0,8-1			
	CONDUITE	C	I	Obstruction	0,1-0,5			
			II	Distorsion	0,4-0,9			
			III	Rupture	0,8-1			
	LIGNE	L	I	Distorsion	0,01-0,6			
			II	Rupture	0,7-1			
	VOIE FERREE	VF	I	Obstruction partielle de la voie (dizaines de m3)	0,1-0,3			
			II	Déformation légère de la voie	0,3-0,5			
			III	Obstruction totale (centaines de m3) ou déformations importantes de la voie	0,5-0,8			
			IV	Rupture du ballast	0,8-1			
	CANAL	Ca	I	Obstruction	0,05-0,4			
			II	Fissuration	0,2-0,5			
			III	Rupture	0,8-1			
SURFACES NATURELLES	TERRAIN (foncier) et sol associé	T	I	Dégradation du sol	0,1-0,4			
			II	Remaniements topographiques mineurs	0,3-0,6			
			III	Remaniements topographiques majeurs	0,7-1			
	COURS D'EAU	CE	I	Partiellement obstrué	0,5			
			II	Totalement obstrué	1			
	PLAN D'EAU	PE	I	Pertes hydrauliques	0,5			
			II	Comblement partiel à total	1			
SOUS-ELEMENTS (intérieur et extérieur des bâtiments)	OCCUPATION ANIMALE (faune, cheptel vif)	OA	I	Migration	0,5			
			II	Anéantissement	1			
	OCCUPATION VEGETALE (flore, cultures)	OV	I	Perturbations végétatives	0,5			
			II	Destruction ou dépérissement	1			
	MOBILIER, VEHICULES (domestique et industriel)	M,V	I	Endommagés mais récupérables	0,01-0,9			
			II	Détruits et irrécupérables	0,9-1			
	STOCKS, RECOLTES	S,R	I	Irrécupérables	1			
PERSONNES		P	I	Préjudice moral ou gêne		0,001		CORPORELS (préjudices corporels)
			II	Troubles psychologiques		0,002		
			III	Blessure physique sans séquelles (blessure légère)		0,003-0,005		
			IV	Blessure physique entraînant une invalidité (blessure grave)		0,04-0,1		
			V	Décès		1		
FONCTIONS	ECONOMIQUE	F-eco	I	Ralentissement de l'activité			0,1-0,5	FONCTIONNELS (perturbations fonctionnelles ou dysfonctionnements)
			II	Arrêt provisoire			0,4-0,9	
			III	Arrêt définitif			1	
	SOCIALE LOGEMENT	F-log	I	Sans-abri temporaire (relogement provisoire)			0,5	
			II	Sans-abri définitif (relogement définitif)			1	
	SOCIALE EMPLOI	F-emp	I	Chômage technique temporaire (quelques jours à quelques semaines)			0,25	
			II	Chômage technique durable (quelques mois)			0,75	
			III	Perte de l'emploi			1	
	TRANSPORT-COMMUNICATION-DISTRIBUTION	F-tcd	I	Ralentissement du trafic (pour routes et voies ferrées)			0,2	
			II	Limitation de gabarit (pour routes et voies ferrées)			0,4	
			III	Interruption momentanée (en heures)			0,6	
			IV	Interruption prolongée (en jours)			0,8	
			V	Interruption durable (en mois) à définitive			1	
	AUTRE	F-x	I	Perdue provisoirement			0,5	
			II	Perdue définitivement			1	

Cette typologie des dommages se différencie de celles existantes par son caractère général, c'est-à-dire non spécifique à un contexte régional, et par le fait qu'elle est censée s'appliquer à l'ensemble des phénomènes de mouvements de terrain et non pas seulement à certains types. Alexander (1986 et 1988), par exemple, est le premier auteur à avoir proposé une échelle d'intensité des dommages au bâti, mais valable seulement pour les phénomènes de subsidence et de glissements rotationnels ou translationnels. Elle comporte sept niveaux d'intensité et a été élaborée à partir d'études pathologiques exemplaires menées sur le site d'Ancona en Italie, suite au glissement du 13 décembre 1982 (Alexander, 1984). Concernant l'effet des phénomènes de gonflement de sols, on peut citer les échelles d'endommagement structurel du bâti établies par le *Building Research Establishment* (U.S.A.) (*in* Mouroux *et al,* 1988.) et par Mouroux *et al.* (1988). Une autre échelle a été établie dernièrement par Zihri pour décrire les effets des effondrements de cavités (*cf.* **tableau 3.2.).**

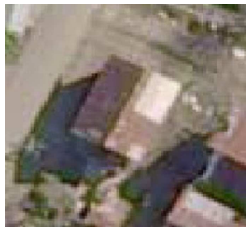
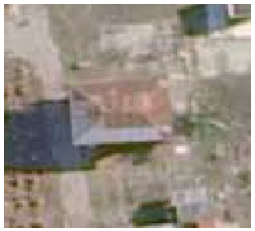
Une échelle d'intensité « macro-tsunamique » (bâtiments)

En matière de tsunami, les investigations de terrain menés en janvier 2006 dans la ville de Banda Aceh ont montré des dommages variables sur le bâti, en nature et en intensité, qui vont de la légère dégradation à l'arasement total avec déblaiement. La première vague, probablement poussée par la seconde (la plus haute), a semble-t-il surtout endommagé du bâti semi-permanent et léger (« *sederhana* »), comme le suggère la quantité de matériaux transportés et visibles sur la vidéo prise au niveau de la Grande Mosquée (**figure 3.11.**). En supposant que les effets dommageables majeurs ont été le fruit de la seconde vague, on peut mettre en relation chaque processus avec les modes d'endommagement les plus fréquemment rencontrés sur le terrain (**figure 3.10**).

Les modes d'endommagement dominants sont liés aux effets d'impact et de poussées latérales exercés par le front du tsunami tout au long de la zone de transfert. Les bâtiments semblent avoir explosé au contact des vagues comme le confirment certains témoignages oraux établissant une analogie sonore entre l'arrivée du tsunami et un bombardement. Dans ces secteurs de hauteurs d'eau mesurées entre 6 et 14 m (environ jusqu'à 2,5 km de la côte selon une direction NW-SE), ne subsistent que les dalles des habitations. Les bâtiments présentaient pourtant le plus souvent une structure armée et un à deux étages. Les piliers ont été arrachés ou couchés dans le sens du courant et les débris disséminés probablement sur plusieurs kilomètres. On retrouve le plus souvent seulement les réservoirs à eau des salles de bain (ou « mandi »). Les secteurs intermédiaires de submersion comprise entre 3 et 6 m (entre 2,5 et 3,4 km de la côte environ), présentent des dommages beaucoup plus variables en intensité. Ces derniers sont surtout fonction de la résistance du bâti à des effets d'impacts ciblés. Les murs extérieurs sont souvent perforés et les constructions partiellement effondrées suite à des ruptures de poteaux. Au-delà d'une zone de déferlement supposée et toujours en direction du Sud-Est, les dommages sont à peine visibles un an après. Ils sont cependant présumés par les amoncellements de débris visibles sur les clichés aériens ou terrestres pris juste après le tsunami. Il s'agit de secteurs d'inondation comprise entre 0 et 3 m et surtout concernés par de la submersion plus lente et donc par moins d'effets d'impact.

Sur les bâtiments conservés, les dommages liés au séisme sont facilement distinguables de ceux induits par le tsunami. Sur le terrain, ces différenciations ont été facilitées par les descriptions rapportées par une équipe d'ingénieurs en génie civil canadiens (Ghobarah *et al.*, 2006). Rappelons que les séismes provoquent des oscillations du sol entraînant des dommages aux structures par efforts de balancement, de cisaillement et de flexion des structures, avec des pathologies caractéristiques (Zacek, 1996).

Tableau 3.13. Classification des dommages aux bâtiments consécutivement au tsunami du 26 décembre 2004. Banda Aceh, Indonésie (Leone et al., sous presse).

	Modes et niveaux d'endommagement du bâti (tsunami - Banda Aceh)					
	D0	**D1**	**D2**	**D3**	**D4**	**D5**
Critères d'identification terrain	Aucun dommage ou dommages imperceptibles un an après	Dommages négligeables à légers sans affectation des structures (mobilier, abords et toitures abîmés, débris déposés dans les bâtiments)	Dommages importants mais sans affectation des structures (murs et cloisons défoncés ou perforés, fenêtres et portes arrachées, toitures partiellement arrachées)	Dommages aux structures pouvant affecter la stabilité du bâtiment (fracturation des piliers, effondrement partiel des planchers)	Dommages lourds aux structures avec effondrement partiel du bâtiment	Destruction totale du bâtiment avec ou sans arasement
Photo terrain						
Classe de bâti illustrée	**A**	**C**	**C**	**B**	**C**	**B**
Visibilité aérienne	Pas visible	A peine visible	A peine visible pour les toitures. Pas visible pour le reste. Attention aux bâtiments dont la toiture a été enlevée après coup.	Pas visible, ou à peine si les toitures ont été enlevées ou arrachées	Visible	Très visible
Photo aérienne						
Niveau de récupération	Bâtiments habitables			Bâtiments à évacuer mais réparables	Bâtiments irrécupérables	

Par ailleurs, dans les secteurs de submersion comprise entre 6 et 14 m, il semble logique que les bâtiments fragilisés par le séisme aient moins bien résisté au tsunami mais sans que l'on puisse en apporter la démonstration.

La typologie des dommages proposée est spécifique aux tsunamis et diffère de celles existantes pour les séismes (Grünthal *et al.*, 2001) ou les mouvements de terrain (Leone *et al.*, 1996) par la nature des dommages décrits. Les dommages y sont hiérarchisés en 6 classes suivant une gravité croissante (D0 à D5) (**tableau 3.13**). Un seuil de dégât déterminant pour la stabilité de l'édifice et son éventuelle réoccupation est franchi en passant des niveaux D2 à D3. Cela correspond à l'atteinte aux structures rigidifiant le bâtiment (poteaux verticaux et transversaux, planchers).

Mis à part les destructions partielles ou totales (D4, D5) nettement identifiables par photo-interprétation, les autres classes nécessitent des observations *in situ*. La principale difficulté d'interprétation peut survenir avec le niveau D3 qui exige un examen plus détaillé des superstructures mais sans pour autant requérir des compétences particulières en ingénierie.

A l'image des échelles d'intensité macro-sismiques, nous avons développé une échelle d'intensité « macro-tsunamique » à 6 degrés, intégrant les niveaux d'endommagement (D0, D1, D2, D3, D4, D5) et les classes de vulnérabilité du bâti (A, B, C, D, E) décrits précédemment. Cette combinaison empirique a pu se faire à partir de nos observations de terrain. Bien que basée sur des critères qualitatifs, mais clairement explicités, cette échelle d'intensité a permis dans une premier temps de quantifier et de spatialiser l'endommagement sur un secteur géographique donné (**tableau 3.14**).

En tant qu'échelle d'intensité elle respecte la condition d'indépendance vis-à-vis des critères de magnitude du phénomène pour se baser uniquement sur les observations des dégâts. Nous avons pu valider spatialement cette échelle en comparant les résultats obtenus par l'interpolation des dommages sur les bâtiments de classe « B » (**figure 3.15a**) avec ceux issus de l'interpolation des intensités de dommages données par l'échelle (tous types de bâtiments) (**figure 3.15b**).

Tableau 3.14. Echelle d'intensité « macro-tsunamique » basée sur les dommages aux bâtiments (Leone et al., sous presse). *Cf.* tableau 3.5 pour les classes de vulnérabilité du bâti et tableau 3.13 pour les niveaux de dommages (D)

		Niveaux d'endommagement du bâti				
		D0 à D1	D1 à D2	D2 à D3	D4 à D5	D5 à D6
Classes de vulnérabilité du bâti	A	I	II	III	IV	V
	B	I	II	III	IV	VI
	C	II	III	IV	V	VI
	D	II	III	IV	V	VI
	E	II	IV	V	VI	VI

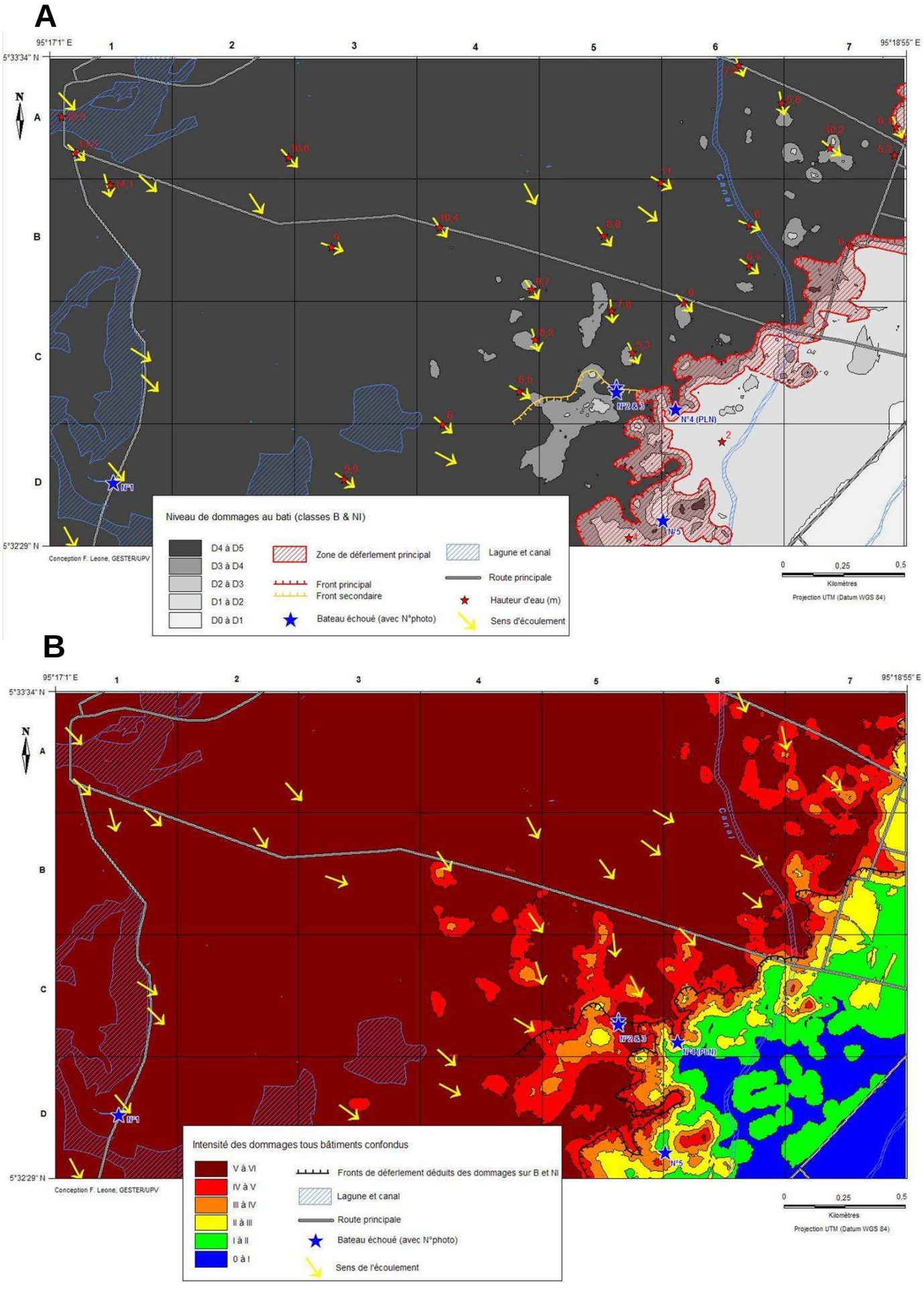


Figure 3.15. Interpolation spatiale des niveaux de dommages sur les bâtiments de classe B (A) et des intensités de dommages tous types de bâtiments (B). Tsunami du 26 décembre 2004 (Banda Aceh, Indonésie) (Leone et al., 2006).

L'interpolation numérique a été réalisée sous Vertical Mapper® par krigeage (Gratton, 2002), à partir du jeu de données ponctuelles (6200 bâtiments) pour aboutir à un fichier raster renseigné de type *Grid*. Une vectorisation a ensuite permis dans MapInfo® d'extraire les contours des niveaux d'endommagement. L'interpolation des dommages suppose que ces derniers suivent une évolution continue dans l'espace. La première tentative reposait sur les bâtiments de classes NI (entièrement détruits, D5) et B (5693 unités). Ce choix a été déterminé par la recherche d'un comportement moyen homogène des structures pour les niveaux d'endommagement inférieurs à D5. De la sorte, les variations spatiales observables dans l'endommagement entre D0 et D4 sont logiquement et principalement liées à l'action et à la magnitude du phénomène plutôt qu'à la résistance du bâti (classe B à comportement homogène).

La carte obtenue (bâtiments de classe « B ») montre très nettement un gradient d'endommagement diminuant d'Ouest en Est et qui s'estompe dans l'angle Sud-Est de la zone d'étude, dans des secteurs très densément urbanisés. Toute la partie orientale de la zone, sur près de 2 km depuis l'ancien rivage de Ulee Lheu, a subi de l'endommagement maximum, avec une prédominance de l'arasement total des bâtiments (D5). Cela correspond à des hauteurs d'eau comprises entre 6 et 14 m. Des îlots d'endommagement plus faible (D2 à D4) apparaissent en se rapprochant de l'Ouest. Ils se répartissent sur une bande clairsemée d'orientation générale NE-SO de 800 mètres de large. Ils révèlent des effets de site à mettre en relation avec une baisse d'énergie cinétique localisée de la vague, des effets d'abri (ou d'écran) provoqués par certains bâtiments ou bien plus probablement d'un meilleur comportement de certains bâtiments mieux construits. Des effets d'écran très ponctuels mais non cartographiés sont identifiables dans certains secteurs. C'est notamment ce que l'on a pu observer à proximité de la Grande Mosquée de Ulee Lheu qui a partiellement protégé une habitation de type B dans un secteur où la submersion a pourtant atteint près de 14 m de haut en front de mer.

La zone clairsemée est relayée à l'Est par une discontinuité très nette d'orientation générale NE-SO située à une distance moyenne d'environ 2,7 km depuis le littoral de Ulee Lheu. Le gradient d'endommagement y chute brutalement de D5 à D1 sur près de 100 m dans un secteur où les hauteurs d'eau passent soudainement de 6 à 2 m. Nous interprétons cette bande continue et étroite comme étant la zone de déferlement de la seconde vague, donc d'un changement de dynamique et d'énergie de la vague avec ce que cela implique en terme de processus et de potentiel d'endommagement sur le bâti. Le niveau D2, facilement identifiable sur le terrain, est caractéristique de cette zone de déferlement où la submersion, plus basse et en perte d'énergie, est venue seulement défoncer les murs extérieurs et parfois les cloisons internes. Cette hypothèse se confirme avec la position des bateaux n°4 et 5 qui se retrouvent précisément échoués sur cette zone de déferlement probable (**figure 3.16**). La position des bateaux n°2 et n°3 peut s'expliquer par un déferlement plus précoce dans un secteur qui n'a pas été correctement mis en évidence par l'interpolation, mais légèrement esquissé. Enfin, plusieurs témoins localisent aussi un

Figure 3.16. Les principaux bateaux échoués à l'intérieur ou à proximité de la zone d'étude. Banda Aceh. (photos F. Leone & F. Vinet, janvier 2006). *Cf.* figure 3.15a pour situation des n°3, 4 et 5.

déferlement dans le secteur du bateau PLN (n°4). La zone de déferlement est représentée sur la carte en se calant approximativement sur les limites de D5 (amont) et D2 (aval). Sa largeur est variable suivant les secteurs, ce qui renforce un tracé lobé qui peut s'expliquer par des différences de hauteur de vague. Cela semble être le cas dans le secteur B7 où l'on observe une extension plus large du déferlement qui coïncide avec des hauteurs d'eau sans doute un peu plus hautes qu'ailleurs à cette distance de la côte (autour de 6 m). La présence d'une route transversale dans ce secteur a pu également étaler le déferlement et ses effets sur les constructions. Deux autres secteurs présentent également une dilatation de la zone de déferlement, mais qui a été probablement détachée du front par l'interpolation sous forme de lobes isolés, à cheval sur les secteurs C6 et C7. Il existe là aussi un lien avec des hauteurs d'eau plus hautes (9 m) mesurées 500 m en amont, et plus au sud dans le secteur D6, mais sans démonstration équivalente. Par ailleurs, on remarque une très bonne corrélation spatiale entre la position du front de déferlement et les indicateurs d'orientation de la seconde vague, relevés sur le terrain en amont de ce front par Lavigne *et al.* (2006). On constate un découplage de l'orientation des écoulements dans le secteur B5 en deux directions générales distinctes (N 130° et N 150°) et qui pourrait s'expliquer par un partage de la vague. Cette hypothèse pourrait alors expliquer la présence d'une possible zone de déferlement plus à l'Ouest, suggérée par des poches aval de moindre dommage, bien visibles dans le secteur C5, et compatible avec la position des bateaux n°2&3. Au-delà de cette ou de ces zones de déferlement, l'endommagement est beaucoup plus faible (D0 à D1) et correspond surtout à des effets de submersion de faible hauteur (moins de 2 m) et de stagnation des eaux.

La seconde carte obtenue par interpolation des intensités des dommages de l'ensemble du bâti (5693 unités) a permis de restituer intégralement le gradient d'endommagement obtenu précédemment et de retrouver précisément la zone de déferlement (passage brutal de VI à I). Mieux encore, l'utilisation de cette échelle d'intensité « macro-tsunamique » a permis de révéler et de compléter la position de la zone de déferlement supposée à l'extrémité Nord-Est de la zone d'étude, c'est-à-dire dans un secteur qui présentait peu de bâtiments de classe B. Elle a aussi permis d'affiner le découpage des secteurs à effets de site ainsi que le détail de la ligne de déferlement en confirmant en particulier sa position plus occidentale (et éventuellement plus précoce) dans la zone d'échouage des bateaux n°2 et n°3.

Cette échelle d'intensité présente donc un réel intérêt pour positionner une ligne de déferlement à partir de l'analyse fine des dommages sur des bâtiments de vulnérabilités différentes, et ce au même titre qu'une échelle macrosismique permet de retrouver l'épicentre d'un séisme et de mettre en évidence une source (faille active) et des effets de site géologiques ou topographiques. Notre échelle est adaptée à une approche détaillée, rigoureuse et locale de l'endommagement. Elle diffère en cela des échelles d'intensité des dommages proposées par Papadopoulos *et al.* (2001) et leurs prédécesseurs (Sieberg, 1927 ; Ambraseys, 1962 ; Soloviev, 1970) qui reposent sur des critères beaucoup plus qualitatifs, subjectifs et variés (dommages, perceptions, effets environnementaux, etc.) et donc peu adaptés à une analyse spatiale fine. Un essai de corrélation entre l'intensité des dommages (ID), tous types de bâtiments confondus, et la magnitude du phénomène, exprimée en hauteur de submersion par rapport au sol, est présenté est donnée dans un tableau de correspondance dans lequel nous avons également porté pour indication l'échelle d'intensité donnée par Papadopoulos *et al.* (2001) (**tableau 3.15**).

Tableau 3.15. Correspondances entre les intensités macro-tsunamiques et les hauteurs de submersion (H) du tsunami.

Intensité proposée	H (m)	Intensité Papadopoulos et al., 2001
I	< 1,5	I à V
II	2	VI
III	3	
IV	5	VII à X
V	8	
VI	> 11	XI à XII

3.2.5. Disponibilité des matrices et courbes d'endommagement

Les approches

Ces fonctions d'endommagement (de vulnérabilité, ou de pertes) quantifient l'interaction entre l'élément exposé et le phénomène en terme de mode et niveau d'endommagement. En théorie, elles dépendent de la magnitude de l'effet du phénomène et de la nature de l'élément exposé. De telles fonctions sont généralement obtenues sur la base extrapolations de données sur les dommages recueillies à la faveur de retours d'expérience, sur dires d'experts ainsi que sur des tests de laboratoire (Chiroiu, 2004). Elles sont exprimées soit de manière discontinue par des matrices d'endommagement, ou bien de façon continue par des courbes d'endommagement (ou de fragilité).

La quantification du niveau d'endommagement s'y fait au moyen de taux compris entre 0 et 1 – ou 0 et 100 % – selon qu'on fait référence respectivement à un taux d'endommagement applicable à un élément exposé donné qui est défini par rapport à la valeur initiale de l'élément (taux d'endommagement au sens strict), ou bien à un pourcentage de perte d'un stock d'éléments identiques susceptible d'être affecté par un même taux d'endommagement (taux de perte). Ces taux, généralement approximatifs, sont donc indicatifs, faute de constats d'endommagement suffisants pour les valider systématiquement d'un point de vue statistique. Mais de telles matrices et courbes sont censées évoluer au gré de l'évolution de nos connaissances, en respectant des protocoles méthodologiques de collecte et de traitement des données comparables à ce qui a pu être décrit précédemment en matière de constat d'endommagement après tsunami.

Grâce aux efforts consentis depuis 30 ans par la communauté internationale pour généraliser les retours d'expérience post-sismiques, les fonctions les mieux définies actuellement dans la littérature sont celles du bâti exposé aux séismes. Les méthodes d'évaluation des dommages en cas de séisme s'appuient sur l'utilisation de telles matrices et courbes de dommages. Dans le cas particulier des séismes, l'Association Française du Génie Parasismique (2005) distingue trois grands types d'approches permettant d'exprimer le dommage moyen attendu en cas de séisme :

– **L'approche probabiliste** utilisant des matrices de probabilité de dommage. Présentées comme une des premières méthodes développées pour l'estimation des dommages, les matrices de probabilité de dommages (ou DPM : Damage Probabilistic Matrix) sont issues directement du retour d'expérience et des estimations de dommages après plusieurs séismes. En général le niveau sismique est exprimé par une intensité (MSK ou EMS 98) pour laquelle l'importance des dommages suivant la typologie est donnée par un niveau (ou degré) de l'échelle. A chaque type de construction correspond une DPM qui exprime la fréquence d'atteindre un taux de dommages si un séisme d'un certain niveau se produit. Des exemples de DPM sont donnés par Withman et al. (1973) et Braga et al. (1983) pour l'Italie.

– **L'approche statistique** utilisant des courbes de vulnérabilité. Ces dernières (« vulnerability curves » ou « fragility curves ») sont identiques aux matrices de probabilité de dommage mais ont l'avantage d'avoir des expressions analytiques et de ne pas présenter de discontinuité. Une courbe de vulnérabilité donne, pour un niveau de séisme donné (exprimé par exemple en intensité macrosismique), la probabilité que le dommage soit supérieur à une valeur (chaque courbe est donc associée à un niveau de dommage). Chaque type de construction est défini suivant sa vulnérabilité et la nature

des dommages est classée dans une échelle à plusieurs degrés. Des exemples de courbes de vulnérabilité sont données pour la Californie par l'ATC (1985), et par Anagnos et al. pour les Etats Unies (1995). Le document ATC 13 (1985) a proposé une première approche des courbes d'endommagement, en fournissant des niveaux d'endommagement pour différents types de constructions, en fonction de l'échelle MM. Cette méthode est restée pendant longtemps la référence standard d'évaluation de la vulnérabilité sismique. Après les séismes de Loma Prieta (1989) et de Northridge (1994), les courbes de fragilité ont été re-calibrées, et une seconde approche a été développée sous la forme d'un logiciel public d'estimation du risque sismique (méthode HAZUS^{TM}) (FEMA, 1999). Dans cette dernière approche, le paramètre d'entrée n'est plus l'intensité macrosismique, mais des caractéristiques directement liées au mouvement du sol, représentées par le spectre de réponse ou bien par le PGA.

– **L'approche déterministe** utilisant des courbes de vulnérabilité. Même si le même nom est souvent utilisé dans la littérature, il faut distinguer une seconde famille de courbes de vulnérabilité qui donnent le dommage moyen en fonction du niveau sismique et non plus une probabilité de dépasser un niveau de dommage donné. De plus, ce dommage moyen permet de connaître le pourcentage de bâtiments dans un niveau de dommage donné. Le but des méthodes déterministes est de définir un niveau de dommage moyen en fonction de niveau de l'agression sismique (en intensité ou en accélération). La fonction d'endommagement (ou courbe de vulnérabilité déterministe) est généralement définie par deux bornes limites d'agression sismique : la première donne le niveau d'agression correspondant à l'apparition des premiers dommages (la fissuration) ; la deuxième correspond à la destruction totale de la structure (la ruine). Pour des niveaux intermédiaires d'agression, le dommage moyen s'exprime en supposant un comportement linéaire de la fonction d'endommagement entre les deux bornes limites. Evidemment, cette fonction d'endommagement doit être représentative des caractéristiques structurales de chaque famille de construction, d'où la nécessité d'introduire là encore la notion de typologie. Des exemples de courbes de vulnérabilité déterministes sont données pour l'Italie par le *Gruppo Nazionale da Difesa dai Terremoti* (GNDT, 1993) et par Giovinazzi & Lagomarsino (2003) (**figure 3.17**), pour l'Europe par l'équipe du programme de recherche RISK-UE (2003).

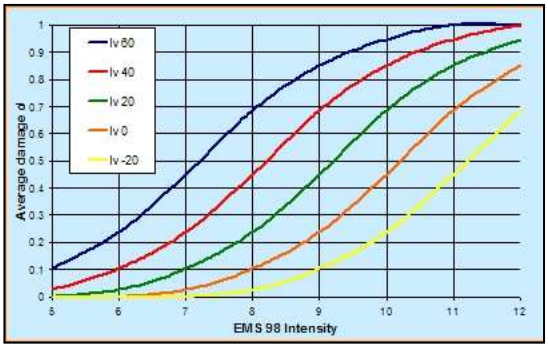


Figure 3.17. Exemple de courbes de vulnérabilité sismique (dommage moyen) pour 5 classes de bâti (d'après Giovinazzi & Lagomarsino, 2003).

Les courbes d'endommagement représentent une donnée d'entrée fondamentale dans un modèle d'estimation des dommages. Elles ne peuvent pas être contournées ou remplacées par d'autres types d'informations et la fiabilité d'un modèle va dépendre en grande partie de la précision de ces données. Malgré leur importance, ces courbes d'endommagement demeurent encore très rares pour les autres catégories de phénomènes naturels. Tout le travail de conceptualisation et de structuration méthodologique proposé dans cette partie vise à construire de telles courbes et matrices pour des phénomènes moins explorés et/ou plus complexes à quantifier dans leurs processus et magnitudes. La littérature propose cependant quelques courbes pour quantifier les effets des inondations ou des vents forts par exemple.

Pour les inondations, le Ministère Japonais de la Construction (MOC, 1996) propose des courbes qui expriment le pourcentage de destruction de différents types d'enjeux (habitations en bois ou en béton, stocks, récoltes) en fonction des hauteurs d'eau ou bien des durées de submersion. Elles résultent d'observations recueillies après des inondations depuis 1954 (Dutta, 2003). L'équivalent existe pour les vents forts. Khanduri *et al.* (2003) ont établi les pourcentages de destruction de différentes constructions en fonction de la vitesse du vent des cyclones Hugo (1989) et Andrew (1992). Stewart (2003) propose des distinctions en fonction de l'âge des constructions (avant et après 1980) pour l'Australie. Dans ces exemples, les courbes ont servi à l'établissement de fonctions complexes utilisées pour la modélisation mathématique des dommages.

Nos recherches ont contribué à ébaucher des matrices et des courbes d'endommagement pour d'autres catégories de phénomènes naturels (tsunami et mouvements de terrain) et différentes familles d'enjeux (biens, personnes, activités).

Courbes d'endommagement tsunami

L'exploitation statistique des dommages sur le bâti provoqués par le tsunami de 2004 à Banda Aceh a débouché sur les toutes premières courbes d'endommagement du bâti en milieu urbain en fonction de la hauteur de submersion d'un tsunami par rapport au sol. Les premières courbes obtenues s'appliquent à l'échelle d'un bâtiment (approche 1), les secondes à un volume de bâtiments (approche 2). Pour ce faire, nous avons échantillonné nos bâtiments, soit 892 unités, dans un rayon de 100 m autour de chaque point de hauteur d'eau connue. Cela a permis d'obtenir un bon taux de couverture de la zone tout en limitant les recouvrements (**figure 3.18**).

Figure 3.18. Le bâti diagnostiqué et sélectionné pour la construction des courbes d'endommagement tsunami au sein de la ville de Banda Aceh (Indonésie) (données SIG *in* Leone et al., 2006). Les hauteurs de submersion (m) sont en gras.

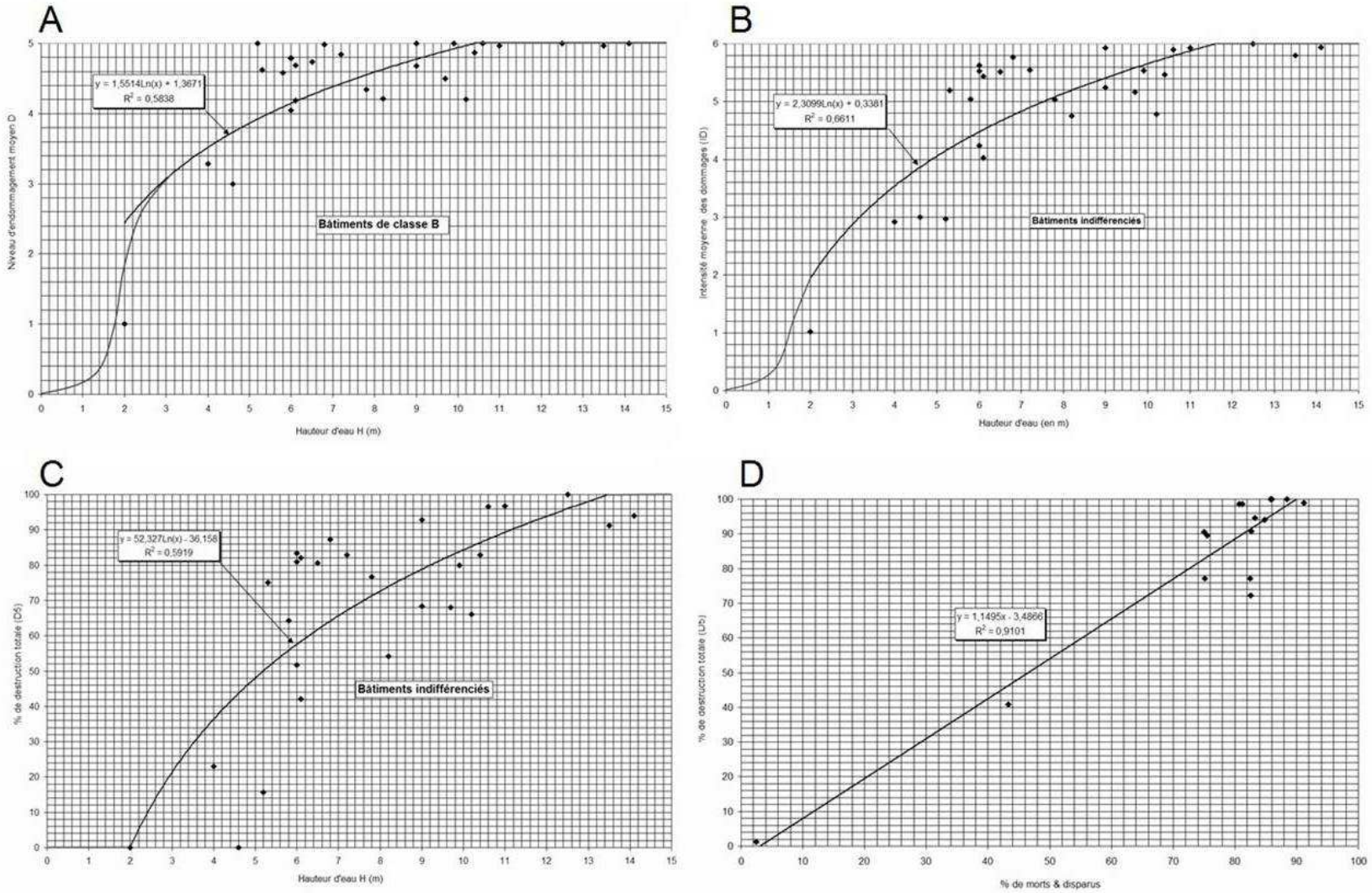
La **première approche** a été appliquée aux bâtiments de classe B, les plus fréquents dans la zone. Le nuage de points obtenu présente une relation de type logarithmique avec une assez bonne qualité d'ajustement (R^2 =0,58). Nous nous sommes calés sur cette portion de courbe pour établir la courbe donnant le niveau d'endommagement moyen (Dmoy.) en fonction de la hauteur d'eau mesurée au sol (H). Un ajustement manuel a été effectué aux limites en se basant sur nos observations de terrain et de manière à borner la courbe par les niveaux D0=0 et D5=5. Entre ces points, l'évolution de Dmoy. est considérée comme continue en fonction de la hauteur de submersion (**figure 3.19. A**). La même démarche appliquée à l'intensité moyenne des dommages (IDmoy), donnée par notre échelle d'intensité « macro-tsunamique », aboutit à une meilleure corrélation (R^2=0,66). Elle donne une courbe d'allure semblable permettant théoriquement de retrouver l'intensité des dommages à partir de la magnitude du phénomène (H), et ce quelque soit la classe des bâtiments analysés (**figure 3.19. B**).

La **seconde approche** suit le même principe de construction (R^2=0,59). La courbe obtenue exprime le pourcentage de destruction totale (niveau D5) d'un stock de bâtiments (en %) en fonction de la hauteur de submersion (H) (**figure 3.19. C**). Elle est limitée par les valeurs 0 et 100%. Cette courbe n'a qu'une valeur indicative car le bâti pris en compte pour D5 n'a pas été différencié. Par exemple, on obtiendrait probablement une évolution différente avec une plus grande proportion de bâtiments plus résistants et plus hauts (2 étages), notamment à partir des valeurs de H inférieures à 6 m.

Dans les deux approches, les autres corrélations ne sont pas significatives, hormis pour le niveau D1 qui présente une évolution globalement et logiquement inverse par rapport à D5. En vue d'une application opérationnelle dans le cadre de scénarios de perte, ces courbes et fonctions qui en découlent doivent être définies pour chaque classe de bâtiment. Cela suppose de multiplier de tels retours d'expérience et d'envisager des modélisations des interactions tsunami/structures en laboratoire.

A titre indicatif, d'autres auteurs viennent de publier récemment de nouvelles courbes d'endommagement du bâti basées sur les observations de terrain consécutives au dernier tsunami indonésien de juillet 2006 (Reese et al., 2007).

Figure 3.19. Les différentes courbes d'endommagement (relation hauteur de submersion / dommages) produites à partir de l'analyse statistique et spatiale des dommages (bâti) consécutifs au tsunami du 26 décembre 2004 (Banda Aceh, Indonésie) (Leone et al. 2006).
A : niveau d'endommagement moyen ; **B** : intensité moyenne des dommages (échelle macro-tsunamique) ; **C** : % de destruction totale ; **D** : % de pertes humaines en fonction des % de destruction totale.



Matrices d'endommagement mouvements de terrain

Par ailleurs, le retour d'expérience mené sur la catastrophe équatorienne de la Josefina de 1993 a permis d'ébaucher une toute première matrice d'endommagement structurel et corporel applicable à un glissement de terrain et à ses effets hydrauliques induits (**figure 3.20** et **tableau 3.16**). Cette matrice a été alimentée par des observations de terrain. Elle a été fondée sur un découpage spatial des différents processus d'endommagement associés aux phénomènes et sur une typologie simple des principaux éléments affectés. Pour chaque combinaison processus/élément, les valeurs portées (ID de 0 à V) renvoient à une échelle des dommages qui a été intégrée au final à l'échelle d'intensité standard « mouvements de terrain » présentée dans le **tableau 3.12**. Ainsi, on peut voir que pour une même catégorie d'éléments, les intensités d'endommagement sont variables d'une classe de magnitude à l'autre, et qu'inversement pour une même magnitude plusieurs niveaux de dommages peuvent apparaître suivant la nature des éléments affectés.

Par exemple, bien qu'elles ne puissent être réoccupées ultérieurement pour des raisons évidentes de sécurité, des habitations situées en surface du glissement principal ont été épargnées malgré un déplacement vertical de près de 120 mètres. Un enfant occupant l'une d'entre elles a même été retrouvé sain et sauf le lendemain du drame. De la même façon, la crue a entraîné des dommages très variables. Si tous les biens situés sur la zone amont de forte intensité ont été rasés, ce fût différent pour ceux affectés par la classe d'intensité faible : ainsi la ville de Paute a été en partie submergée, mais de nombreux bâtiments ont résisté à la montée des eaux. Ils ont pu rapidement être réoccupés malgré des dégâts surtout d'ordre mobilier. Pour ce qui est de la zone amont soumise à l'inondation temporaire, la majorité des habitations en maçonnerie avait retrouvé sa fonctionnalité au moment de la mission, soit cinq mois après le début des événements. Les dommages ont été très légers du fait de la résistance des structures et de la montée progressive des eaux qui a exercé une pression hydrostatique isotrope sur l'ensemble de l'édifice. Autre exemple, la route panaméricaine située sur cette même zone a plus souffert des glissements induits par la rupture sur les berges du lac plutôt que de l'immersion temporaire. Le plus souvent, les matériaux déposés par ces glissements sont venus obstruer cet axe d'échange vital si bien qu'au mois de septembre 1993 le tronçon de route panaméricaine passant par la plaine d'El Descanso était toujours dévié. Enfin, compte tenu des difficultés à vidanger le lac résiduel, tous les biens qui s'y trouvaient immergés semblaient à jamais perdus.

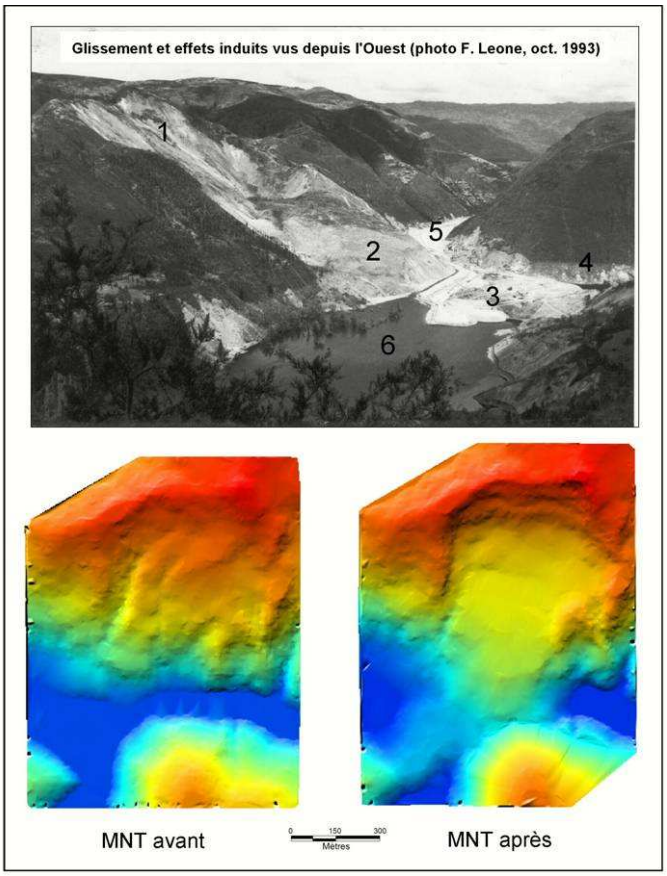


Figure 3.20. Glissement de terrain de la Josefina. Photo : 1. surface de glissement, 2 : pied, 3 : accumulations résiduelles, 4 : niveau maximum atteint par la retenue ; 5 : traces de l'onde de submersion ; 6 : lac résiduel. Reconstitution numérique de terrain avant et après (Leone, inédit).

Tableau 3.16. Matrice d'endommagement associée à la catastrophe de la Josefina (Equateur, 1993). Les valeurs d'intensité des dommages (cellules) renvoient à une échelle non présentée ici (cf. Leone & Velasquez, 1997).

ELEMENTS AFFECTES			PROCESSUS D'ENDOMMAGEMENT									
			MECANIQUES					HYDRAULIQUES				
			DV1	DV2	PL	A1	A2	SS1	SS2	SD1	SD2	SD3
	BATIMENTS	B1	IV	V	–		V	III-IV-V	V	I-II	III-IV-V	V
		B2	–	V	III-IV	–	V	I-II	V	I	II-III-IV	V
		MB1	II		–		II	II		I-II	II	
		MB2	–	II	II	–	II	II		I-II	II	
	RESEAUX	R	IV		–	II-III	IV	0-I	IV	0-I	II-III	IV
		L	I	II	–	I	II	0	II	0-I	II	
		VF	–			I	–	I	IV	–		
	SURFACES NATURELLES	T	II	III	–	II	III	0	III	I	II	III
		OV	I	II	–	I-II	II	I-II	II	0-I	I-II	II
		CE	–			I	II	–				
		PE	–									II
	INDIVIDUS		III	–	–	–	V	I				

– : configuration non-observée ou impossible
: élément peu affecté
: élément moyennement affecté
: élément très affecté (irrécupérable)

: conséquences écologiques (pollution par hydrocarbures) suite à l'immersion de la centrale thermo-électrique de El Descanso
: conséquences énergétiques avec la réduction de la durée de vie du barrage hydroélectrique de Paute

Cette matrice offre une vision synthétique et hiérarchisée de la variabilité des dommages liés à cette catastrophe. Couplée à la cartographie reconstituant les phénomènes (**figure 3.7**), elle permet aussi de comprendre la variabilité spatiale de ces dommages et d'aider à l'élaboration de scénarios « catastrophes » sur d'autres sites à risque. De tels scénarios multi-aléas peuvent être affinés dans leur déroulement chronologique en exploitant l'arbre évènementiel produit à l'issue de cette catastrophe et présenté sur la **figure 2.6**. Cet arbre comporte des ramifications en terme de dysfonctionnements et de coûts associés directs et indirects. Il s'apparente alors à un arbre de défaillances qui est présenté en annexe de notre thèse de doctorat (Leone, 1996a).

Par la suite, à la faveur d'autres retours d'expérience, de recherches bibliographiques et d'entretiens avec divers experts, nous avons été amené à compléter progressivement cette matrice pour l'ensemble des phénomènes de mouvements de terrain. Un extrait est présenté en **figure 3.21**. La matrice totale se trouve en **annexe 14**. Les phénomènes sont représentés par leurs principaux processus et les valeurs de quelques uns de leurs critères de magnitude (**tableau 3.3.**). Les familles d'éléments exposés sélectionnées sont celles définies dans le **tableau 3.6**. Des sous-types d'éléments structurels de la famille du bâti, des routes et des lignes ont également été pris en compte de manière à affiner la quantification de la vulnérabilité. Ils se distinguent par leur comportement différentiel aux sollicitations générées par les mouvements de terrain. Les sous-types de bâti sélectionnés sont ceux retenus officiellement par l'ex. Délégation aux Risques Majeurs (D.R.M., 1990). Les personnes prises en compte dans cette matrice sont celles supposées se trouver à l'extérieur des bâtiments, autrement dit les plus exposées directement aux phénomènes. Elles peuvent se trouver à l'air libre ou bien sur

les différents réseaux (routes, voies ferrées). Il en va de même pour les biens mobiles appartenant à la catégorie des sous-éléments (cheptel, mobilier, véhicules, stocks, récoltes). Les intensités d'endommagement correspondantes (ID) (**tableau 3.12.**) ont été pour certaines converties en taux (0 à 1) permettant d'estimer les pertes économiques associées à chaque niveau de dommage.

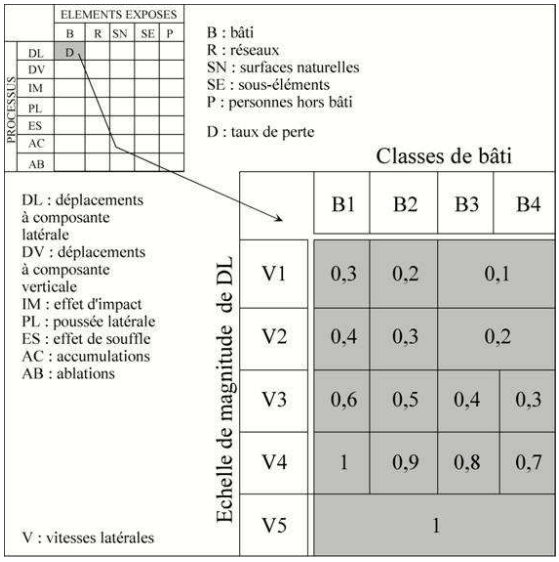


Figure 3.21. Extrait de la matrice d'endommagement mouvements de terrain globale (ici pour 4 classes de bâti exposées à 5 gammes de vitesses de déplacements à dominante latérale) (Leone et al., 1996a,b)

Matrices et courbes d'endommagement corporel

En complément des fonctions d'endommagement physique, un scénario de pertes doit également intégrer des fonctions d'endommagement corporel ou fonctionnel suivant que l'on considère les atteintes physiques aux personnes ou bien les perturbations sur des activités et des fonctions diverses. Les matrices correspondantes dépendent étroitement des fonctions d'endommagement structurel des biens supportant les personnes et les activités et/ou les fonctions en question. Elles sont utilisées pour une quantification du risque en termes de préjudices indirects encourus (par exemple sous forme de pertes de production économique). C'est d'ailleurs probablement dans ce domaine d'évaluation des pertes et des dysfonctionnements indirects - par enchaînement des dommages - que restent à mener les plus importants travaux de modélisation.

Comme on vient de le voir dans le cas des mouvements de terrain, la quantification des préjudices corporels propres aux individus non-protégés par des structures du type bâti est traitée dans la matrice d'endommagement structurel. Par contre, les personnes occupant des bâtiments soumis à l'action de mouvements de terrain vont subir des dommages faibles tant que l'édifice qui les abrite reste stable, puis des dommages plus importants induits par cet édifice au delà d'un seuil d'endommagement donné de sa structure. Cet aspect des préjudices corporels induits par l'endommagement des structures environnantes a été traité dans une nouvelle matrice (*cf.* Leone, 1996a). Cette matrice peut également servir à caractériser l'endommagement des sous-éléments exposés, c'est-à-dire également contenus dans les bâtiments, tels que les animaux, les mobiliers, les véhicules, les stocks et les récoltes engrangées.

L'effet potentiel des dommages structurels sur les habitants a déjà fait l'objet d'analyses particulières dans le domaine du risque sismique en tant que facteur de vulnérabilité humaine (*cf.* Bastet *et al.*, 1985 et D'Ercole *et al.*, 1993). Certains auteurs proposent des fonctions de pertes humaines suivant la magnitude du séisme et la densité de population (Oike, 1991 ; Samardjieva & Oike, 1992 ; Samardjieva E. & Badal J., 2002 ; Badal et al., 2005). Dans cet esprit, nos travaux sur le tsunami ont permis d'établir une très bonne corrélation linéaire (R^2=0,91) entre les pertes humaines, exprimées en % de morts et disparus, et le pourcentage de destruction totale du bâti (niveau D5). Celle ci a été établie sur 16 quartiers (Desa) à partir de statistiques sur les victimes fournies par la coopération japonaise (JICA, 2005). La droite de régression obtenue sur ces quelques points décrit une fonction de pertes humaines en cas de tsunami (**figure 3.19 D**).

En risque mouvements de terrain, ces considérations ont un sens pour les mouvements rapides à effet immédiat sur les personnes exposées. On peut ainsi mettre en relation directe les dommages structurels et corporels pour les différentes catégories de bâti. L'effet ou non de désolidarisation des parties de l'édifice et notamment les effondrements de planchers (pour les habitations à plusieurs niveaux) constitue le principal critère retenu pour caractériser ce facteur de sensibilité extrinsèque des personnes. Dans une perspective d'application, il serait judicieux d'ouvrir une telle matrice à d'autres critères représentatifs de la sensibilité cette fois ci intrinsèque des individus (facteurs perceptifs, cognitifs, de mobilité). Cela reviendrait, concrètement, à élargir la typologie des personnes en y intégrant des comportements potentiels plus variés vis à vis du danger. De la même manière, on pourrait également prendre en compte d'autres critères de sensibilité extrinsèque autres que les seuls facteurs de protection apportée par les structures, tels que les facteurs fonctionnels, conjoncturels et techniques.

Matrices et fonctions de dysfonctionnements

L'intensité des perturbations fonctionnelles (ou dysfonctionnements) dépend logiquement d'une série de facteurs (socio-économiques, institutionnels, humains, conjoncturels, fonctionnels et techniques) difficiles à quantifier. Par exemple, une activité commerciale repose sur des éléments aussi variés que les réseaux, indispensables aux échanges économiques (importations, exportations, flux de clientèle) et les moyens de production représentés par les outils de travail (mobiliers et immobiliers), les stocks et les employés. Certes, si la description de ces facteurs constitue une première étape vers l'évaluation, on ne peut prétendre arriver à ce jour à modéliser ces perturbations fonctionnelles, ou effets indirects, de manière fiable. Il existe néanmoins quelques méthodes analytiques permettant de modéliser les liaisons économiques entre différentes branches d'activité perturbées (Cochrane, 1974) et leurs effets à long terme (Kuribayashi *et al.*, 1982). Mazzocchi & Montini (2001) et Rose & Lim (2002), ont pu ainsi modéliser rétrospectivement les conséquences économiques de séismes sur différents secteurs d'activités.

Partant de ce principe d'interdépendance, on a tenté de corréler grossièrement le niveau de perturbation potentielle d'une fonction, économique ou de toute autre nature (éducative, sociale, religieuse, culturelle, esthétique, environnementale, etc.), avec le niveau d'endommagement des biens et personnes qui la supportent. Cela aboutit à une matrice d'endommagement fonctionnel (**tableau 3.17**) qui renvoie à des intensités de dysfonctionnement (ID) décrites dans le **tableau 3.12**. Cette matrice, développée à l'origine pour les mouvements de terrain, peut nécessiter quelques ajustements en fonction des échelles d'intensité des dommages structurels utilisées, donc des phénomènes impliqués. Par exemple, nos observations sur le processus de reconstruction pos-tsunami (Vinet el al., 2006) montrent que les bâtiments sont majoritairement abandonnés et reconstruits à partir de l'intensité D4 et que les niveaux D2 et D3 impliquent des travaux de remise en état pouvant aller respectivement de quelques jours à une année (**tableau 3.13**). Il va de soit que cette capacité de réoccupation des bâtiments dépend d'une multitude de facteurs d'ordre organisationnel, institutionnel, politico-administratif, socio-économique, culturel voire psychosociologique difficiles à modéliser.

Tableau 3.17. Matrice de dysfonctionnement applicable aux effets des mouvements de terrain. Relations entre dommages physiques et dysfonctionnements induits sur différentes activités.

IDF		INTENSITES D'ENDOMMAGEMENT																														
		STRUCTUREL																											CORPOREL				
		IDSb					IDSr				IDSc			IDSl		IDSvf				IDSca			IDSt			IDSm,v		DC				
		I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	I	II	III	I	II	I	II	III	IV	I	II	III	I	II	III	I	II	I	II	III	IV	V
FONCTIONS	F-eco	0-I	I-II	II	III	III																	I-II	II	III	I-II	II-III	0-I	0-I-II	II	III	III
	F-log	0-I	I	II	II	II																										
	F-emp																															
	F-tcd						0-I	II-III	IV-V	V	III-IV	IV-V	IV-V	III-IV V	IV-V	III-IV	I-III-IV	IV-V	IV-V	III-IV	IV-V	V										
	F-est																						I	I	II							

FONCTIONS

F-eco : fonction économique (à associer aux éléments assurant une activité économique)
F-emp : fonction sociale de type emploi (à associer aux bâtiments à vocation commerciale, artisanale ou industrielle)
F-log : fonction sociale de type logement (à associer aux bâtiments de type habitation)
F-tcd : fonction communication-transport-distribution (à associer aux réseaux)
F-est : fonction esthétique (à associer aux éléments de type surfaces naturelles)

ID : INTENSITES D'ENDOMMAGEMENT

IDSb : dommages structurels au bâti
IDSr : dommages structurels aux routes
IDSvf : dommages structurels aux voies ferrées
IDSca : dommages structurels aux canaux
IDSt : dommages structurels aux terrains
IDSm,v : dommages structurels aux mobiliers de type outils de production et véhicules
IDC : dommages corporels

Dans cette matrice de dysfonctionnement, les niveaux de perturbation sur la fonction transport-communication-distribution associée à l'endommagement du réseau routier, sont basées sur les analyses menées dans la région du Diois, suite aux intempéries de janvier 1994 (**figure 3.14**). Les dommages structurels constatés et répertoriés sur le réseau routier du Diois ont eu des répercussions certes monétaires, mais également sur le plan fonctionnel en perturbant le trafic routier et les communications qu'il assure traditionnellement. Ces dysfonctionnements se sont fait d'autant plus ressentir dans le Diois qu'il s'agit d'une région relativement montagneuse présentant des villages éloignés et isolés des grands axes de communication, et le plus souvent desservis par une seule route. Ces perturbations se sont fait ressentir sur l'ensemble du réseau routier départemental le plus souvent sous la forme d'interruptions du trafic imposées par la réparation du ou des tronçons endommagés. L'aggravation du préjudice subi peut être appréciée par la prise en compte de la valeur du trafic journalier sur la section endommagée et le kilométrage de déviation nécessaire pour contourner cette section, quand cela a été possible. On a ainsi obtenu une image de ce qu'a été la paralysie des communications routières sur le Diois au moment des événements de janvier 1994 et les implications que cela a pu avoir tant sur le plan de l'organisation des secours que sur l'accès à certains villages. En effet, compte tenu de l'ampleur des dommages, le trafic s'est retrouvé paralysé par 36 sections de route endommagée, 23 d'entre elles n'ayant pu être contournées et 5 ayant pu l'être mais seulement au prix de plusieurs kilomètres de déviation. De ce fait, 9 villages et hameaux se sont retrouvés partiellement ou totalement isolés, certains plus de 15 jours (**figure 3.22**).

Les durées d'interruption du trafic ont donc été variables. Pour une section donnée, elles ont été fonction du nombre et de l'intensité des dommages qui conditionnent directement l'ampleur et la durée des travaux de réfection, mais aussi de la valeur fonctionnelle de la route endommagée qui est venue moduler la durée des travaux. Sous un aspect un peu théorique, cette valeur peut être approchée par la présence ou non de déviation pour contourner la section endommagée et par l'importance de son trafic habituel. Par exemple, une section gravement endommagée (obstruction de chaussée plus rupture de plate-forme telle que celle menant au col de Cabre (R.D.93), a été réparée en une journée, les autorités ne pouvant tolérer un détour de plus de 90 kilomètres pour gagner le département des Hautes-Alpes et maintenir fermé davantage cet axe de communication majeur (liaison vallée du Rhône-Alpes du Sud) qui drainait plus de 3000 véhicules par jour. A contrario, par exemple, la route unique R.D.624 menant au village de Borne (commune de Glandage) demeura fermée environ deux semaines.

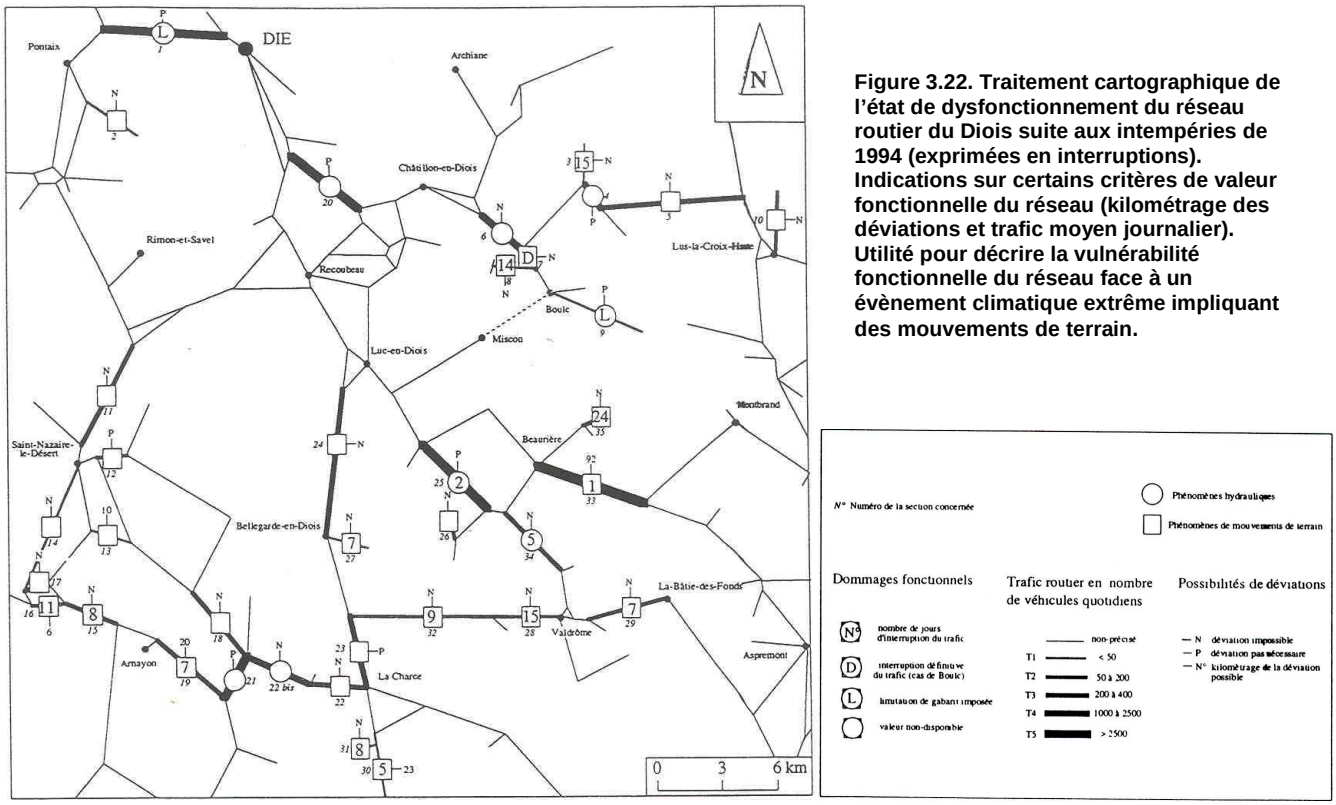


Figure 3.22. Traitement cartographique de l'état de dysfonctionnement du réseau routier du Diois suite aux intempéries de 1994 (exprimées en interruptions). Indications sur certains critères de valeur fonctionnelle du réseau (kilométrage des déviations et trafic moyen journalier). Utilité pour décrire la vulnérabilité fonctionnelle du réseau face à un évènement climatique extrême impliquant des mouvements de terrain.

Cette interruption a correspondu à la durée des travaux nécessaires à la reconstitution de la plate-forme de cette route qui ne draine qu'une douzaine de véhicules par jour. A des dommages structurels de même importance peuvent donc correspondre des durées d'interruption très variables suivant le caractère plus ou moins vital de l'axe endommagé. Néanmoins, si on s'affranchit de cette notion de valeur fonctionnelle de réseau et de la quantité de dommages pour ne retenir que le cas théorique d'un mode d'endommagement unique, on peut proposer avec plus ou moins de certitude quelques mises en relation simples entre dommages structurels et perturbations fonctionnelles pour un réseau routier en général (**tableau 3.18**).

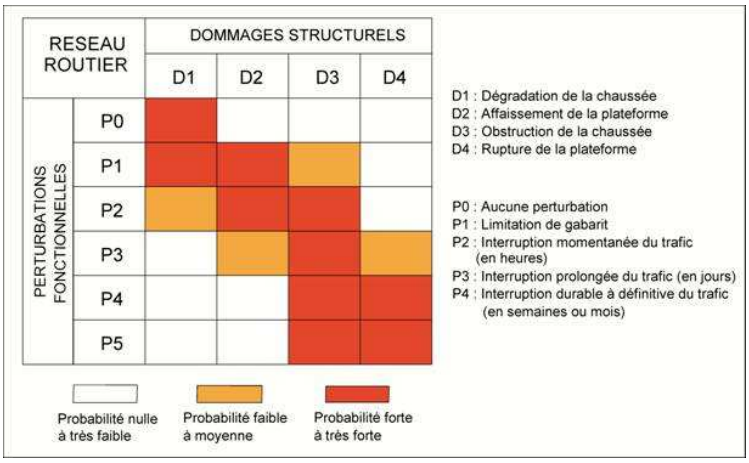


Tableau 3.18. Relations entre dommages structurels et perturbations fonctionnelles déduites des évènements de 1994 sur le réseau du Diois (26). Utilité pour l'élaboration de matrices de dysfonctionnement des réseaux routiers face aux phénomènes de mouvements de terrain.

3.3. Conclusion

Cette tentative d'élaboration des fondements d'une méthodologie d'évaluation quantitative de la vulnérabilité et du risque a nécessité l'introduction de notions nouvelles souvent empruntées à la terminologie parasismique. On a pu voir que la plupart des aléas naturels présentent des effets multiples, complexes et dispersés, ce qui complique la prévision de leurs effets dommageables. Par conséquent il faut reconsidérer les aléas à travers les processus d'endommagement qui les caractérisent et qui les distinguent, afin de déboucher sur des critères de magnitude plus adaptés à nos modèles de prévision spatiale et locale des dommages. De nombreuses incertitudes subsistent encore et il apparaît aujourd'hui fondamental, pour arriver à des progrès significatifs en matière de pronostics de vulnérabilité de généraliser les analyses en retour de catastrophes, à des pas de temps et à des échelles d'observation différents, et selon des protocoles méthodologiques reproductibles et donc clairement définis.

En terme de perspectives d'application, les matrices et les courbes d'endommagement perfectionnées à l'issue de ces analyses en retour, constitueront les pièces maîtresses de futurs scénarios de risques encourus. L'objectif est d'arriver à élaborer sur des zones exposées à des phénomènes pressentis des éventails de scénarios assortis de cartographies et de bilans chiffrés des pertes potentielles. Compte tenu de l'échelle d'analyse privilégiée, celle de l'élément exposé, la méthodologie d'évaluation quantitative de la vulnérabilité et du risque développée dans ce travail est adaptée aux potentialités de stockage, d'analyse spatiale, de traitement et de représentation de l'information offertes par les systèmes d'information géographique. La quatrième partie de ce mémoire esquisse pour la Martinique de telles applications.

PARTIE 4

INDICATEURS GEOGRAPHIQUES DU RISQUE : APPROCHES MULTI-SCALAIRES (MARTINIQUE, MEDITERRANEE)

4.1. Utilité et disponibilité des indicateurs de risques

4.1.1. La notion d'indicateur et son utilité

Le passage de la mesure du risque à sa mise en carte doit nécessairement prendre une forme synthétique et simplifiée garantie par la notion d'indicateur. Un indicateur peut être défini par une simple variable (indicateur au sens strict) ou bien par le résultat d'un calcul plus ou moins complexe basé sur plusieurs paramètres ou variables. On parlera plus volontiers dans ce dernier cas d'indice, obtenu le plus généralement selon une démarche d'évaluation multi-critère (EMC). Indices et indicateurs se sont largement développés ces trente dernières années dans le champ du suivi environnemental et du développement durable, en particulier à l'initiative de l'OCDE en Occident et de l'Institut Français de l'Environnement (IFEN) sur le territoire national. De plus en plus souvent élaborés à l'aide de systèmes d'information géographique (SIG), ces indicateurs apportent une représentation simplifiée et quantifiée d'une réalité souvent complexe en agrégeant des données parfois multiples et disparates. Ils permettent des restitutions cartographiques multiscalaires pour l'aide à la prise de décision, ou plus modestement pour la sensibilisation des décideurs et des citoyens. D'après l'IFEN (http://www.ifen.fr), les indicateurs doivent obéir à un certain nombre de critères de qualité, parmi lesquels : pertinence politique et utilité pour les utilisateurs, robustesse, qualité et disponibilité des données, comparabilité, lisibilité, transparence. Ils doivent répondre à trois grandes fonctions formulées à l'échelle internationale (chapitre 40 de l'Agenda 21, OCDE) et européenne (Agence Européenne pour l'Environnement, et Eurostat):

- Scientifique: évaluer l'état de l'environnement ;
- Politique: identifier les priorités et évaluer les performances de l'action publique ;
- Sociétale: faciliter la communication, inciter l'action dans le bon sens.

En matière de suivi et de diagnostic environnemental les indicateurs disponibles sont généralement spatialisés, plus rarement diachroniques. Ils sont le plus souvent rétrospectifs (un état), mais peuvent prendre un caractère prospectif (une prévision) lorsque leur suivi régulier permet de dégager des courbes d'évolution et de tendance. Mais ces dernières applications sont encore très rarement spatialisées à des échelles fines. Cependant, le recours à la modélisation prédictive permet de développer des prévisions spatialisées et multi-temporelles, notamment en matière d'indicateurs de changement climatique et d'effets associés.

Après un premier état des lieux de la production d'indicateurs de risques naturels en France et dans le Monde, nous illustrerons cette notion et ses applications cartographiques par différents travaux menés au cours de nos recherches sur les risques naturels. En premier lieu, la notion d'indice de risque sera développée sur le territoire de la Martinique, en lien avec la notion de scénario de pertes qui fait appel à une approche quantifiée de la vulnérabilité présentée dans la partie précédente. La cartographie attenante est basée sur le calcul d'indices composites intégrant à la fois l'aléa, certains enjeux et différents niveaux d'endommagement potentiel (vulnérabilité structurelle). Cette application prend en compte uniquement le patrimoine bâti exposé aux aléas sismiques, volcaniques et mouvements de terrain. Elle privilégie une analyse à l'échelle de l'élément exposé (risque unitaire) et une restitution cartographique par mailles géométriques uniformes dont la taille est adaptée à une lecture du risque à l'échelle locale.

Nous verrons ensuite que la cartographie du risque peut se décliner à d'autres échelles et selon d'autres modalités basées sur d'autres jeux de données. C'est ce qui a été entrepris sur

le bassin méditerranéen au moyen des données du SIG RINAMED pour trois mailles territoriales différentes : les entités administratives de niveau NUTS3 de l'Arc latin, les villes de plus de 20 000 habitants du bassin méditerranéen et enfin, un carroyage uniforme de résolution 1 km². Les critères d'évaluation du risque retenus permettent d'y développer plusieurs indicateurs du risque, toujours à valeur expérimentale.

L'application cartographique menée en Martinique s'inscrit dans une démarche de modélisation prédictive et spatiale des pertes potentielles (scénario), tandis que le travail réalisé sur la Méditerranée relève plutôt d'une cartographie informative multi-critères qui ne cherche pas à quantifier les pertes potentielles mais simplement à afficher le risque et à comprendre sa variabilité spatiale, d'où l'introduction de la notion d'indicateur géographique.

Dans les deux cas, le travail de spatialisation du risque réalisé contribue au diagnostic territorial de ces espaces à forts enjeux humains et socio-économiques et pose la question de la mise à disposition de ces premiers résultats pour l'aide à la décision et l'information préventive au moyen du *webmapping*.

4.1.2. Disponibilité internationale des indicateurs de risque naturel

En matière de risques naturels il existe peu d'indicateurs standardisés et spatialisés, présentés comme tels, tant au niveau national qu'international. Comme nous le verrons pour la Méditerranée, les données brutes permettant de les créer sont encore très éparses et lacunaires mais le développement en cours d'Observatoires du risque, par exemple en région Languedoc-Roussillon ou bien à l'échelle de l'Arc latin (Observatoire des risques et du développement durable) devrait favoriser l'effort de collecte et de généralisation de tableaux de bord d'indicateurs.

En France, on peut néanmoins citer les travaux réalisés par l'IFEN (2003) à l'échelon communal. Cependant, parmi les 45 indicateurs de développement durable proposés, un seul concerne les risques naturels. Il s'agit de l'état d'avancement des plans de prévention des risques naturels (PPR) alimenté par la base de données Gaspard (Gestion Assistée des Procédures Administratives relatives aux Risques naturels), anciennement Corinte, du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD) (http://www.prim.net). Par ailleurs, l'Observatoire du Littoral exploite les données du consortium européen Eurosion (http://www.eurosion.org) pour proposer un indicateur d'érosion sur 7 124 km de côtes métropolitaines (http://www.ifen.fr/littoral). A l'échelon départemental, une autre initiative intéressante émane de l'Observatoire du Risque Inondation dans le Gard (http://orig.cg-gard.fr). On y trouve un tableau de bord de 25 indicateurs éclairant des rubriques aussi diverses que l'état du risque, l'urbanisation en zone inondable, l'information et l'alerte en temps de crise, l'accès à une information de prévision de crue, la gestion de crise, l'aménagement pour la rétention et le ralentissement des crues, la sensibilisation et l'éducation des populations, l'historique des crues. Mais seulement quelques indicateurs sont spatialisés à des échelles allant de la commune au bassin-versant. Leur mise à jour est envisagée à un rythme régulier compris entre 1 et 10 ans suivant les thèmes.

A l'échelle européenne, Eurostat propose depuis 2005 155 indicateurs sur l'état de l'environnement par pays, mais aucun n'est fléché sur les risques naturels (http://epp.eurostat.ec.europa.eu). De la même façon, le site officiel de l'Agence Européenne de l'Environnement (EEA, http://themes.eea.europa.eu/indicators et EEA, 2003) ne propose aucun indicateur de risque naturel sur l'espace européen. Beaucoup de travaux restent donc à mener sur ce thème et à cette échelle d'analyse internationale.

En fait, pour trouver quelques indicateurs et indices de risque naturel à l'échelle internationale et qui soient géoréférencés (par pays, région, ou mailles), il faut se rapprocher de programmes de recherches internationaux dont les résultats n'ont pas encore tous trouvé des canaux de diffusion officiels. On peut néanmoins citer l'étude dirigée par des chercheurs du *Center for Hazards and Risk Research* de l'Université Columbia pour le compte de la Banque Mondiale (*Hotspots Project*). Ce travail basée sur des jeux de données internationales propose une cartographie mondiale infra-régionale de plusieurs familles d'indices pour 7 catégories de menaces naturelles (sécheresse, inondation, séisme, éruption volcanique, cyclone, glissements de terrain, multi-aléa) (Dilley et al., 2005). Les indicateurs et indices proposés concernent la fréquence des aléas, et leurs impacts économiques ou humains prévisibles. Les indices de risques obtenus sont exprimés en pertes absolues ou relatives en proportion du PNB ou du nombre d'habitants. Les cartes et données correspondantes sont téléchargeables sur le site l'Université Columbia (http://www.ldeo.columbia.edu) (**figure 4.1.**).

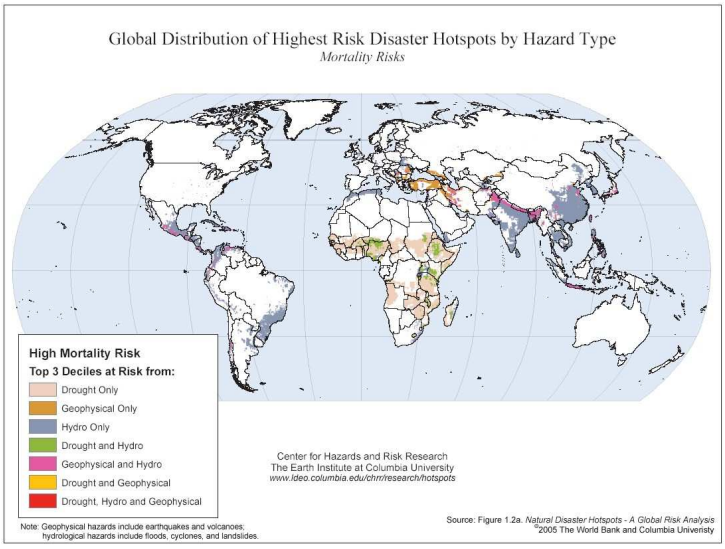


Figure 4.1. Exemple d'indicateur composite de risque naturel (risque de mortalité) produit par l'Université de Columbia et la Banque Mondiale dans le cadre du projet *Hotspots* (d'après Dilley et al. 2005).

Une autre étude supervisée par les Nations Unies a mis à profit les statistiques des vingt dernières années sur les catastrophes naturelles compilées dans la base EM-DAT du CRED (http://www.em-dat.net/). Elle a porté précisément sur la mise au point d'un indice de risque de catastrophe (de décès) (IRC) par pays dont la méthodologie d'élaboration est développée dans l'annexe technique du rapport du PNUD (2004) sur la réduction des risques de catastrophes. Cet indice composite modélisé par régression logarithmique multiple intègre au niveau national, ou plus rarement infra-national, les valeurs de mortalité, les fréquences annuelles d'évènements dommageables, l'exposition physique, les densités de population et un certain nombre de critères de vulnérabilité choisis en fonction de la nature des aléas pris en compte (séismes, inondations, cyclones et sécheresses). Malgré son intérêt, cette méthode présente de nombreuses limites dues au caractère incomplet des bases de données utilisées. En conséquence les indices produits sont difficilement cartographiables de façon homogène à l'échelle mondiale, ce qui en compromet une utilisation opérationnelle. La critique de ces indices (projet *HotSpots* et IRC) et de leurs perspectives d'utilisation par les institutions internationales pour l'aide à la décision est largement développée par Birkmann (2007).

Par ailleurs, un projet international de recherche supporté par l'UNEP a conduit à la mise au point d'un jeu de 49 indicateurs environnementaux au niveau national. Dénommé « *Environmental Vulnerability Index,* EVI » (http://www.sopac.org/evi et Pratt et al., 2004), ce jeu concerne certaines menaces naturelles comme les cyclones, les sécheresses, les inondations, les glissements de terrain, les séismes, les éruptions volcaniques, les séismes et les tsunamis. Il s'agit en fait essentiellement d'indicateurs d'aléa, très basiques et obtenus à partir de différentes bases de données internationales sans véritable travail d'analyse spatiale. Il s'agit par exemple de l'énergie cumulée des séismes historiques ou bien du nombre de tsunamis ou de glissements de terrain connus par pays. Chaque indicateur est mesuré sur une échelle de valeur, plus précisément d'intensité, définie par des critères quantitatifs propres à chaque aléa.

La littérature scientifique internationale regorge d'autres d'indices de risque naturel expérimentaux et spatialisés, mais construits à des échelles plus régionales. Ils ont tous en commun d'intégrer à la fois des données sur les aléas (fréquences de retour, probabilités d'occurrence, susceptibilité, magnitude), des données sur les enjeux (valeur économique, PIB, population) et plus rarement quelques critères de vulnérabilité. Sans rentrer dans le détail de ces évaluations multi-critères (EMC), on peut citer l'indice composite de vulnérabilité économique multi-aléas proposé par Adrianto & Matsuda (2002) pour les petites îles Amami du Japon ; l'indice de risque « feux de forêts » proposé par Chen et al. (2001) pour l'Australie, l'indice de vulnérabilité totale face à l'aléa volcanique développé par Aceves-Quesada et al. (2007) au pied du volcan Navado de Toluca au Mexique ; et bien d'autres indices issus notamment des modèles de prévision des dommages et autres scénarios de risque présentée dans la partie précédente pour les inondations, les séismes, les mouvements de terrain, les cyclones, les tsunamis ou les éruptions volcaniques.

Des approches moins synthétiques que les précédentes, plus orientées sur les facteurs de vulnérabilités, sont proposées par Cardona (2005) sur 12 pays d'Amérique latine et de la Caraïbe avec la mise au moins d'une cinquantaine d'indicateurs ; par D'Ercole & Trujillo (2003) qui ont développé pour l'Equateur un indice de risque multi-aléas par cantons qui est la synthèse de multiples indicateurs, ou bien par Bollin & Hidajat (2006) qui proposent un *« Community-based Risk Index »* intégrant également plusieurs sous-indicateurs de vulnérabilité, d'exposition et de capacités de gestion pour deux communautés indonésiennes.

Précisons qu'un inventaire critique des différentes approches sur les indicateurs de risque naturel a été réalisé par Birkmann (2006), tandis que Simpson & Katirai (2006) proposent une bibliographie thématique très générale sur les usages en matière de mesure et d'indicateurs de catastrophe.

Enfin, l'étude qui se rapproche le plus de notre travail sur la méditerranée, a été menée dans la cadre d'un programme de recherche européen ESPON (2000-2006) de plusieurs millions d'euros et confié à un consortium de 7 partenaires (Schmidt-Thomé, 2006). Bien que portant sur l'ensemble de l'Union européenne à l'échelle de découpage territorial NUTS3, les résultats obtenus sont assez décevants, comparé à ce qui a pu être réalisé à l'échelle de l'Arc latin, quasiment sans financement, par notre toute petite équipe (Leone & Pagneux, 2006). Les indicateurs produits pour les aléas naturels sont assez sommaires et intègrent surtout les fréquences historiques (**tableau 4.1.).** Ces aléas de référence ne sont pas spatialisés en deçà du découpage NUTS3 et par conséquent les résultats cartographiques issus du croisement entre ces aléas (combinés) et les enjeux (population et PIB/habitant) sont assez contestables, en particulier pour la zone euro-méditerranéenne (« *Aggregated natural risk map* », p. 92, *in* Schmidt-Thomé, 2006).

Tableau 4.1. Liste des indicateurs d'aléas naturels retenus par le projet ESPON sur l'Union Européenne (d'après Schmidt-Thomé, 2006)

Natural hazards	Indicators
Avalanches	Areas that have reported landslide/avalanche potential (derived from several sources)
Drought potential (based on recorded rainfall scarcity)	Amount of observed droughts 1904 –1995
Earthquakes	Peak ground acceleration
Extreme temperatures	Hot days Heat waves (7-day maximum temperature) Cold days Cold waves (7-day minimum temperature)
Floods	Large river flood event recurrence (1987 – 2002)
Forest fires	Observed forest fires per 1000 km² (1997 – 2003); Biogeographic regions
Landslides	Questionnaire, Expert opinion of geological surveys of Europe
Storm surges	Approximate probability of storm surges
Tsunamis	Areas that have experienced tsunamis Areas in close vicinity to tectonically active zones
Volcanic eruptions	Known volcanic eruptions within the last 10 000 years
Winter and tropical storms	Approximate probability of winter/tropical storms

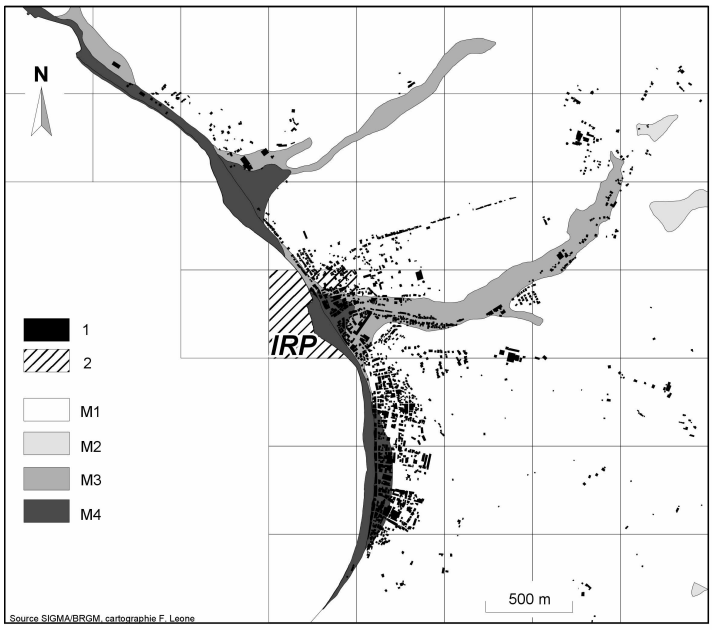
4.2. Spatialisation des dommages potentiels : applications en Martinique

4.2.1. La mesure du risque

Nous avons vu que pour un ensemble d'enjeux menacés sur un territoire à un moment donné, la mesure du risque associé peut se concevoir comme la somme des risques unitaires de chaque élément exposé. Conformément à sa définition analytique, le risque unitaire R affecté à un élément donné est obtenu par le produit du taux d'endommagement potentiel D de l'élément en question (donné par la matrice ou la courbe d'endommagement utilisée et de valeur entre 0 et 1), par sa valeur unitaire V (économique le plus souvent) et par la probabilité d'occurrence Po de l'effet du phénomène qu'il va subir (exprimée entre 0 et 1).

Soit : $\boldsymbol{R = D * V * Po}$

Pour une maille géographique donnée, on définit ainsi un indice composite de risque de pertes absolues (IRPA) qui représente la somme des risques unitaires définis précédemment (**figure 4.2**.). On peut également exprimer ces pertes de manière relative par rapport au capital global d'enjeux présents, ce qui correspond à la somme des éléments exposés affectés de leurs valeurs. Il en résulte un indice de risque de pertes relatives (IRPR) exprimé entre 0 et 100% de pertes potentielles. On verra à travers l'application qui suit que les probabilités d'occurrence ne sont pas toujours accessibles et que l'équation du risque unitaire peut se réduire au produit du taux d'endommagement potentiel par la valeur unitaire de l'élément exposé. Le calcul de ces indices de risque peut être entièrement assisté par ordinateur. C'est l'objet de l'application menée sur le territoire de la Martinique (Antilles françaises) en ayant recours aux potentialités offertes par le Système d'Information Géographique de la Martinique (SIGMA) et ses logiciels d'exploitation.



Principes de calcul des indices de risque de pertes pour n bâtiments :

Pertes absolues : $IRPA = \sum_{i=1}^{n} D_i * Vi_i$

Pertes relatives : $IRPR = \frac{\sum_{i=1}^{n} D_i}{n} * 100$

avec : V pour valeur unitaire de l'élément exposé
D pour taux d'endommagement unitaire de l'élément exposé

Taux d'endommagement unitaire D_i défini par une fonction du type :

$D_i = fct\ (M, N_i)$

avec
M pour manitude de l'effet du phénomène
N pour nature de l'élément exposé

Figure 4.2. Principe du calcul d'un indice de risque de pertes liées à l'endommagement du bâti (mailles de 500 m de côté). Application à la Martinique (Leone, 2004).

4.2.2. Disponibilité des données entrantes

Avec près de 50 % de son territoire exposé au moins à un aléa naturel fort et 30 % du parc immobilier menacé, l'île de la Martinique est un espace à haut risque présentant un intérêt indéniable pour de telles applications cartographiques qui contribuent à part entière au diagnostic territorial de l'île en complément de l'analyse menée dans la seconde partie du mémoire.

Le SIGMA est une base de données numériques géo-référencées commune à plusieurs services de l'État (DIREN, DDE, DAF, DRIRE, Préfecture), à l'Agence d'Urbanisme de la Martinique (ADUAM), aux services techniques du Conseil Général (DGST), ainsi qu'au centre de recherche en Géographie, Développement et Environnement de la Caraïbe (GEODE-Caraïbe) de l'Université des Antilles et de la Guyane (UAG). Certaines de ces données, disponibles pour l'ensemble du territoire martiniquais, sont apparues particulièrement pertinentes et adaptées pour une cartographie de certains risques d'origine naturelle. Les données exploitées pour l'application sont extraites du SIGMA. Il s'agit plus particulièrement du zonage des aléas naturels de la Martinique réalisé au 1:25 000 dans le cadre d'atlas communaux (source BRGM), du microzonage sismique de Fort-de-France levé au 1:10 000 (source BRGM) et de la couche "bâti" de la base de données topographiques de l'Institut Géographique National (BD Topo IGN®, 1994). Certaines de ces données, notamment celles portant sur les aléas naturels, restent uniques en France et sont restées longtemps accessibles au grand public en format SIG sur le site Internet du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (http://www.brgm.fr).

Conformément à la démarche méthodologique présentée **figure 4.2.**, nous avons élaboré une cartographie par carroyage des risques sismique, volcanique et de mouvements de terrain en Martinique Nous avons dû procéder à certaines approximations et simplifications indispensables pour adapter notre méthodologie aux données disponibles. Dans le cadre de ces applications, les scénarios de risque ont été fixés par des contraintes diverses. On peut citer notamment les difficultés de recensement des enjeux et de leurs valeurs, la méconnaissance des magnitudes potentielles des phénomènes et par conséquent des fonctions d'endommagement des enjeux retenus.

Ainsi, les trois cartes d'aléa retenues ont été fournies par le BRGM (Sedan et al., 1998) (**figure 4.3.**). Elles concernent respectivement :

- **L'aléa sismique local**, représenté par quatre de ses effets directs ou indirects : effets vibratoires seulement, effets topographiques, effets de site géologique et sols liquéfiables ou susceptibles de l'être, qui ont été respectivement traduits par quatre niveaux d'intensité croissante.
- **L'aléa volcanique** qui intègre les phénomènes d'écoulements pyroclastiques, de retombées aériennes, d'émanations gazeuses, de lahars, de mouvements de terrain et de tsunamis, et qui est codé par 5 niveaux distincts.
- **L'aléa mouvements de terrain** qui comprend les phénomènes de chutes de blocs, de glissements de terrain et de mouvements indifférenciés, exprimés par 3 niveaux d'intensité. Précisons que la cartographie de l'aléa volcanique a été établie pour un scénario d'éruption maximale crédible de la montagne Pelée (Stieltjes et Mirgon, 1998), tandis que celle de l'aléa sismique local correspond à l'hypothèse d'un séisme tectonique majeur prenant sa source près du plan de subduction intra-océanique des Petites Antilles (Sedan et al., 1998).

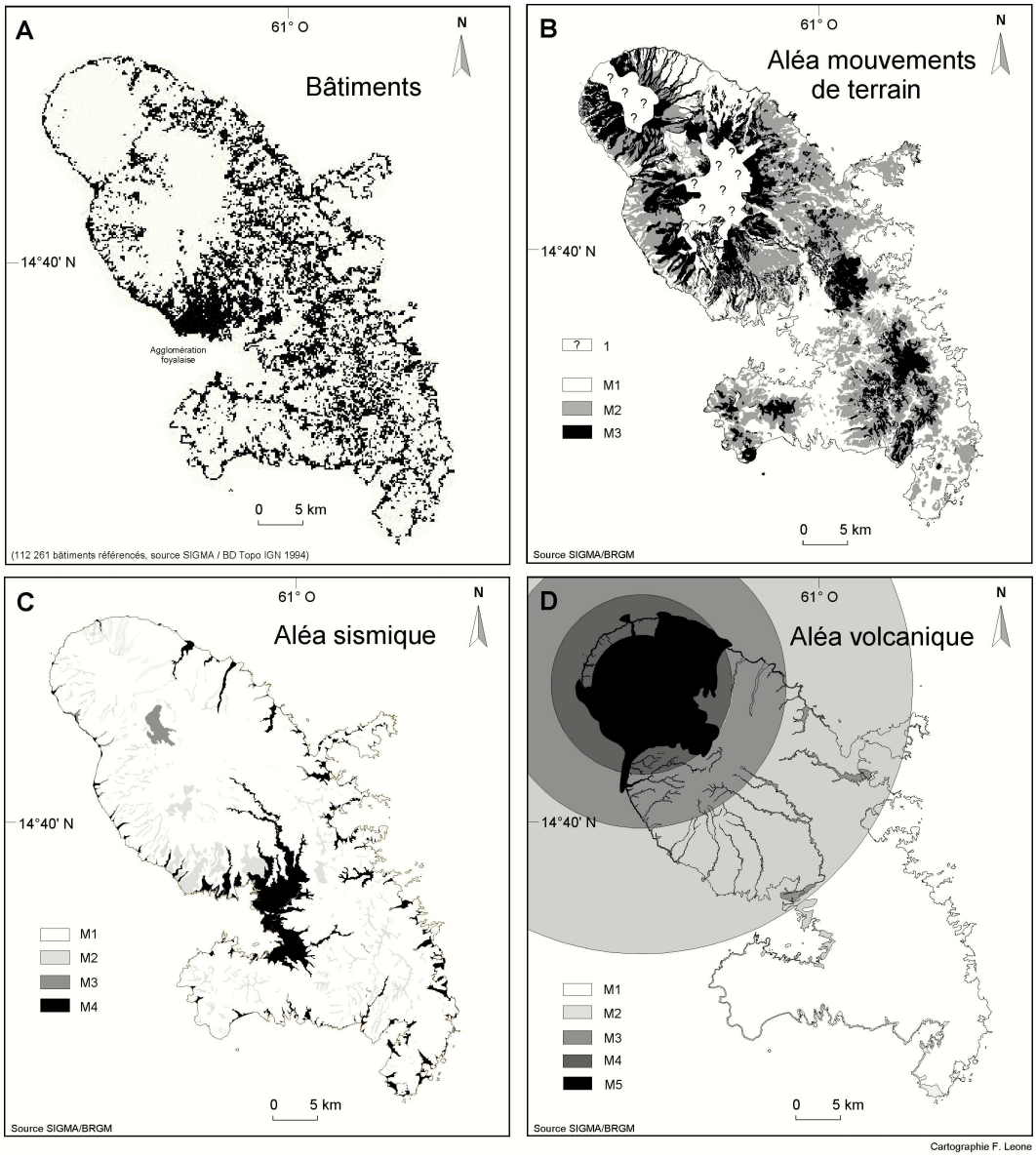


Figure 4.3. Cartographie des aléas naturels et des enjeux (bâti) retenus pour le calcul des indices de risque en Martinique (sources BRGM, 1998).

Après compilation, il ressort une cartographie quasi-complète du territoire excepté pour l'aléa de mouvements de terrain dans les secteurs centre-nord et nord ainsi que sur les trois communes composant l'agglomération foyalaise (Schoelcher, Fort-de-France, Lamentin). Un secteur où l'aléa sismique local n'est pas représenté non plus sur les atlas. Ces lacunes ont pu cependant être partiellement comblées par les données sur l'aléa de mouvements de terrain et les effets sismiques locaux extraites du microzonage sismique de cette agglomération établi au 1:10 000 par le BRGM (Chassagneux et al., 1996 ; Sedan et Mompelat, 1996).

4.2.3. D'indispensables approximations

La première approximation a donc été faite à ce stade en traduisant des niveaux d'intensité d'aléas en niveaux de magnitude des effets potentiellement associés, ce qui simplifie les fonctions d'endommagement qui en découlent. Mais l'intérêt de la méthode demeure cependant dans la possibilité de moduler l'endommagement en fonction du niveau d'aléa, ce qui représente une certaine modélisation de la réalité avec les marges d'incertitude que cela comporte. Par ailleurs, les aléas ont été réduits à leur simple dimension spatiale, leur dimension temporelle exprimée par la probabilité d'occurrence n'étant que partiellement intégrée dans la cartographie du BRGM.

Par souci de simplification et de délai de réalisation, la prise en compte des enjeux a été réduite à la considération du simple bâti indifférencié et disponible pour tout le territoire au moyen de la couche correspondante de la BD Topo® de l'IGN de 1994. Cela représente près de 113 000 bâtiments insuffisamment documentés d'un point de vue architectural pour pouvoir les distinguer en terme de comportement différentiel vis-à-vis d'un effet donné. De la même façon et faute de données statistiques suffisantes, nous avons supposé que ces bâtiments avaient tous la même valeur marchande (prix de remplacement), ce qui nous ramène à les considérer sous forme de simples unités. Il en résulte la définition de fonctions d'endommagement structurel du bâti simples et approximatives pour chacun des aléas considérés. Elles sont issues dans le meilleur des cas – précisément pour le volcanisme - de retours d'expérience tirés de la bibliographie disponible sur le sujet (Stieltjes et Mirgon, 1998 ; Blong, 1984) et sinon - pour les mouvements de terrain et les séismes - d'une appréciation personnelle « à dire d'expert ». Ces différentes fonctions sont représentées graphiquement sur la **figure 4.4**.

En résumé, les taux d'endommagement du bâti retenus ici sont donc modulés essentiellement par les niveaux de magnitude des aléas définis par le BRGM et non pas par la qualité du bâti. Seule une approche déterministe reposant sur l'examen approfondi d'un échantillon de bâtiments représentatifs d'une classe d'appartenance permettrait d'affiner de telles fonctions et d'extrapoler l'analyse à l'ensemble du parc immobilier martiniquais. Encore faudrait-il pouvoir disposer de suffisamment de retours d'expériences pour pouvoir préjuger de son comportement potentiel en cas de séisme, d'éruption volcanique ou de mouvement de terrain d'intensités variables.

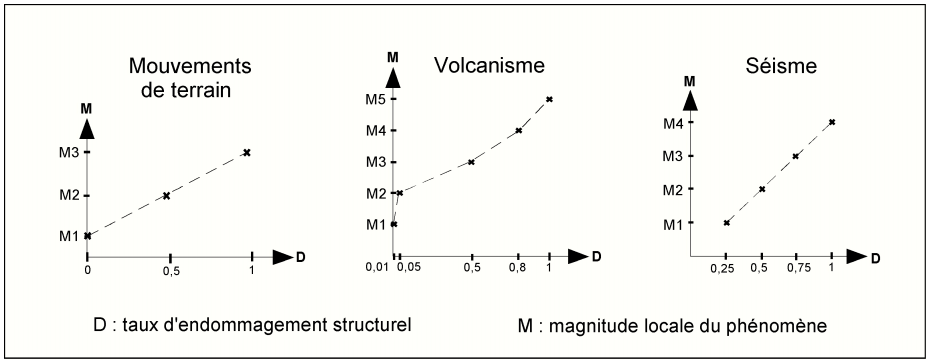


Figure 4.4. Les différentes courbes d'endommagement utilisées pour quantifier la vulnérabilité du bâti en Martinique

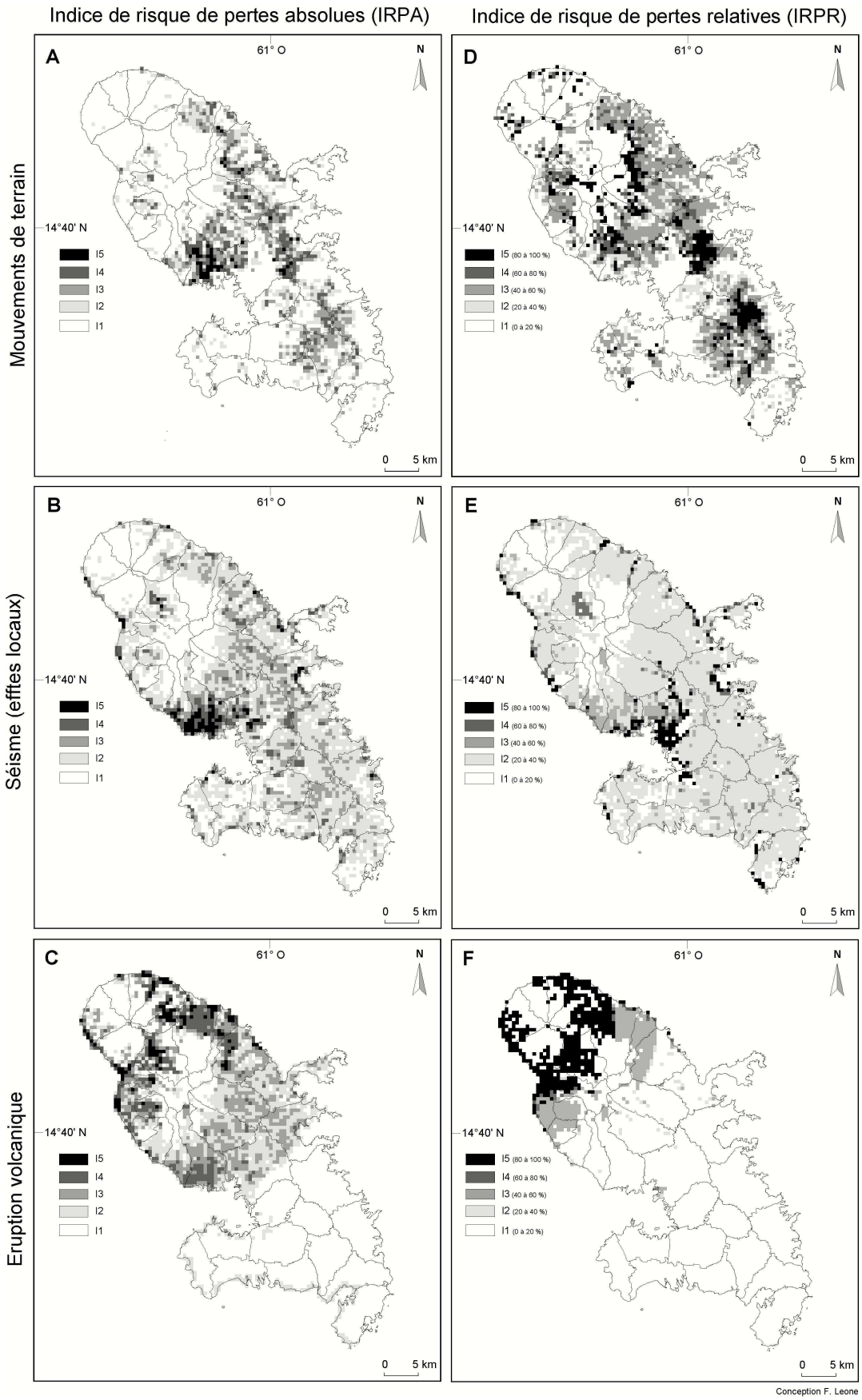


Figure 4.5. Cartes des indices de risque (absolus et relatifs) pour la Martinique. A, D : risque mouvements de terrain ; B, E : risque sismique ; C, F : risque volcanique.

4.2.4. Une cartographie fine mais perfectible du risque de dommages

La cartographie proprement dite des risques (absolus et relatifs) a pu être automatisée au moyen du logiciel MapInfo® pour chacun des aléas considérés. Conformément au principe de calcul introduit précédemment, les traitements informatiques effectués aboutissent au calcul d'un indice de risque de pertes absolues (**IRPA**) par maille de 500 m de côté (somme des pertes de n bâtiments présents) (**figures 4.5. A,B,C**). De la même façon, la moyenne pondérée de ces pertes aboutit au calcul d'un indice de risque de pertes relatives (**IRPR**) et à une cartographie complémentaire (**figures 4.5. D,E,F**). Afin d'obtenir une répartition plus homogène, la discrétisation des valeurs de l'IRPA s'est faite automatiquement selon un algorithme utilisant la moyenne de chaque classe (fonction «répartition automatique » du logiciel).

Ces cartes permettent d'identifier en particulier les secteurs où l'on peut s'attendre à la plus forte densité de pertes liées à l'endommagement du bâti, respectivement en cas de séisme tectonique majeur lié au plan de subduction (intensité MSK ≥ VIII), en cas de future éruption maximale crédible de la montagne Pelée et de déclenchement de mouvements de terrain, en particulier en cas de séisme fort ou bien de précipitations cycloniques. Notons que pour un séisme fort, phénomène aussi soudain que destructeur, l'endommagement du bâti conditionne grandement les préjudices corporels. Par voie de conséquence, la carte de risque sismique obtenue a également valeur de carte de risque de pertes humaines, en supposant un même taux d'occupation humaine du bâti, soit 3 personnes en moyenne par bâtiment. L'objectif de cette application n'est pas de dresser un bilan global des pertes potentielles, contrairement aux analyses de coûts et bénéfices, mais de saisir la variabilité spatiale de l'intensité du risque après une quantification, certes approximative, mais étendue à l'ensemble du territoire étudié.

La méthode indiciaire de cartographie des risques présentée ici repose sur une évaluation du risque unitaire encouru par chaque élément exposé. Pour un scénario donné, cela permet des représentations multi-scalaires qui vont dépendre de l'unité spatiale d'agrégation choisie. On peut ainsi privilégier une maille territoriale homogène (carroyage) qui facilite la lecture de la variabilité spatiale du risque à l'échelle régionale. On s'affranchit ainsi unités spatiales de dimensions variables habituellement utilisées pour géocoder un niveau de risque, telles que les mailles administratives (communales par exemple), les groupes d'enjeux supposés identiques (îlot de bâtiments par exemple) ou bien les zones de même niveau aléa.

Malgré de très nombreuses simplifications, l'application menée sur la Martinique à travers la prise en compte du patrimoine bâti (près de 113 000 bâtiments), a permis de tester la méthode à partir de données contenues dans un SIG. Lorsqu'on dispose de cartes d'aléas, le principal intérêt de cette approche est de pouvoir valoriser des bases de données topographiques, urbaines ou régionales, en recourant aux logiciels de type SIG pour automatiser les procédures de calcul des indices. Elle permet également de suivre à terme l'évolution temporelle du risque en intégrant l'évolution réelle des enjeux et de leur vulnérabilité sur un espace donné, ce qui peut se traduire par des cartes de variation du niveau de risque.

Cette expérimentation cartographique qui s'appuie sur la définition analytique du risque préfigure ce qui peut devenir à terme un outil d'aide à la décision, en matière d'aménagement du territoire, d'organisation des secours, et de sensibilisation du public. Elle permet de définir assez finement des zones d'action prioritaires, là où se concentrent les dommages potentiels, tout en privilégiant la vision d'ensemble.

4.3. Diversité des indicateurs de risques : illustrations en Méditerranée

4.3.1. Présentation

Nous venons de le voir, la mise en carte du risque au sens strict peut s'envisager au moyen d'indices composites, intégrant l'aléa, les enjeux et leurs vulnérabilités, et indissociables de la notion de scénario de pertes (d'endommagement, ou de risque). Les fonctions de vulnérabilité que cela suppose de prendre en compte ne sont cependant pas toujours disponibles dans la littérature. Par conséquent, la cartographie du risque peut et doit également revêtir d'autres formes et d'autres définitions, qui s'éloignent des considérations expertes évoquées jusqu'à présent pour se rapprocher d'une approche moins prédictive et plus informative basée sur des macro-indicateurs. C'est ainsi que nos recherches sur la Méditerranée occidentale nous ont amené à concevoir d'autres familles d'indicateurs de risque, à d'autres échelles d'analyse, pour d'autres objectifs de prévention et sur la base de nouveaux jeux de données qu'il a parfois fallu créer de toute pièce.

Ce travail en cours s'articule autour de deux projets imbriqués impliquant une réflexion méthodologique (quelles données pour quels indicateurs ?), des défis techniques et une demande institutionnelle. Le premier concerne l'élaboration de la plus grosse base de données internationales géoréférencées disponible sur les catastrophes et les risques naturels dans le bassin méditerranéen (SIG RINAMED, pour Système d'Information Géographique sur les Risques Naturels en Méditerranée) (Leone et al., 2006). Le second correspond à la mise au point d'un jeu d'indicateurs de risques naturels sur le territoire des collectivités de l'Association Arc Latin (66 collectivités de découpage NUTS3) (Leone & Pagneux, 2007). Partant de ces deux projets, est apparue la volonté de décliner dans ce mémoire la cartographie du risque selon d'autres modalités, à différentes échelles, pour différents phénomènes, tout en gardant un regard critique sur la pertinence des échelles d'analyse, la fiabilité des données disponibles, leurs limites d'utilisation (technique et juridique), l'utilité de ces cartes et leurs perspectives de généralisation.

Ce travail récent et les familles d'indicateurs qu'il propose, participe au diagnostic géographique et comparatif du risque « naturel » à l'échelle du bassin Méditerranéen, et plus particulièrement de l'Arc latin. Il comble partiellement une lacune en matière de disponibilité d'indicateurs de risque à des échelles de décision régionales sur un bassin de risque homogène. Il vient alimenter les deux projets en cours d'observatoires des Risques Naturels, portés respectivement par l'Association des collectivités de l'Arc latin (http://www.arcolatino.org) et par le Conseil Régional Languedoc-Roussillon.

4.3.2. Disponibilité et validation des données du SIG RINAMED

Un terrain d'étude privilégié

Le bassin méditerranéen a été le siège de nombreuses catastrophes historiques, parfois à l'origine de grands mythes fondateurs comme le Déluge ou l'Atlantide. Certains évènements ont fortement éprouvé les civilisations passées avec des traces encore visibles de nos jours : éruption du Santorin en 1500 avant J.C., éruption du Vésuve en 79 après J.C., écroulement du Mont Granier en 1248, séisme de Lisbonne en 1755, etc. Plus récemment, il a été le siège de catastrophes naturelles particulièrement meurtrières avec au moins 275 000 victimes recensées depuis 1900 (données CRED, 2006). Au titre des évènements récents les plus marquants, on peut citer les séismes de Messine (1908, 75 000 morts) et de Turquie (1999, 17 000 morts), ou

bien la vague de chaleur qui a déferlé sur la France en 2003 (près de 15 000 morts). Les séismes y ont entraîné le plus de pertes humaines. Les différentes bases de données sismiques compilées indiquent un total d'environ 4,8 millions de morts depuis 33 avant J.C., dont 221 370 victimes depuis 1900 (4,6 %) avec une répartition géographique essentiellement concentrée sur l'Italie, la Grèce et le Proche Orient (**figure 4.6**).

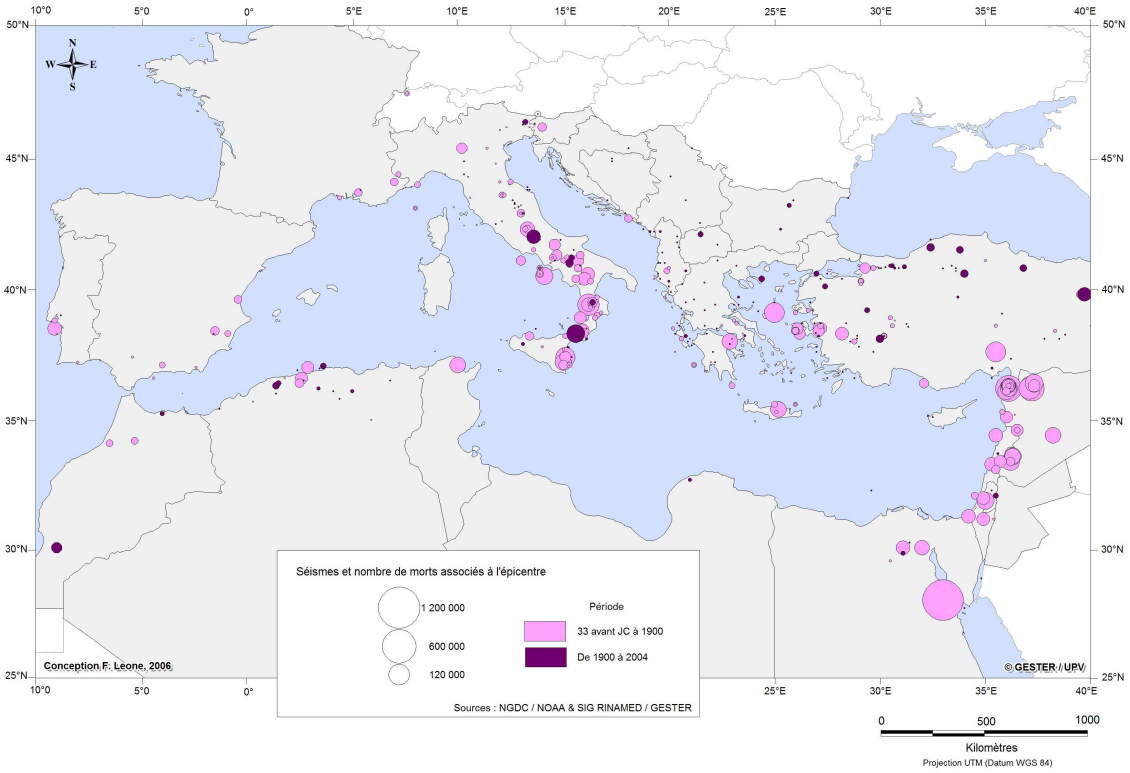


Figure 4.6. Les victimes de séismes historiques en Méditerranée (sources NEIC/USGS ; NGDC/NOAA ; EM-DAT/CRED *in* SIG RINAMED).

Ce bassin géographique cumule de multiples aléas naturels dommageables et d'importants enjeux humains et stratégiques. Berceau des civilisations occidentales et important foyer de population, on recensait en 2002 468 millions d'habitants vivant dans les 29 Etats riverains ou proches de la Méditerranée. Les prévisions démographiques annoncent 528 millions de personnes à l'horizon 2015 (données PNUD, 2003, http://hdr.undp.org). La pression démographique la plus forte se concentre essentiellement sur les littoraux. Les traitements numériques obtenus à partir des données du SIG RINAMED font apparaître 67,7 millions de personnes vivant à moins de 5 km des côtes de la Méditerranée, dont 32 % (21,7 millions) à moins de 1 km (**figure 4.7**). Une pression urbaine sur les littoraux qui va d'ailleurs continuer à s'accentuer fortement sur les rives Sud, au détriment de fragiles écosystèmes.

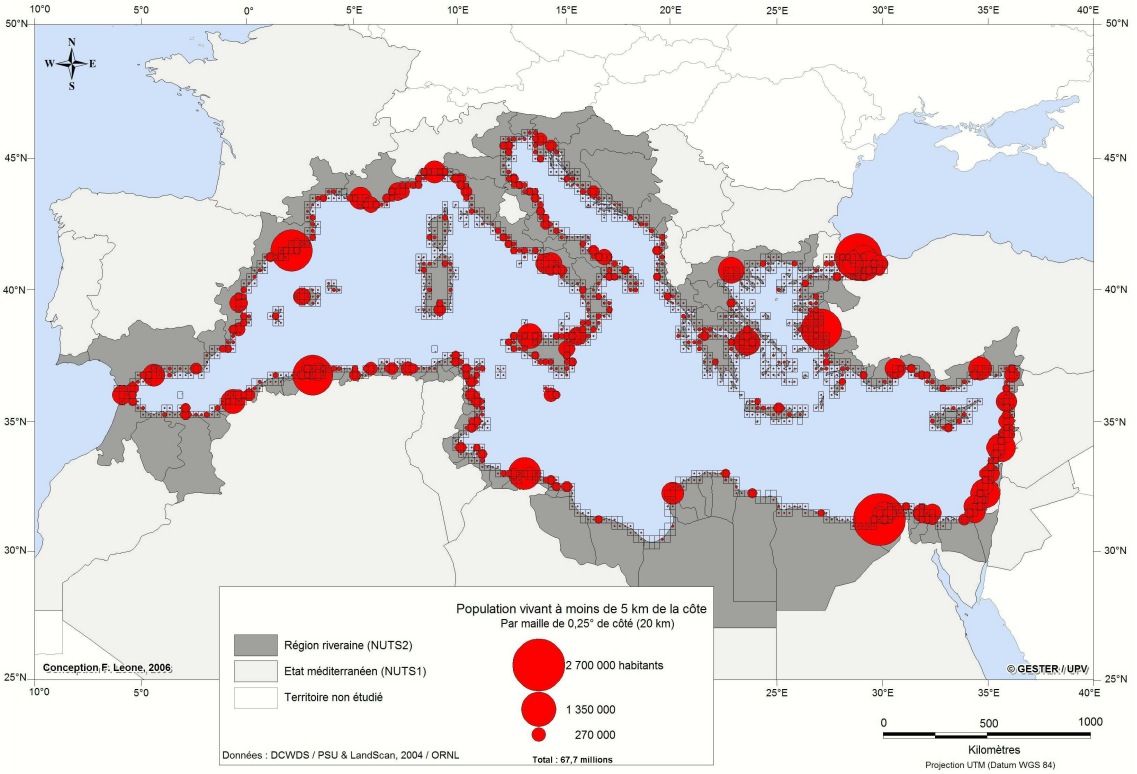


Figure 4.7. Les enjeux démographiques situés à moins de 5 km des côtes méditerranéennes (maille de 400 Km²) (sources DCWDS/PSU et LandScan/ORNL *in* SIG RINAMED)

Sur un plan physique, ce territoire se caractérise par des conditions propices aux aléas naturels. Il est marqué par une intense activité de phénomènes géodynamiques (séismes, volcanisme, tsunamis) dus à la présence d'une zone de confrontation tectonique majeure entre l'Eurasie et l'Afrique. Zone de transition climatique, on y rencontre des phénomènes hydro-météorologiques de grande variabilité spatio-temporelle caractérisés par d'intenses précipitations (crues torrentielles) et des vagues de chaleur. Il en découle une intense activité morpho-dynamique (érosion, mouvements de terrain) sur des versants souvent escarpés et qui est entretenue par un couvert végétal très dégradé, notamment à cause de feux de forêts très fréquents.

Pour toutes ces conditions, le bassin méditerranéen constitue un espace privilégié pour évaluer le risque en intégrant et en spatialisant ses multiples composantes, du moment où les bases de données pertinentes sont constituées. Ce travail de compilation, de validation et de structuration des données relatives aux risques naturels a pris la forme d'un Système d'Information Géographique multi-risques (**SIG RINAMED**). Il s'agit d'une base de données internationale géoréférencée alimentée en continue depuis 2004 par nos soins et occasionnellement par quelques étudiants (Adoul, 2005 ; Doutres, 2006 ; Pagneux, 2006). Elle intègre et harmonise de multiples sources d'information historiques et géographiques structurées sous un seul et même format numérique d'exploitation (MapInfo®) et susceptibles d'être restituées à des échelles variables en fonction de la précision et du format des jeux de données traités.

Un contenu varié

La base intègre des données, le plus souvent en accès libre ou restreint, déjà harmonisées ou brutes, issues de laboratoires de recherches, de grandes organisations internationales, de services publics, de sociétés de réassurance, de publications scientifiques, de programmes de recherches européens ou mondiaux, d'institutions diverses et de travaux personnels ou placés sous notre direction tels que des mémoires d'étudiants.

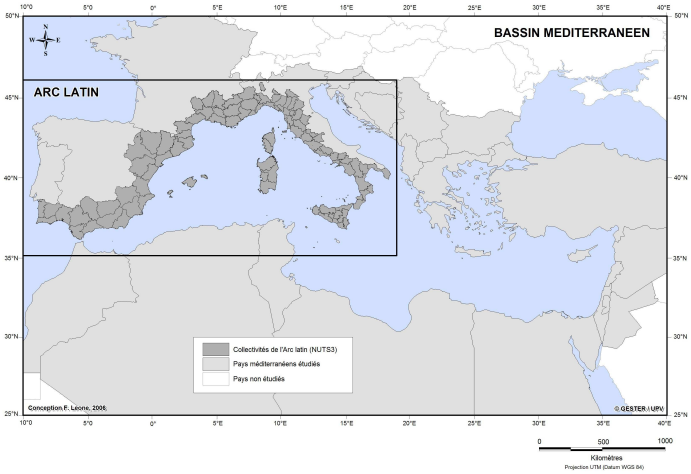


Figure 4 .8. Les deux zones d'étude renseignées au sein du SIG RINAMED

Elle comporte deux échelles d'acquisition et de précision (**figure 4.8**) : la première concerne l'ensemble du bassin méditerranéen avec des données de moyenne précision issues généralement de la synthèse d'autres bases de données. La seconde, plus précise, concerne le territoire de l'Arc latin (région euro-méditerranéenne occidentale) sur lequel les bases précédentes ont été complétées, affinées, recoupées, validées et harmonisées.

Ce travail d'affinage a porté aussi bien sur les données attributaires que sur les objets graphiques auxquels ces informations sont liées. Un effort de précision a en particulier porté sur les fonds altimétriques SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, 2000) et la cartographie du trait de côte SWDB (Water Bodies Data, 2000), distribués par le Service Géologique des Etats-Unis (USGS) (http://srtm.usgs.gov/). Ce trait de côte a pu être validé pour la France après superposition avec l'isohypse « 0 m » de la BD Topo® de l'Institut Géographique National qui sert de support aux cartes au 1/25 000^{e} (**figure 4.9**). Quand à eux, les points altimétriques de la base SRTM (pas de 90 m) nous ont permis de générer des MNT (Modèle Numériques de Terrain) de grande qualité sur l'ensemble de notre territoire d'étude avec une précision verticale de moins de 20 m.

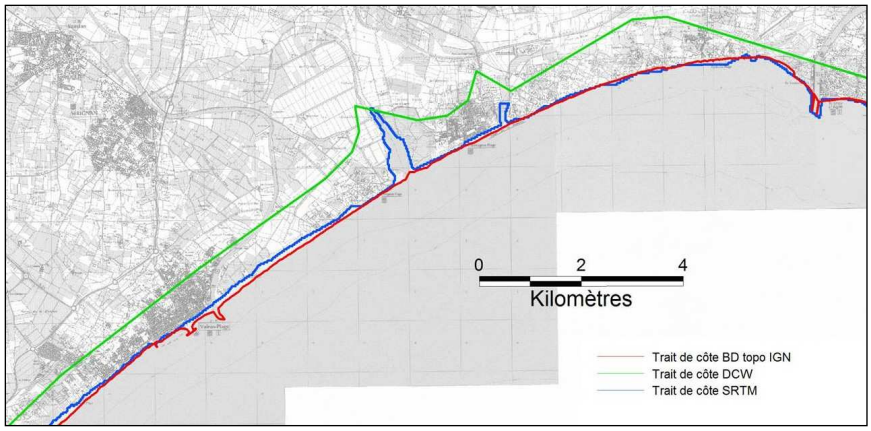


Figure 4.9. Illustration des différents traits de côte disponibles. Le fond SWDB de l'USGS (en bleu) est le plus proche de celui de l'IGN français (BD topo en rouge)

Dans sa version actuelle, le SIG RINAMED comprend des couches d'information plus ou moins bien renseignées sur (extraits sur la **figure 4.10** et détail en **annexe 15**) :

– le **milieu physique** : orographie, hypsométrie, bathymétrie, hydrographie, données climatiques ;

– les **grands enjeux** : effectifs démographiques, maillage territorial, indicateurs socio-démographiques, villes, routes, voies ferrées, aéroports, centrales nucléaires, types d'occupation du sol, etc. ;

– sur les **témoignages de catastrophes** naturelles et leurs impacts humains, matériels et parfois économiques ;

– sur **l'activité des principaux phénomènes** naturels dommageables : nombre et localisation d'inondations, de séismes, d'éruptions volcaniques, de tsunamis, de mouvements de terrain, de l'érosion littorale ;

– sur **certaines menaces** : zonage des aléas sismique, volcanique, mouvements de terrain, tsunami, inondation, érosion des sols ;

– sur d'éventuelles **mesures de prévention et de réduction** des risques naturels majeurs (plans de prévention, plans de secours, documents d'information préventive, moyens de mitigation) ;

– sur certains **facteurs et indicateurs de vulnérabilité** : macro-indicateurs et profils socio-économiques et démographiques, taux de croissance urbaine, taux d'équipement, etc.

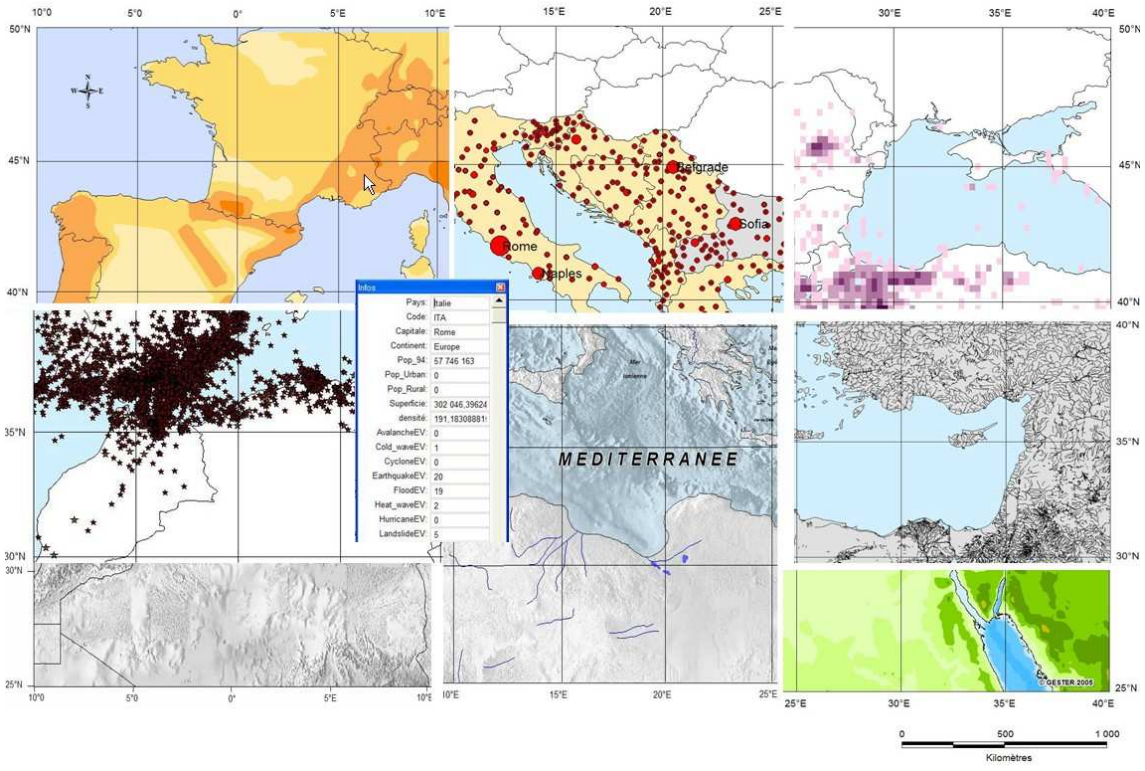


Figure 4.10. Mosaïque de cartes produites à partir des données du SIG RINAMED (sources diverses)

Des données harmonisées et structurées

Ce travail de compilation et d'harmonisation a été rendu complexe par la diversité des formats d'origine manipulés (raster, vectoriel, Grid, tabulaire géoréférencé ou non), la grande hétérogénéité des bases de données déjà disponibles, la variabilité des échelles spatiales et temporelles d'acquisition des données et la diversité des implantations géographiques (points, segments, parcelles, pixels). Tout ceci a impliqué des temps de traitement parfois très longs, contraints par les capacités informatiques de calcul à notre disposition et par la minutie de certaines opérations d'harmonisation et de validation.

L'effort d'harmonisation et de validation a souvent nécessité de confronter plusieurs sources de données et de les fusionner sur la base de critères identiques. C'est en particulier ce qui a été fait pour les séismes historiques meurtriers ou bien pour les tsunamis, en distinguant dans ce dernier cas les sources tsunamigènes des effets sur la côte (*Runup*). Quand cela a été possible, une remontée aux sources primaires a permis d'écarter certains évènements. C'est ainsi qu'une visite aux archives de la ville de Sète a permis de réinterpréter le supposé tsunami du 22 octobre 1844 (20 morts). Il s'agissait en fait d'une tornade (« trombe électrique»). Nous avons dû ainsi supprimer le seul tsunami meurtrier connu des côtes languedociennes signalé dans la très officielle base de données géophysiques internationale (NGDC) de la NOAA américaine (http://www.ngdc.noaa.gov).

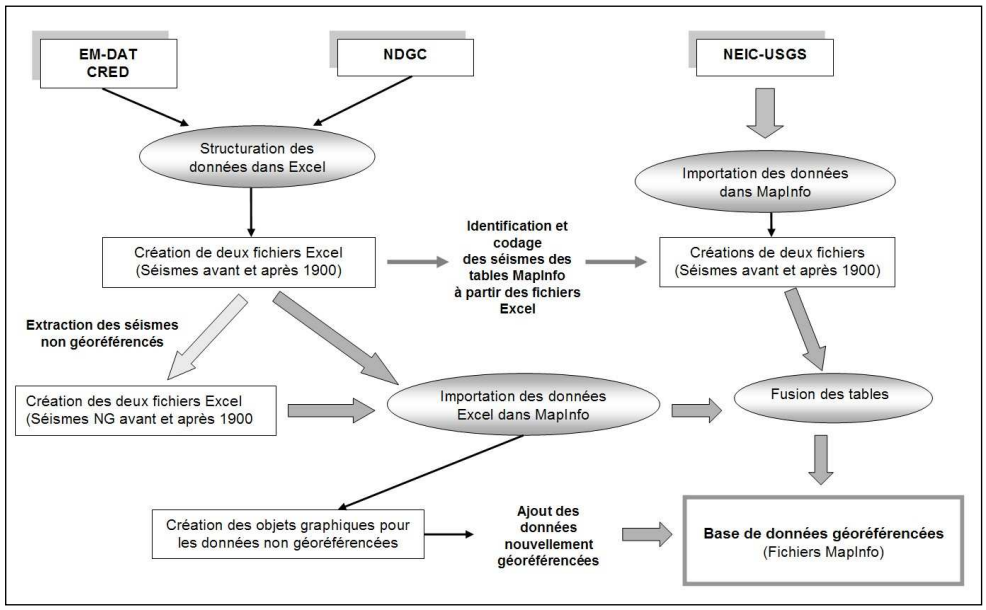


Figure 4.11. Exemple de chaîne de traitement suivie pour l'homogénéisation et la structuration de données au sein du SIG RINAMED. Cas des victimes de séismes historiques à partir de trois bases de données internationales.

De la même façon, les bases de données sur la sismicité historique ont dû être confrontées pour supprimer des doublons, pour rectifier des informations sur le nombre de victimes, et pour attribuer à chaque épicentre connu les victimes associées (**figure 4.6**). Cette dernière opération, très fastidieuse, a été obtenue par recoupement des catalogues de sismicité historique de la NGDC (épicentres), du NEIC (National Earthquake Information Center, USA) et du CRED (EM-DAT) (victimes et coûts) (**figure 4.11**).

Par ailleurs, les nécessités de précision dans la superposition de certaines unités territoriales entre elles ou bien avec les limites de certains milieux physiques, nous ont parfois contraint à redessiner manuellement leurs contours géographiques. C'est ainsi que les limites administratives littorales du découpage NUTS3 de l'Arc latin épousent parfaitement le trait de côte fourni par la base SWDB de l'USGS (**figure 4.9**).

Enfin, nos données démographiques décrivant les enjeux humains sont issues de la base internationale LandScan 2004 de l'ORNL (Oak Ridge National Laboratory, 2004). Les effectifs de population y sont agrégés sur des mailles de 1 km², ce qui autorise une grande précision (infra-administrative) dans l'affichage des enjeux et l'élaboration des indicateurs de risque. Nous avons validé cette base par confrontation spatiale et quantitative avec les données statistiques officielles de divers services statistiques nationaux pour deux échelles de découpage territorial : les communes de la Région Languedoc-Roussillon et les collectivités de rang NUTS3 (*Diputaciones, Département, Provincia*) de l'Arc latin (Portugal, Espagne, France, Italie). En terme d'effectif de population, la base LandScan présente des écarts relatifs de valeur qui sont respectivement de + 1,92 % pour la région Languedoc-Roussillon et de – 4,8% pour l'Arc latin (**figures 4.12. A,B**). L'analyse spatiale de ces effectifs de population à l'échelle des unités spatiales correspondantes, montre une très bonne corrélation spatiale des données LandScan avec les bases statistiques officielles de l'INSEE (France), de l'ISTAT (Italie), de l'INE (Espagne et Portugal). Les écarts absolus les plus significatifs concernent essentiellement les grosses agglomérations. Nous estimons ainsi être en possession d'une base de données démographiques internationale de très bonne qualité et de très bonne précision spatiale, adaptée à une analyse quantitative du risque à l'échelle supra-communale.

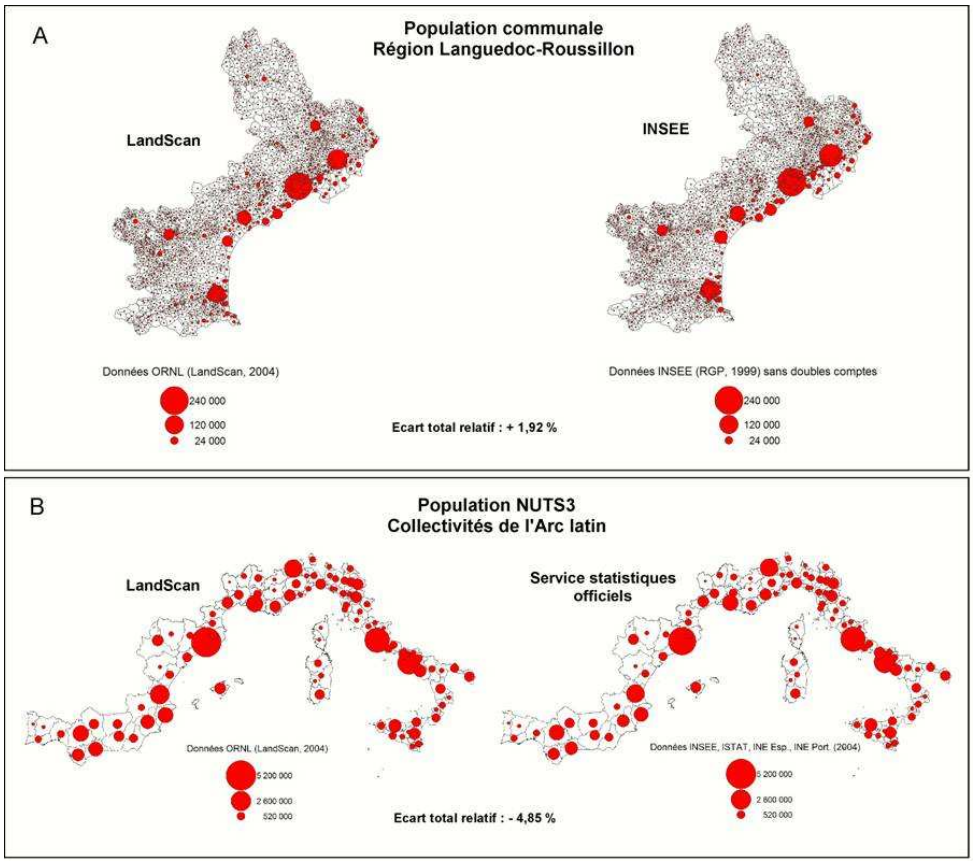


Figure 4.12. Validation quantitative et spatiale des données de population LandScan par confrontation avec les statistiques officielles. A : pour les communes du Languedoc-Roussillon, **B** : pour les collectivités de rang NUTS3 de l'Arc latin

4.3.3. Choix des données et des zonages de référence

Une fois la validation des données effectuée et quelle que soit l'échelle d'étude, toute démarche cartographique d'évaluation et d'affichage du risque nécessite de définir les référentiels spatiaux adaptés aux données dont on dispose et au message que l'on souhaite porter. Ces référentiels concernent aussi bien la définition spatiale de l'aléa, des enjeux présents, des critères de vulnérabilité retenus, que les mailles géographiques de calcul du risque (maillage territorial). Dans le cas présent, les différents indices de risque proposés sur la zone méditerranéenne, sont basés sur des zonages d'aléas de référence mis à disposition par la communauté scientifique internationale ou bien conçu par nos soins à partir de données brutes.

Le **tableau 4.2.** établit la liste et les sources des 12 zonages de référence des aléas naturels retenus à l'échelle de l'Arc latin ou bien du bassin Méditerranéen. Faute de mieux et devant l'absence de zonage homogène et accessible sur le pourtour méditerranéen, l'aléa inondation a été réduit à une zone tampon de 500 m de part et d'autre des cours d'eau de la zone d'étude. Ce zonage pourra être amélioré dans le futur en intégrant les fréquences de crue des cours d'eau et l'altimétrie au voisinage de ces derniers. Le zonage de l'aléa volcanique a été ramené à un périmètre de 50 km de rayon pouvant concentrer l'essentiel des manifestations volcaniques dommageables d'une éventuelle éruption. Il pourrait être affiné en intégrant les microzonages des aléas volcaniques accessibles en particulier pour certains volcans italiens (Vésuve, Etna, Stromboli, Vulcano). De la même manière, l'aléa tsunami ou plutôt les zones exposées à d'éventuels tsunamis (submersion marine) ont été définies par extraction automatique des tranches d'altitude comprises entre 0 et 20 m et situées à moins de 5 km de la côte, distance considérée comme limite pour la pénétration d'un tsunami majeur en zone de plaine littorale (**figure 4.13**). Sur un secteur donné, cet aléa pourrait être affiné dans le futur en intégrant plusieurs sous-tranches d'altitude et des probabilités d'occurrence de tsunami de *runup* donnés déduites des fréquences d'activité historiques de différentes sources tsunamigènes (séismes, glissements sous-marins). L'aléa mouvements de versant a été obtenu par croisement de données sur les pentes (facteur permanent) et les intensités moyennes des précipitations (facteur déclenchant) calculées à partir des quantités moyennes de pluie et du nombre de jours de pluie sur la période 1961-1990. Ce traitement a débouché sur un indice de susceptibilité aux instabilités de versant assez représentatif des conditions d'occurrence de ces phénomènes à une échelle du 1 / 100 000^{e} (*cf.* détail de la **figure 4.22**).

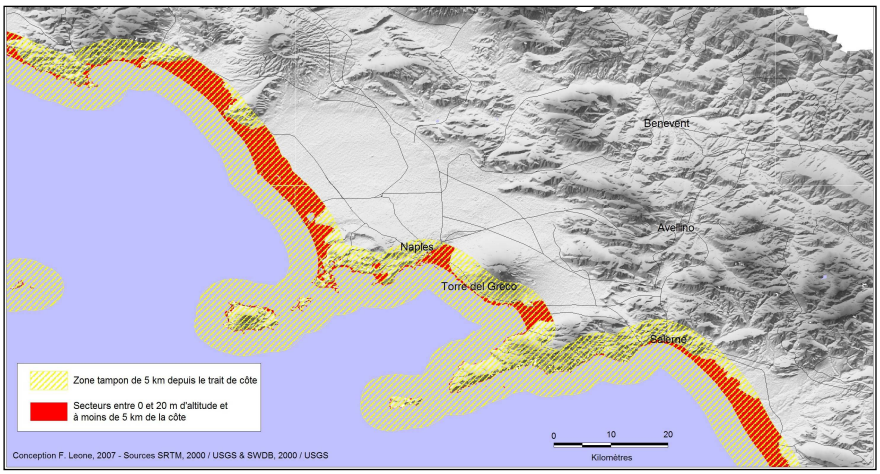
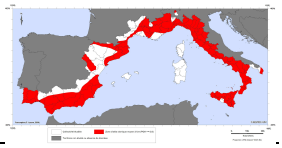
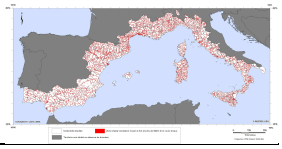
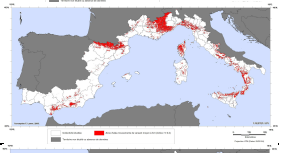
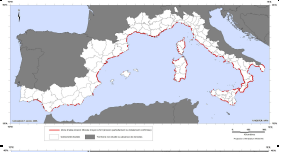
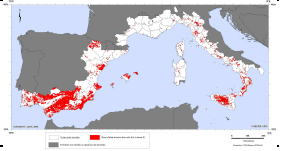
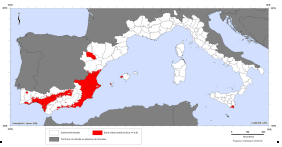
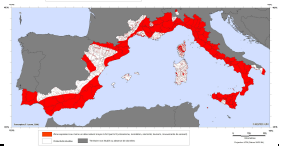
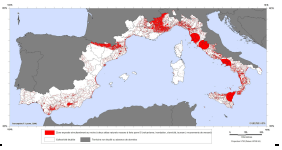
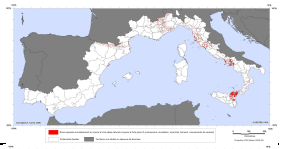
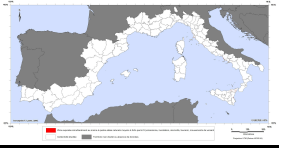


Figure 4.13. Principe du zonage des zones exposées à un tsunami moyen à fort.

Tableau 4.2. Les zonages de référence des aléas naturels retenus sur l'Arc latin

Aléa	Zonage de référence	Codes des sources	Carte
Sismique	Zones exposées un aléa sismique moyen à fort (secteurs exposés à une accélération maximale du sol supérieure ou égale à 0,8 m/s² ayant 10% de chance d'être dépassée d'ici 50 ans)	GSHAP, 1999 / SSS	
Tsunami	Zones exposées un aléa tsunami moyen à fort (secteurs compris entre 0 et 20 m d'altitude et situés à moins de 5 km de la côte)	SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS	
Inondation	Zones exposées à un aléa inondation (secteurs situés à moins de 500 d'un cours d'eau)	DCWDS, 1998 / PSU	
Volcanique	Zones exposées un aléa volcanique moyen à fort (secteurs situés à moins de 50 km d'un volcan actif au cours de la période historique)	GVP, 1999 / SI	
Mouvements de versant	Zones exposées à un aléa mouvements de versant moyen à fort (secteurs d'indice de susceptibilité de Leone supérieur ou égal à 0,2)	SRTM, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU	
Erosion littorale	Linéaire côtier exposé à un aléa érosion littorale moyen à fort (secteurs où l'érosion est partiellement ou totalement confirmée)	EUROSION, 2002 / AEE	
Erosion des sols	Zones exposées à un aléa érosion des sols fort (secteurs de classe 3 du "soil erosion risk" du "CORINE Soil Erosion Risk project")	CSERP, 1990 / AEE	
Aridité	Zones exposées à un aléa aridité moyen à fort (secteurs d'indice d'aridité inférieur ou égal à 0,5 : semi-aride à aride)	DISMED, 1990 / AEE	
Multi-aléas 1	Zones exposées au moins à un aléa naturel moyen à fort parmi les 5 aléas de référence suivants : (1) Inondation , (2) volcanisme , (3) sismicité , (4) tsunami, (5) mouvements de versants	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU	
Multi-aléas 2	Zones exposées simultanément au moins à 2 aléas naturels moyens à forts parmi les 5 suivants : (1) Inondation , (2) volcanisme , (3) sismicité , (4) tsunami, (5) mouvements de versants	idem	
Multi-aléas 3	Zones exposées simultanément au moins à 3 aléas naturels moyens à forts parmi les 5 suivants : (1) Inondation , (2) volcanisme , (3) sismicité , (4) tsunami, (5) mouvements de versants	idem	
Multi-aléas 4	Zones exposées simultanément au moins à 3 aléas naturels moyens à forts parmi les 5 suivants : (1) Inondation , (2) volcanisme , (3) sismicité , (4) tsunami, (5) mouvements de versants	idem	

Pour les aléas gradués, les seuils de référence retenus ont permis de conserver uniquement les niveaux d'aléas les plus élevés (moyen à fort). Le but est de privilégier uniquement les espaces les plus menacés et d'éviter la construction d'indicateurs trop complexes basés sur plusieurs niveaux d'un même aléa. Ces seuils définis, certaines combinaisons d'aléas de référence ont abouti à des zonages multi-aléas intégrant soit les niveaux les plus élevés (en mode vectoriel), soit le nombre d'aléas présent (en mode raster grid). Ainsi, pour 5 aléas naturels majeurs (volcanisme, sismicité, instabilité de versant, tsunami et inondation), la **figure 4.14.A** représente les territoires de l'Arc latin les plus menacés par au moins un de ces aléas, tandis que la **figure 4.14.B** représente le nombre de ces aléas par pixel de 1 km de côté. Ces deux formes d'intégration spatiale multi-aléas vont permettre de construire des indices de risque différents, à des échelles différentes.

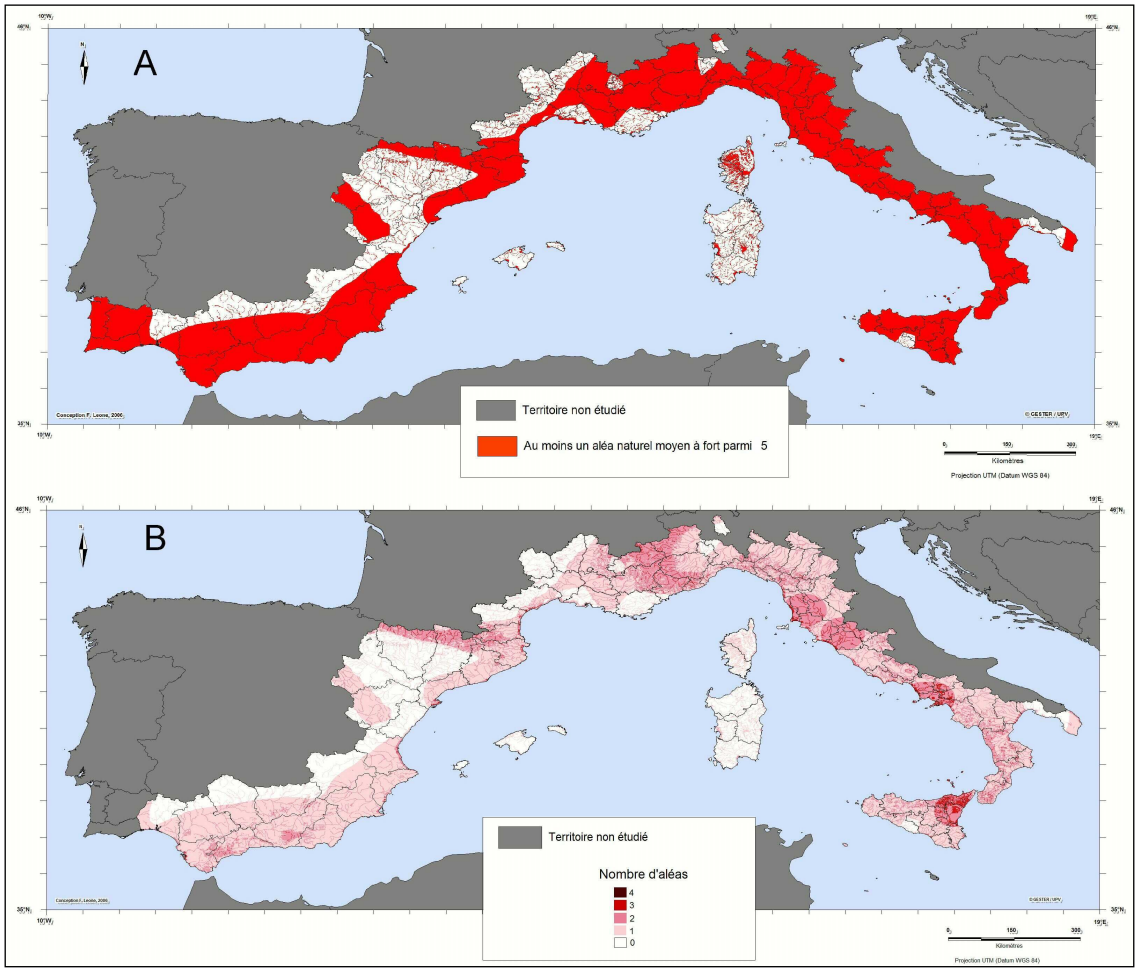


Figure 4.14. Deux modes de représentation cartographique intégrée multi-aléas sur l'Arc latin (volcanisme, sismicité, tsunami, mouvements de versant, inondations). A : au moins un aléa élevé parmi 5, B : nombre d'aléas élevés présents.

Pour ce qui est des **enjeux de référence** (éléments exposés), nous avons retenu pour nos analyses cinq sources d'éléments exposés :

- les données de population issues de la base LandScan et agrégées au km² (2004) ;
- les données de population issues de différentes sources (*City Populations* et *Géopolis*) et agrégées aux villes de plus de 20 000 habitants (disponibles pour deux dates) ;
- les zones artificialisées (zones urbanisées) issues de la base CORINE Land Cover (disponibles pour 1990 et 2000) (Arc latin seulement) ;
- le réseau routier issu de la base DCW *(*Digital Chart of the World , 1998) ;
- les territoires administratifs (NUTS3) de l'association des collectivités de l'Arc latin.

Nous verrons dans le paragraphe suivant que les principaux **macro-indicateurs de vulnérabilité** exploités dans cette analyse régionale sont :

- le taux moyen annuel de croissance urbaine des villes de plus de 20 000 habitants ;
- le taux moyen de croissance des zones artificialisées entre 1990 et 2000 (Arc latin seulement) ;
- l'Indicateur de Développement Humain (IDH) des Etats de la zone méditerranéenne.

La définition d'un maillage territorial de référence pour l'établissement des cartes d'indicateurs de risque dépend de la précision graphique des contours de ce maillage, autrement dit de la qualité du fond de carte. Le problème peut se poser pour des unités administratives. Il est résolu en travaillant sur des mailles géométriques uniformes comme un carroyage vectoriel (polygones) ou bien raster (pixel). Se pose ensuite la question de la disponibilité des données de base alimentant la construction des indicateurs. Celles-ci doivent être présentes et uniformes en contenu et en implantation géographique sur l'ensemble de l'espace étudié. Enfin, les indicateurs retenus répondent à des problématiques et des objectifs variés. Ils doivent donc s'appliquer à des échelles territoriales et de prise de décision pertinentes : ville ? Bassin de risque ? Commune ? Département ? Région ? Le paragraphe suivant répond en partie à ces questions en proposant une série d'indicateurs de risque spatialisés et réactualisables, simples ou synthétiques, pour différentes échelles géographiques de prise de décision, ou tout simplement d'information.

4.3.4. Construction des indicateurs géographiques

Différentes familles et types d'indicateurs

Un examen attentif des différents bases statistiques officielles disponibles auprès de l'Union européenne (Eurostat, http://epp.eurostat.ec.europa.eu), de l'Agence Européenne de l'Environnement (http://www.eea.europa.eu/) ou bien des Nations Unies, notamment via le Plan Bleu (http://www.planbleu.org), confirme la quasi absence d'indicateurs de risques naturels homogènes sur l'espace méditerranéen à des échelles infra-nationales.

Cette lacune nous prive d'une vision d'ensemble et comparative de l'état actuel des risques et d'un suivi de leur évolution à différentes échelles de décision et de gouvernance pour les années à venir.

La principale explication en est sans aucun doute la difficulté d'accéder à des données structurées, harmonisées et géoréférencées sur l'ensemble de ce vaste territoire. Ces aspects étant partiellement comblés par le SIG RINAMED, nous avons initié une démarche de construction d'indicateurs de risques naturels, contribuant ainsi modestement au diagnostic territorial de ce bassin à risques.

D'un point de vue théorique, notre réflexion préalable nous a amené à proposer 7 grandes familles d'indicateurs de risques naturels spatialisables. Ils sont définis dans le **tableau 4.3.** et sont illustrés par des exemples.

Mis à part les indices de risque qui relève de la famille des indicateurs **composites** (plusieurs variables), les autres indicateurs peuvent être qualifiés de **simples** car ils reposent sur une seule variable. Cependant, ces indicateurs simples peuvent être cumulés ou sur un territoire donné pour exprimer un indicateur global qualifié de **synthétique** (*cf.* **figure 4.15**).

Tableau 4.3. Proposition de différentes familles d'indicateurs de risques naturels spatialisables

Famille	Définition	Exemple
Indicateurs de catastrophes (de dommages ou de pertes)	Bilans humains, matériels et économiques d'évènements dommageables passés	*Nombre de morts dus à des séismes depuis 100 ans*
Indicateurs d'activité des phénomènes dommageables	Fréquence historique ou nombre de phénomènes dommageables calculée sur une période de temps donnée	*Nombre d'inondations depuis 30 ans*
Indicateurs de menace (aléas et/ou de prédisposition au phénomène)	Probabilité d'occurrence d'un phénomène de référence sur une période de temps donnée ou bien prédisposition d'apparition (susceptibilité)	*Part des surfaces exposées à des glissements de terrain potentiels (fortes pentes * lithologies favorables*)
Indicateurs d'exposition au danger (enjeux)	Quantité d'enjeux (humains, infrastructurels, économiques ou environnementaux) situés sur une zone de danger donnée	*Nombre de personnes vivant en zone inondable*
Indicateurs de vulnérabilité	Sensibilité à l'endommagement des personnes, des activités et des biens	*Part de la population ayant plus de 70 ans*
Indices de risque (aléa*enjeux*vulnérabilité)	Indices de risque exprimant les pertes potentielles en cas de manifestation d'un phénomène donné sur une période de temps donnée	*Indice de risque sismique combinant le niveau d'aléa, les enjeux humains et la qualité du bâti*
Indicateurs de prévention (territoriale / gestion de crise)	Efforts consentis en matière de prévention, de gestion et de capacité collective à surmonter les effets d'un évènement dommageable	*Nombre de Plans de Prévention des Risques approuvés ou prescrits*

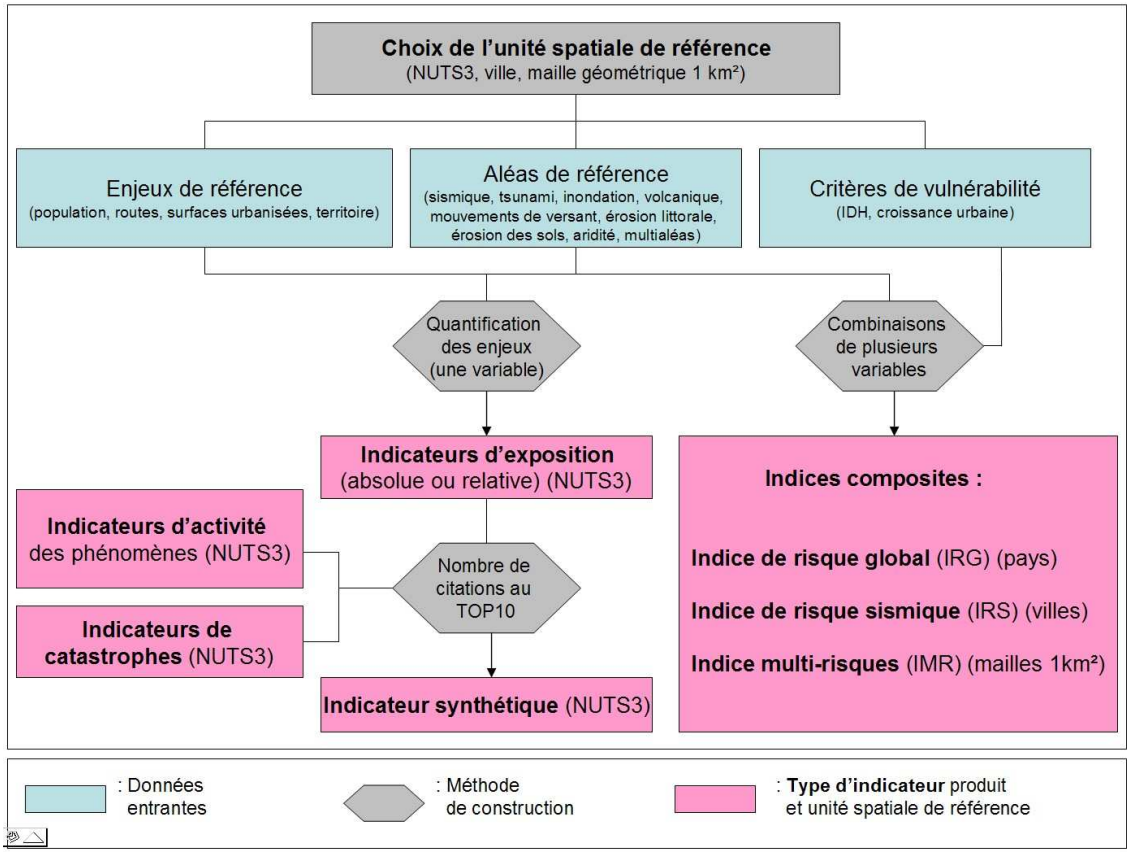
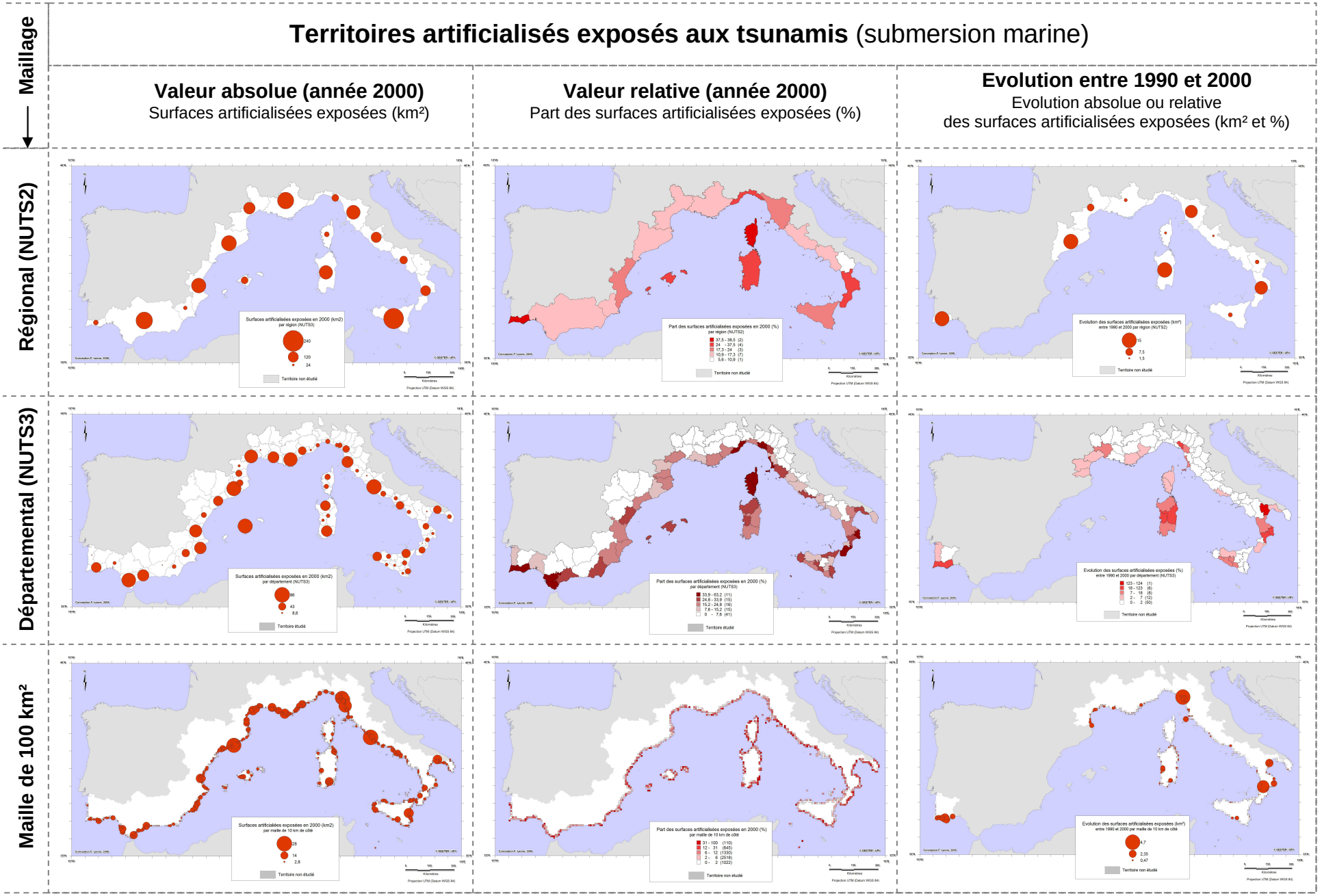


Figure 4.15. Principe d'élaboration des différents types d'indicateurs géographiques de risques naturels produits sur la Méditerranée

Indicateurs simples et synthétiques

Comme l'illustre la **figure 4.15.** pour les applications menées sur la Méditerranée, les indicateurs les plus simples mis au point reposent sur la quantification des enjeux humains, territoriaux et matériels/fonctionnels par secteur d'aléa de référence (*cf.* **annexe 16** pour voir l'ensemble des indicateurs produits sur l'Arc latin). La **figure 4.16.** illustre différentes échelles de calcul et d'affichage de ces indicateurs, dits d'exposition, en prenant pour exemple les surfaces artificialisées (zones urbanisées) exposées aux tsunamis (submersion marine). Les indicateurs correspondants peuvent se décliner sur plusieurs unités spatiales de référence, donc plusieurs échelles (région, département, maille géométrique de 1 km²), et s'exprimer soit en valeur absolue (surfaces en km²), soit relative (%). Quand les données le permettent – ici pour la France et l'Italie – on peut avoir accès à l'évolution absolue ou relative de ces enjeux urbains entre deux dates (ici entre 1990 et 2000). A titre indicatif, c'est la province portugaise d'Algarve qui semble avoir connu le plus d'évolution urbaine en zone de submersion marine entre 1990 et 2000 (+ 15 km²).



Sources : CLC, 1990 et 2000 / AEE & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS

Figure 4.16. Différentes modes de représentation spatiale d'un indicateur d'exposition aux tsunamis sur l'Arc latin

Les **indicateurs d'exposition** ainsi construits, peuvent ensuite donner lieu à un classement des territoires les plus concernés (les 10 premiers par exemple) par chaque indicateur. Dans un second temps, le comptage des territoires les plus souvent cités dans ce « TOP10 » permet de définir un **indicateur synthétique de risque**. Un indicateur de ce type a été développé sur l'Arc latin au niveau NUTS3 pour 90 collectivités. Il est basé au total sur 75 indicateurs, d'exposition (4 familles d'enjeux sur 12 aléas de référence), d'activité des phénomènes historiques (séismes, tsunamis, éruptions) et de catastrophes historiques (plus de 10 morts). Les données d'entrée et la méthodologie de construction sont détaillées sur la **figure 4.18**. La carte finale (**figure 4.17**) donne une image globale des collectivités les plus souvent citées et donc les plus problématiques en matière de risques naturels déclarés ou potentiels. Quinze des 20 premières provinces les plus concernées par ce classement sont italiennes. La plus nommée est celle de Naples (40 citations). La première collectivité espagnole est la *diputacion* de Valencia (8ème rang). Le premier département français est celui des Bouches-du-Rhône (11ème), suivi des Alpes-Maritimes (13ème).

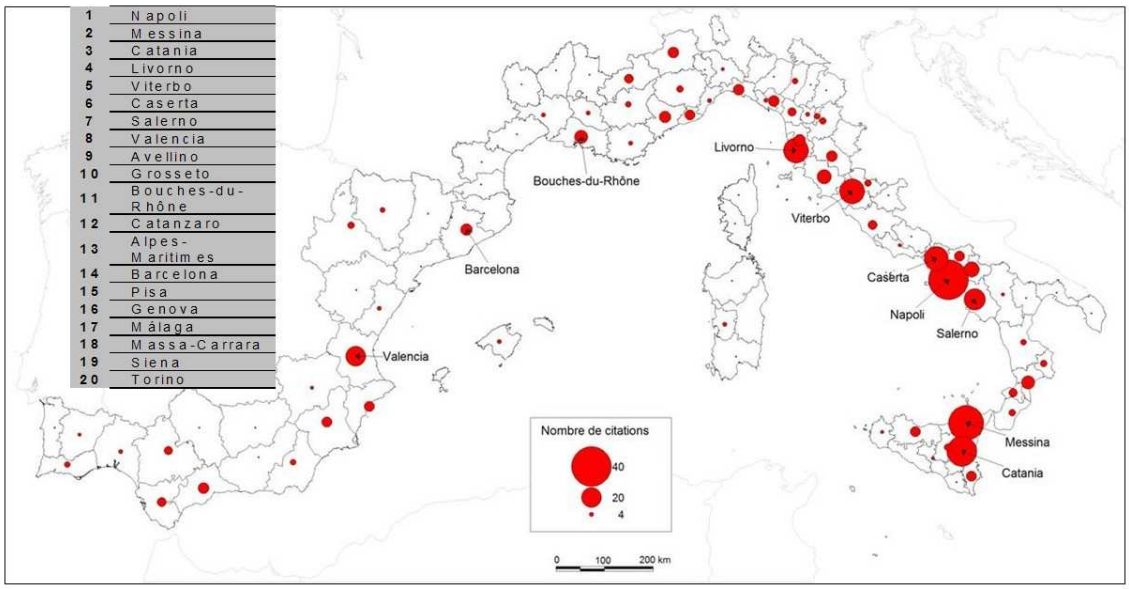
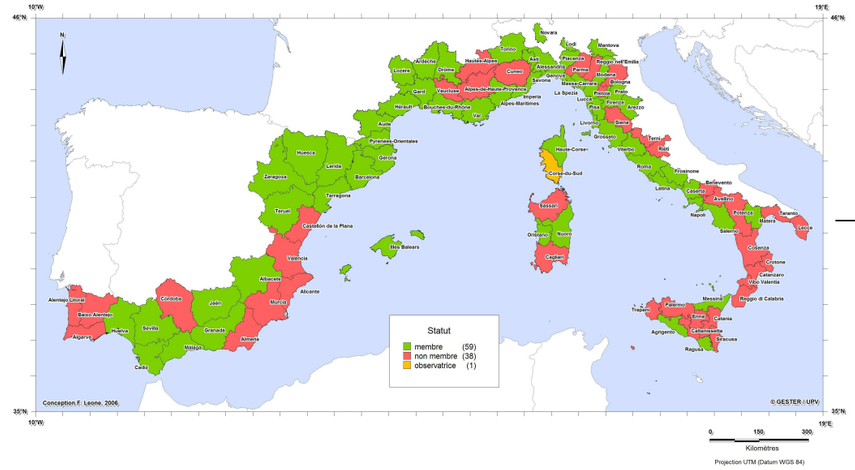
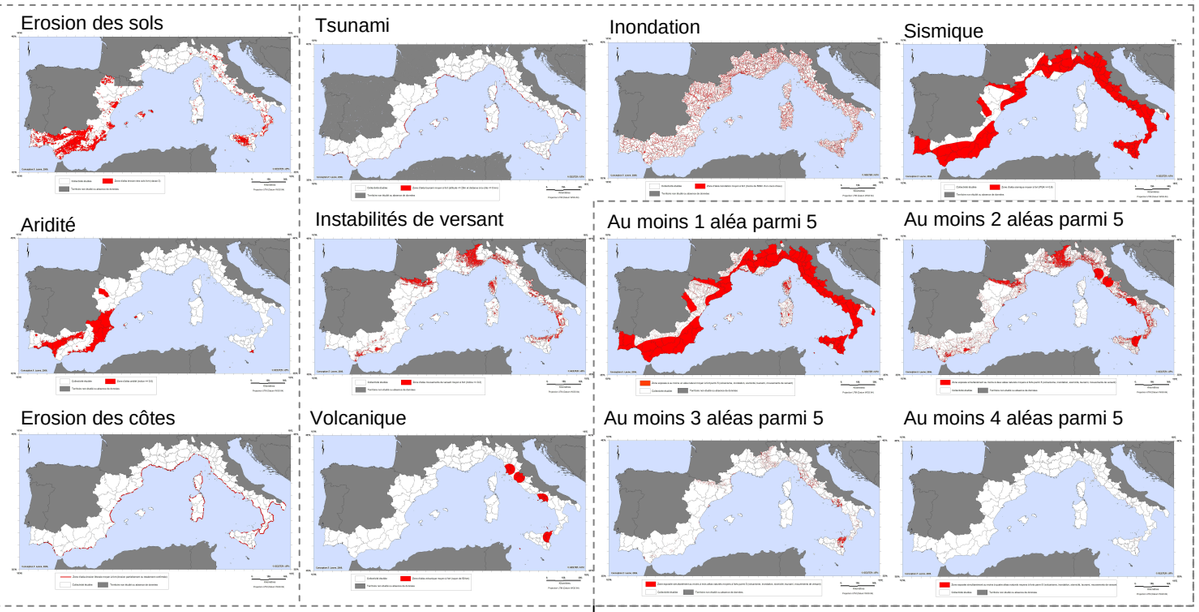


Figure 4.17. Classement des collectivités de rang NUTS3 de l'Arc latin sur la base d'un indicateur synthétique multirisque naturel intégrant 75 sous indicateurs

Choix du référentiel spatial (collectivités de rang NUTS3 de l'Arc latin)

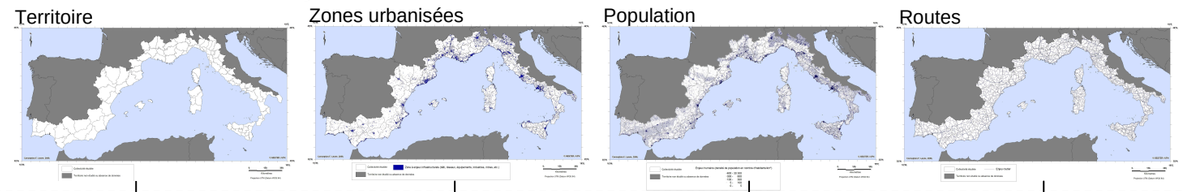


Choix de 8 aléas de référence et 4 combinaisons multi-aléas



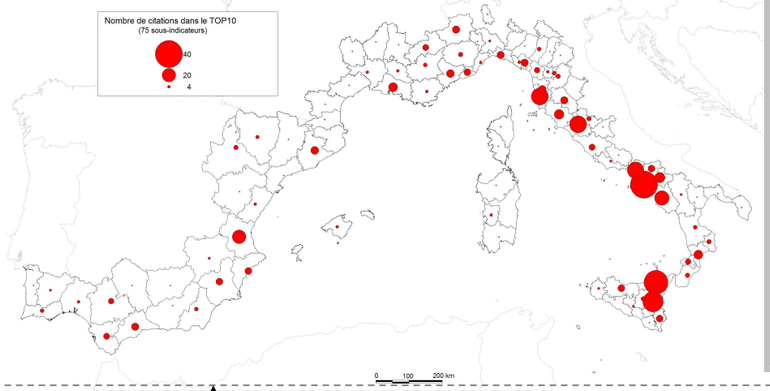
Quantification de 4 familles d'enjeux pour chaque aléa et par unité spatiale NUTS3

Choix de 4 familles d'enjeux



Ex. d'indicateur synthétique multirisque naturel

(Nbr de citations dans le TOPO 10 de 75 sous-indicateurs)



1	Napoli
2	Messina
3	Catania
4	Livorno
5	Viterbo
6	Caserta
7	Salerno
8	Valencia
9	Avellino
10	Grosseto
11	Bouches-du-Rhône
12	Catanzaro
13	Alpes-Maritimes
14	Barcelona
15	Pisa
16	Genova
17	Málaga
18	Massa-Carrara
19	Siena
20	Torino

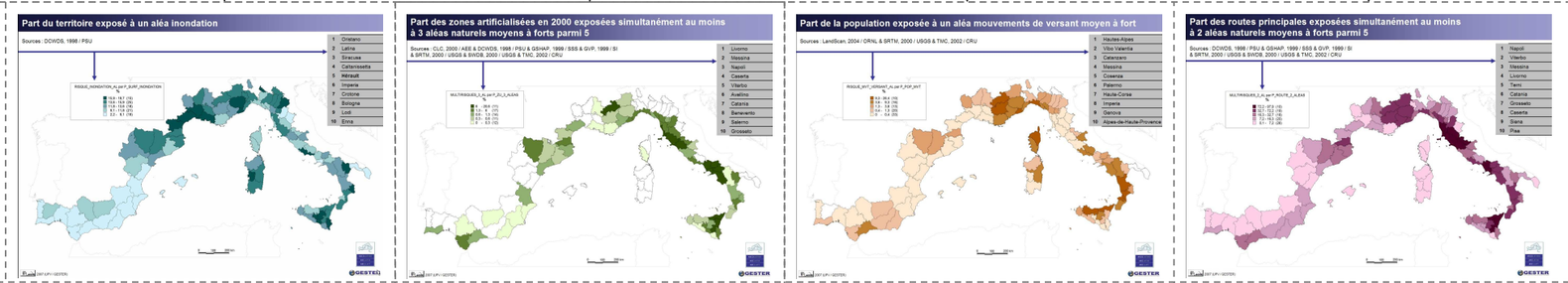
Nombre de citations au TOP10 des indicateurs sélectionnés

Indicateurs de témoignages de dommages (NUTS3)

Indicateurs de fréquence des phénomènes (NUTS3)

Jeu d'indicateurs d'exposition aux aléas

Valeur relative



Valeur absolue

Figure 4.18. Illustration de la chaîne de traitement aboutissant à un indicateur de risques naturels synthétique sur l'Arc latin (collectivités de rang NUTS3) (Leone, inédit).

Indicateurs composites

Les indicateurs peuvent revêtir des formes plus complexes lorsqu'ils intègrent plusieurs variables (critères) représentatives des différentes composantes du risque. Ils sont alors généralement qualifiés de composites et débouchent sur des indices traduisant le niveau de risque. Nous avons vu dans les applications précédentes menées en Martinique que ces indices composites peuvent servir à exprimer le niveau de pertes potentielles et leur traduction économique du moment où les valeurs des enjeux présents sont identifiées. Dans le cas suivant des applications menées sur la Méditerranée, les indicateurs de risque développés sont plus qualitatifs bien que reposant sur des variables quantitatives. Leur but est surtout de pouvoir exprimer sous une forme synthétique un ensemble de conditions pouvant mener à la catastrophe et d'interpeller les décideurs au moyen de cartes de risque établies à l'échelle régionale, voir internationale.

Le premier indicateur composite développé sur la Méditerranée s'applique à des entités territoriales de rang NUTS1 (Nation). Il valorise des jeux de données constitués à cette échelle d'analyse et présente un intérêt plus pédagogique que scientifique. Nommé Indice de Risque Global (**IRG**), cet indicateur s'inspire des travaux menés par D'Ercole et al. (1997) sur la Caraïbe et par Michellier (1999) pour le Monde. Il intègre en particulier les données de la base internationale EM-DAT du CRED (2006) sur les catastrophes naturelles historiques. Il rejoint également sur la forme le travail que nous avons pu réaliser à l'échelle mondiale pour illustrer l'ouvrage de préparation aux concours dirigé par V. Moriniaux (Thouret & Leone, 2003). Comme l'illustre la **figure 4.19**, cet indice est le résultat du produit des fréquences annuelles de catastrophes naturelles (tous aléas confondus) calculée sur 30 ans, par les densités de population (enjeux) et l'inverse de l'Indicateur de Développement Humain (IDH) des pays concernés. Chaque variable est ramenée entre 0 et 1 par division avec la valeur maximale de sa série et ne fait pas l'objet de pondération particulière. L'IRG obtenu s'exprime ainsi entre 0 et 1 (ou 0 et 100) et il s'annule donc si l'une des variables est nulle, conformément à l'expression mathématique du risque.

Dans cette méthode, l'aléa est donc réduit à sa dimension temporelle et sa définition dépend donc de la qualité de la base EM-DAT pour déduire des fréquences d'occurrence. On sait que la constitution de bilans consolidés sur les impacts des aléas naturels, notamment à l'échelle internationale, est rendue difficile à la fois par la rareté de sources fiables, la variabilité des critères de sélection des témoignages de dommages, la diversité des phénomènes impliqués et par conséquent une certaine dispersion des données entre de multiples organismes relevant de disciplines différentes. Néanmoins, la base de données EM-DAT est la plus complète et la plus homogène de toutes, notamment pour les événements postérieurs à 1973. Y sont référencés en particulier les événements dommageables ayant entraîné au moins 10 morts ou 100 sinistrés, ce qui représente près de 7500 témoignages depuis 1900 à l'échelle mondiale. Le traitement de cette source nous permet de tirer un certain nombre d'enseignements sur la répartition géographique, phénoménologique et temporelle des témoignages de dommages (catastrophes) et des victimes (morts) associées. Les fréquences évènementielles qui en sont déduites nous donnent la composante temporelle des aléas établie sur une fenêtre d'observation courte mais fiable (1972-2002) mais qui pose néanmoins le problème de sa représentativité, car elle exclut de fait des événements de forte intensité et à période de retour longue tels que certaines éruptions ou séismes. Aussi, doit-on considérer l'indice de risque global obtenu comme représentatif de l'espérance mathématique de pertes d'un ordre de grandeur comparable à la moyenne de celles enregistrées depuis 30 ans dans les pays concernés.

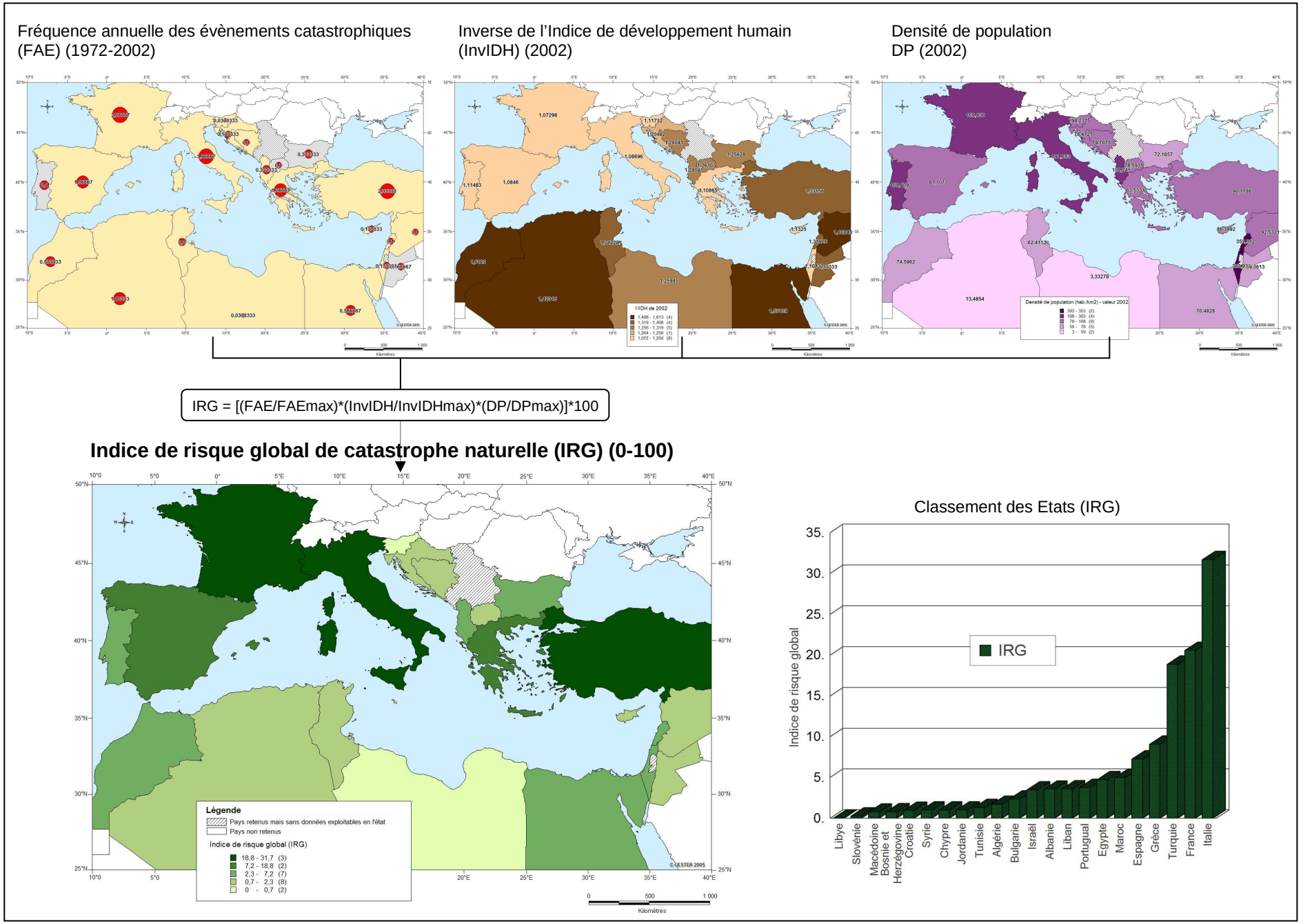


Figure 4.19. Méthode de calcul de l'Indice de Risque Global (IRG) pour les pays proches de la Méditerranée

L'indicateur retenu ici pour la vulnérabilité (IDH) permet d'en synthétiser certains aspects tels que la capacité de réponse face à un événement dommageable (moyens économiques et structurels) ou le niveau d'information des populations (taux d'alphabétisation). Rappelons à ce titre que l'IDH est un indice composite calculé chaque année depuis 1990 par le *Programme des Nations Unies pour le Développement* (PNUD). Il représente le niveau de bien-être atteint en combinant trois facteurs : le niveau de santé (i.e. l'espérance de vie à la naissance), le niveau d'instruction (i.e. le taux d'alphabétisation des adultes et le nombre moyen d'années d'études), et le revenu, c'est-à-dire le PIB par habitant après transformation. D'autres macro-indicateurs complémentaires pourraient également être retenus pour traduire ce degré de vulnérabilité générale aux catastrophes naturelles. Il s'agit notamment du taux de croissance urbaine dont une forte valeur peut traduire un manque d'anticipation et des carences en matière de planification urbaine, d'accueil des populations rurales, de normes de construction, et enfin d'accès aux services de base et de sécurité. Ceci se vérifie surtout dans des pays à IDH bas. Le PIB/habitant peut également être considéré comme un bon critère, mais pas suffisant pour exprimer pauvreté et vulnérabilité, deux situations très dépendantes l'une de l'autre.

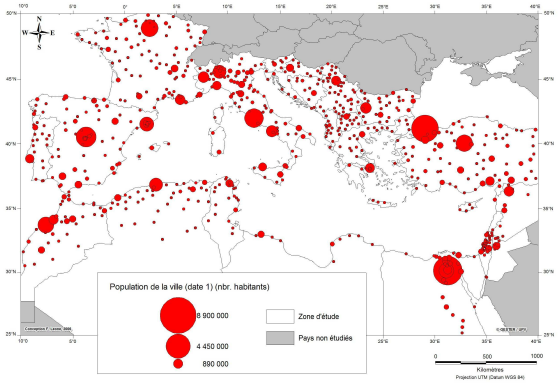
La carte ainsi obtenue montre que trois pays se détachent nettement pour la zone méditerranéenne sur la base de cet indice de risque global : l'Italie, la France et la Turquie avec des valeurs supérieures à 18. Les pays suivants passent sous le seuil de 10. Il s'agit en premier de la Grèce et de l'Espagne. Le premier pays africain est le Maroc, suivi de près par l'Egypte. Cependant, malgré les intérêts méthodologiques et pédagogiques de cette approche, cette carte ne saurait cacher les très fortes disparités infra-nationales imposées par une inégale répartition des densités humaines, des aléas naturels et des conditions de vulnérabilité au sein d'un même pays. Ce changement d'échelle d'analyse impose de recourir à d'autres bases de données utiles à la construction d'autres critères d'évaluation du risque. Les deux applications suivantes opèrent et illustrent ce changement d'échelle avec deux autres indices de risque naturel.

Le second indice développé s'applique aux principales villes du pourtour méditerranéen. Il introduit des critères plus spécifiques au risque sismique, notamment en matière de définition de l'aléa et de caractérisation de la vulnérabilité (urbaine ici). Il s'agit d'un Indice de Risque Sismique (**IRS**) relevant du même principe de construction que le précèdent. Il combine quatre variables obtenues pour 693 agglomérations de plus de 20 000 habitants : le taux annuel moyen de croissance urbaine, l'inverse de l'IDH, la population urbaine au dernier recensement et enfin le niveau d'aléa sismique.

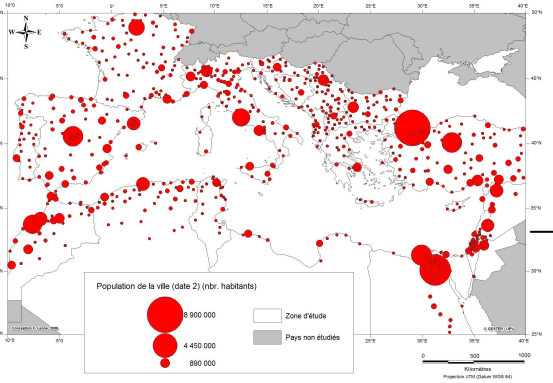
Comme évoqué précédemment, nous constatons bien souvent qu'un taux de croissance urbaine élevé dans un contexte de mal développement, se traduit souvent par des constructions fragiles qui échappent à tout contrôle et des quartiers défavorisés peu préparés aux crises sismiques (Sanderson, nd ; Thouret & D'Ercole, 1996 ; Mitchell, 1999b ; ISDR, 2002 ; Thouret, 2003 ; Tipple, 2005). Les exemples et les études ne manquent pas sur les rives de la Méditerranée en proie à une urbanisation galopante (Moriconi-Ebrard & Dinard, 2000 ; Moriconi-Ebrard, 2001 ; Chaline, 2001 ; Plan Bleu, 2001 ; Attane & Courbage, 2001 ; Benoit et Comeau, 2005). Suivant les villes, ce taux annuel de croissance urbaine a été calculé sur une durée variable, de 10 à 30 ans. Les données de recensement de la population urbaine ont été harmonisées au sein du SIG RINAMED à partir deux sources principales : les bases « *Géopolis* » et « *City Populations* ». *Géopolis* est une base de données géographiques mondiale conçue par le géographe F. Moriconi-Ebrard (2001). Elle répertorie 42 000 agglomérations qui ont atteint au moins 10 000 habitants au cours de leur histoire (www.geo.univ-avignon.fr).

TAC = (((POP2-POP1)/POP1)/(Date2-Date1)))*100

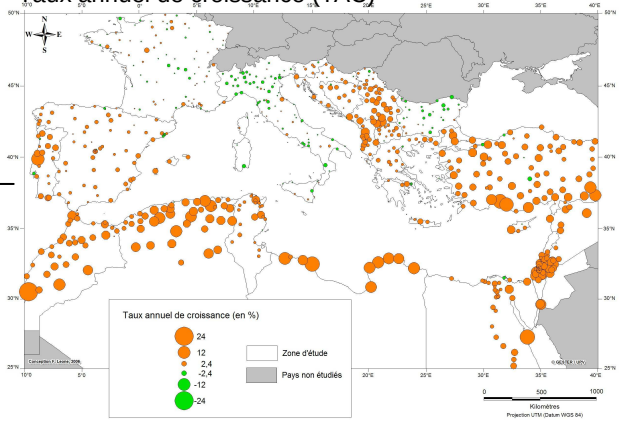
Population urbaine (date 1) (POP1)



Population urbaine (date 2) (POP2)

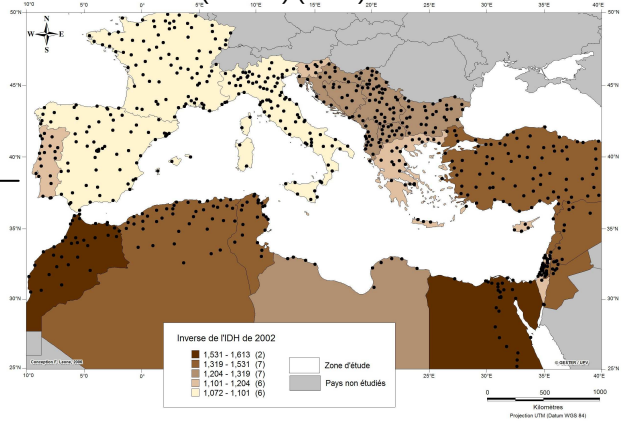


Taux annuel de croissance (TAC)

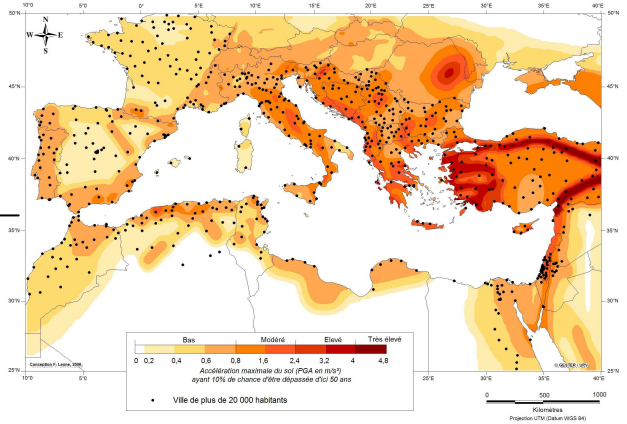


IRS = (POP/POPmax)*(InvIDH/InvIDHmax)*(TAC/TACmax)*(PGA/PGAmax)

Inverse de l'IDH (InvIDH) (2003)



Niveau d'aléa sismique (PGA)



Indice composite de risque sismique des villes de plus de 20 000 habitants (IRS) (0-1)

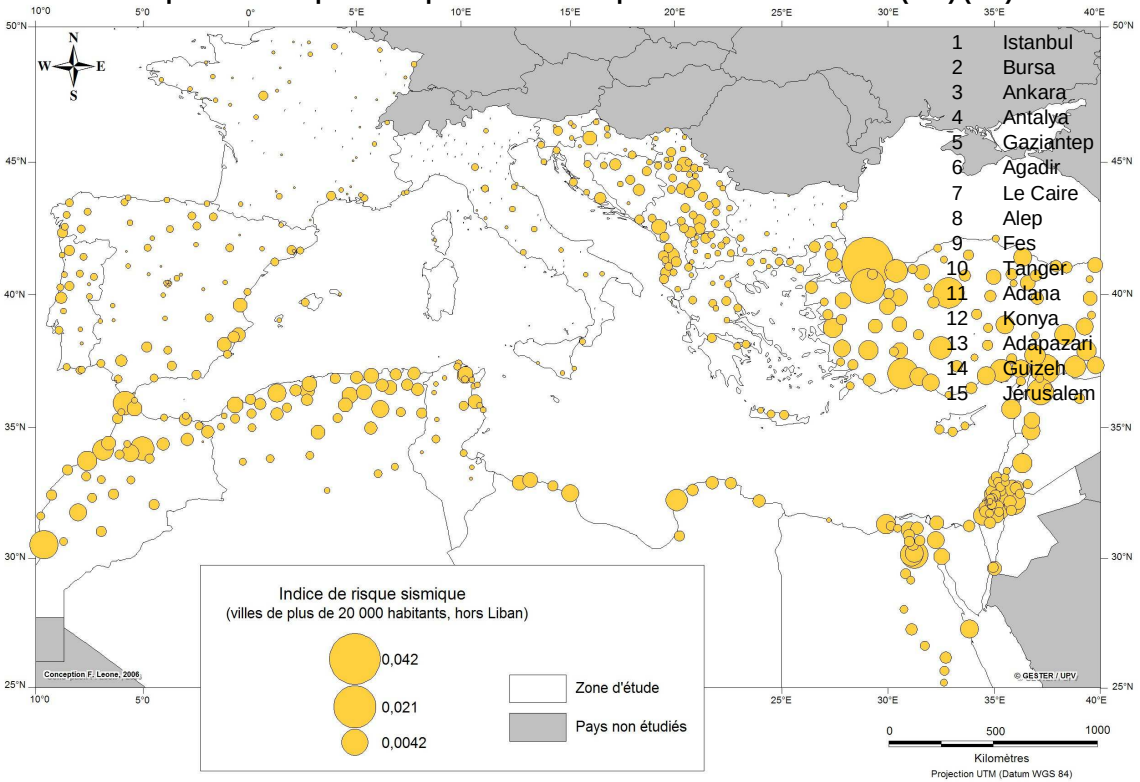


Figure 4.20. Méthode de calcul de l'indice de Risque Sismique (IRS) des villes de plus de 20 000 habitants.

City Populations est une base de données géographiques mondiale conçue par un géomaticien allemand T. Brinkhoff. Elle propose des statistiques et des cartes de population de la majeure partie du monde. Il est également possible de visualiser l'évolution de la population et la densité de population des territoires administratifs (www.citypopulations.de).

Les données sur le niveau d'aléa sismique régional proviennent du *Global Seismic Hazard Assessment Program* (GSHAP, 1999) et sont exprimées en PGA (*Peak Ground Acceleration* en m/s²) ayant 10% de chance d'être dépassés dans les 50 prochaines années. Elles sont adaptées à une évaluation régionale de l'aléa sismique établi selon une approche probabiliste standardisée à l'échelle internationale (http://www.seismo.ethz.ch/GSHAP/).

L'indice obtenu est le produit de ces quatre variables non pondérées (même coefficient) et ramenées entre 0 et 1. Il permet de hiérarchiser les agglomérations méditerranéennes au regard du risque de pertes liées à un futur séisme. La méthode est perfectible mais elle donne des résultats globalement parlants pour qui connaît la situation particulièrement alarmante de villes comme Istambul, Ankara, Le Caire, Agadir ou bien Jerusalem. Le classement obtenu et la carte correspondante (**figure 4.20**.) donnent une vision d'ensemble préoccupante surtout pour les villes du littoral maghrébin, de Turquie et du Machrek, notamment dans l'hypothèse vraisemblable d'une poursuite des taux de croissance urbaine considérés dans cette évaluation. Istambul se détache nettement avec une valeur d'IRS de 0,04 (0,001 pour la seconde ville, Bursa). Les cinq premières villes classées sont turques. Elles sont suivies d'Agadir (0,0056), ville détruite par le séisme de 1960 (12 000 à 15 000 morts) mais qui a connu une croissance exceptionnelle depuis cet évènement, passant de 110 480 à 678 600 habitants en 22 ans (1982-2004) (source City Population).

Le troisième indice développé est le plus fin en matière d'échelle d'évaluation. Construit sur l'ensemble du territoire de l'Arc latin (régions riveraines de la Méditerranée de France, d'Italie, du Portugal et de l'Espagne), il est défini pour une maille géométrique uniforme de 1 km² fixée par la résolution spatiale des données les plus précises utilisées, à savoir la densité de population au km² de la base internationale LandScan (ORNL, 2004). Cet indice intègre 5 aléas naturels majeurs présents sur la zone d'étude (volcanique, sismique, tsunami, instabilités de versant et inondation) et les enjeux humains (nombre de personnes). La chaîne de traitement correspondante est illustrée **figure 4.22,** le résultat cartographique de cet indice multirisque (**IMR**) est illustré pour la région de Naples. Les aléas de référence pris en compte ont été cumulés (**figure 4.14. A**) puis divisés par 5. L'indice correspondant à ces aléas (valeur comprise entre 0 et 1) a ensuite été multiplié par le nombre d'habitants ramené entre 0 et 1 par division avec la valeur maximale de la série correspondante (**figure 4.14. B**). C'est pour l'agglomération de Naples que l'on obtient les valeurs d'IMR les plus élevées de l'Arc latin (0,5) (**figure 4.21**).

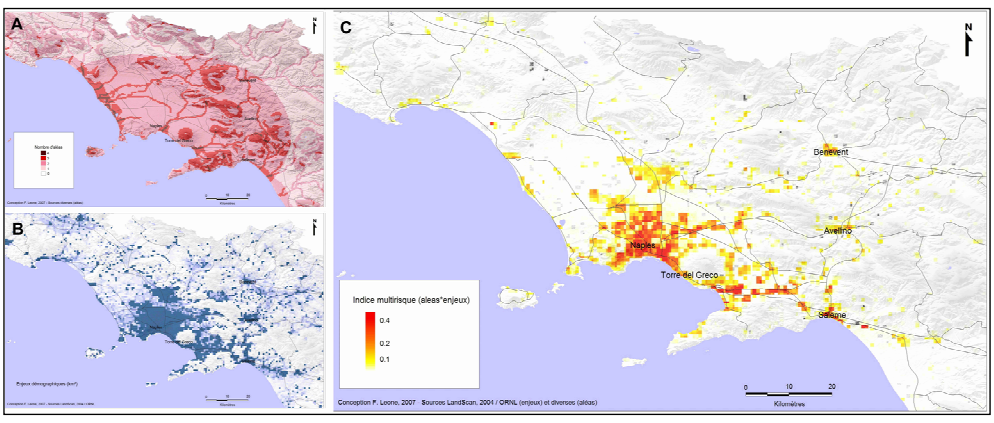
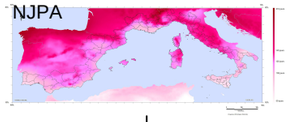


Figure 4.21. Illustration de l'Indice Multirisque (IMR) pour la région de Naples.

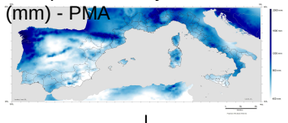
A : indice multi-aléas (volcanique, sismique, tsunami, instabilités de versant et inondation),
B : enjeux démographiques (population au km²),
C : Indice Multirisque (IMR)

Définition de l'aléa instabilité de versant (indice de susceptibilité)

Nombre de jours de pluie / an NJPA



Précipitations moyennes annuelles (mm) - PMA

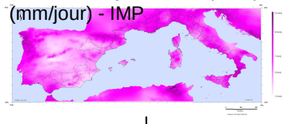


Altitudes en (m) - H

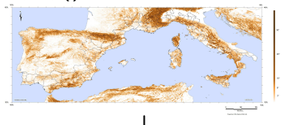
IMP = PMA / NJPA

P°= cotangente H/D

Intensité moyenne des précipitations (mm/jour) - IMP



Pente (°) - P

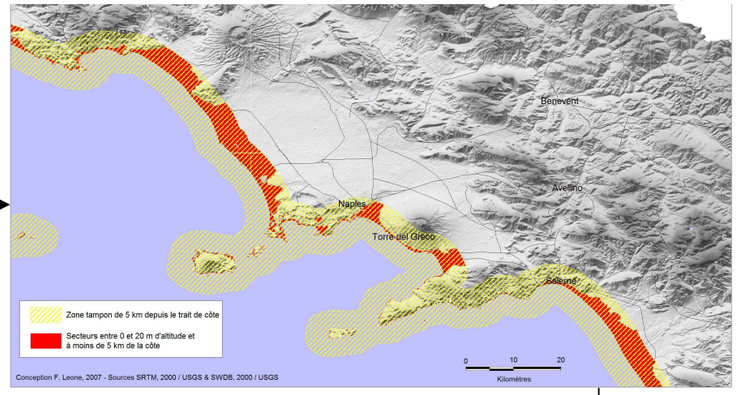


IS = (IMP/IMPmax) * (P/Pmax)

Définition de l'aléa tsunami (zones d'effet)

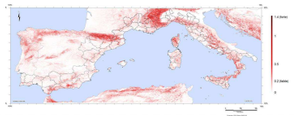
Extraction des zones comprises entre 0 et 20 m d'altitude et situées à moins de 5 km de la côte

Zones exposées aux tsunamis (région de Naples)



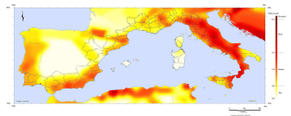
5 aléas majeurs

Instabilités de versant



Inondation

Sismique



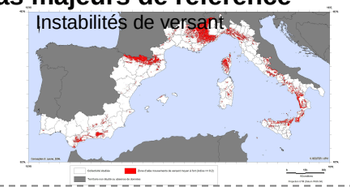
Volcanique

Tsunami

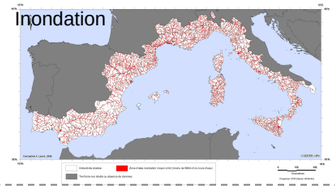
Choix des seuils de référence

5 aléas majeurs de référence

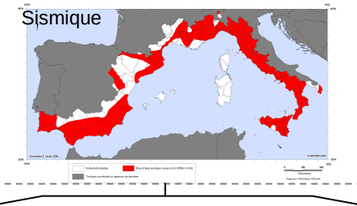
Instabilités de versant



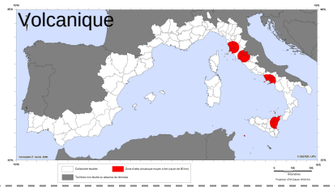
Inondation



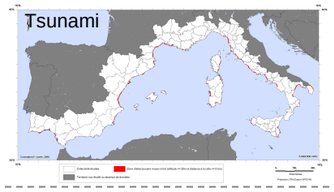
Sismique



Volcanique



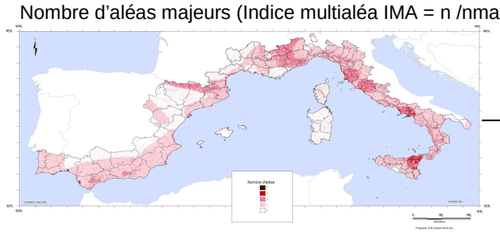
Tsunami

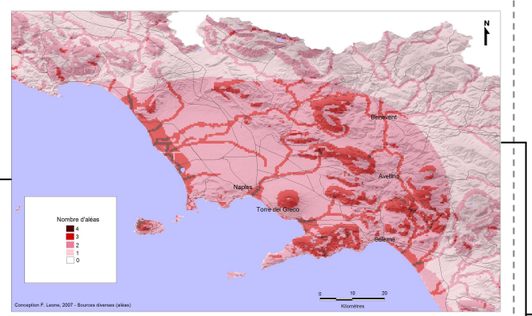


Intégration des 5 aléas majeurs de référence

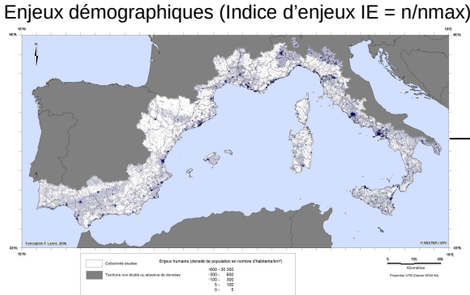
Les composantes du risque

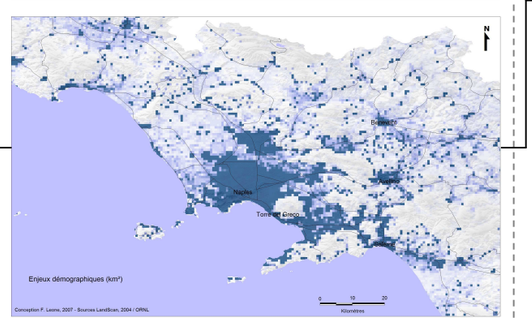
Nombre d'aléas majeurs (Indice multialéa IMA = n /nmax) (0-1)





Enjeux démographiques (Indice d'enjeux IE = n/nmax) (0-1)





IMR = IMA*IE

Calcul de l'indice multirisque (IMR)

Indice multirisque (région de Naples) compris entre 0 et 1

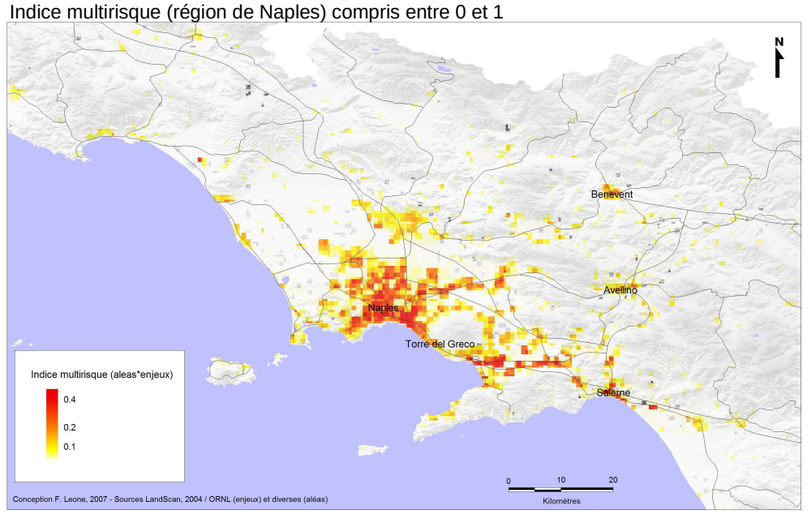


Figure 4.22. Illustration de la chaîne de traitement aboutissant à l'indice Multirisque naturel (IMR) sur la Méditerranée (Leone, inédit).

Nous estimons qu'en deçà de cette échelle d'analyse, le calcul des indices de risque doit se faire à l'échelle de l'élément exposé, autrement dit du quartier ou du bloc d'habitations, voire mieux du bâtiment, en recourant à des fonctions d'endommagement spécifiques pour y intégrer au moins la dimension physique de la vulnérabilité, comme cela a pu être abordé en Martinique.

Ce changement d'échelle introduit donc un changement de méthode qui impose une connaissance très fine de la qualité du bâti (ou d'autres enjeux) et l'accès à des bases de données homogènes sur ces enjeux qui n'existent pas encore à l'échelle internationale. Avec cette dernière application, nous touchons donc aux limites géographiques et méthodologiques d'une évaluation spatialisée multirisque homogène à l'échelle d'une entité territoriale comme l'Arc latin. Le recours à certaines bases de données sur l'occupation comme SPOT Thema (http://www.spotimage.fr), issues de la reconnaissance semi-automatique d'images satellites, devrait pouvoir surmonter en partie ces limites sur la connaissance des enjeux. Cependant de telles données ne sont pas libres d'accès et portent sur quelques territoires seulement, contrairement aux données utilisées dans ce travail.

4.3.4. Perspectives et outils d'appropriation des indicateurs de risque

Les indicateurs développés et leur mise en carte peuvent être considérés comme des outils d'aide au diagnostic géographique des risques. Ce premier jeu d'indicateurs comble une lacune qui était principalement due à la dispersion et à l'hétérogénéité des données pouvant servir à leur mise au point. A l'échelle de l'Arc latin ou de l'ensemble de la Méditerranée les premières cartes obtenues présentent un certain intérêt pour comprendre les logiques spatiales du risque, déterminer les territoires qui partagent des problématiques similaires, et pour porter une information vers les décideurs, en particulier ceux politiques de l'association des collectivités de l'Arc latin.

Se pose maintenant la question de la réactualisation de ces jeux d'indicateurs, pour suivre l'évolution du risque en grande partie liée à la croissance des enjeux sur ce territoire en pleine mutation. Se pose aussi la question de la généralisation de tels indicateurs sur d'autres rives de la Méditerranée, notamment Sud et Est. Les jeux de données servant à leur future construction ne sont pour le moment que partiels, contrairement à ce qui existe sur l'espace euro-méditerranéen qui a fait l'objet de nombreux projets de recherches coordonnées par l'Union européenne et valorisés par l'Agence Européenne de l'Environnement (EEA).

Le projet SIG RINAMED devrait s'enrichir dans ce sens, afin de produire dans un avenir proche des indicateurs spatialisés et diachroniques pour l'ensemble du bassin méditerranéen et à des échelles d'analyses de plus en plus fines. Ces évolutions vont dépendre de notre capacité à intégrer d'autres données et à fédérer d'autres équipes scientifiques autour de ce projet.

En parallèle, un effort de porter à connaissance de ces premiers travaux doit se faire à destination des autorités régionales (membres de l'association de l'Arc latin) et internationales (Union européenne) afin que se dégage un consensus sur le choix des indicateurs les plus pertinents pour l'aide à la décision. Pour assurer ce relais d'information et anticiper la construction des futurs indicateurs, nous développons actuellement une plateforme technique d'acquisition et de partage de ces informations sur la Méditerranée. Elle repose sur un prototype de logiciel de cartographie en ligne (*webmapping*) couplé à un serveur de données, qui offre de multiples fonctionnalités pour favoriser l'interactivité.

Cette application informatique (**figure 4.23.**), appelée « **Atlas Interactif sur les Risques Naturels en Méditerranée** » (Atlas RINAMED, **annexe 17**) est en cours de développement avec l'aide d'un informaticien stagiaire (Refai, 2007). Elle proposera dans un premier temps des modules de gestion des couches d'information, de cartographie statistique, de requêtes spatiales sur les données attributaires et d'exportation des résultats de ces requêtes sous forme de données tabulaires au format Microsoft® Excel (.xls) ou de cartes en format vectoriel pour Adobe® Acrobat® (.pdf). Dans un second temps, l'outil comportera un module d'acquisition de données distantes alimenté par des partenaires scientifiques identifiés au sein d'un réseau scientifique en cours de constitution autour de la Méditerranée. Ces modules seront accessibles différemment suivant la nature de l'utilisateur : totale côte administrateur, partielle côté client.

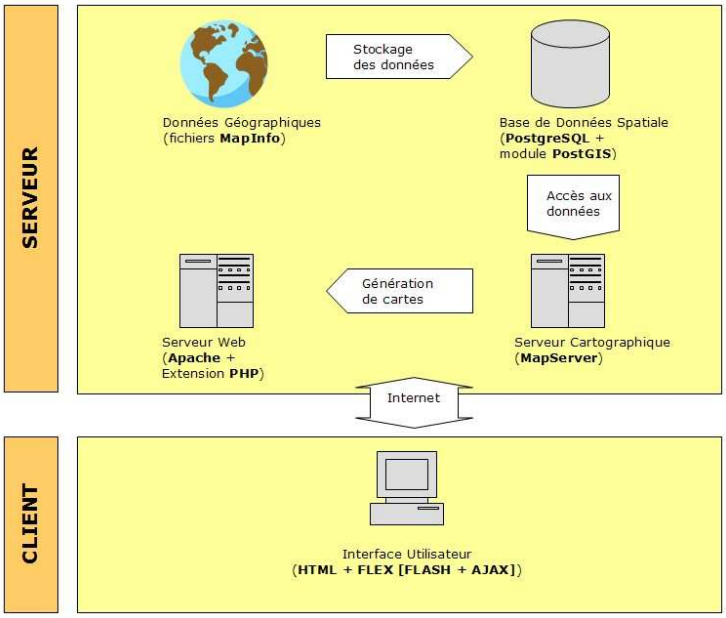


Figure 4.23. Schéma directeur de l'application informatique « Atlas Interactif sur les Risques Naturels en Méditerranée » (d'après Refai, 2007).

La technologie employée repose sur la solution de développement FLEX créée par Macromedia en 2004 puis reprise par Adobe en 2006 avec le logiciel de création Adobe® Flex™ 2 qui offre un environnement basé sur Adobe Flash®. Elle permet de créer et de déployer des applications Internet riches (RIA) multi plates-formes. Adobe® Flex™ 2 comprend un puissant outil de développement basé sur Eclipse™, une bibliothèque étendue de composants graphiques et de services de données. Ce logiciel est doté de son propre langage qui est le MXML, un dérivé de XML. Il s'agit d'un langage orienté objets, où chaque objet est défini dans une balise avec ses paramètres.

L'interface graphique de l'outil est constituée d'un ensemble de composants, dont chacun peut être à son tour composé d'autres composants élémentaires. Il s'agit (*cf.* **annexe 18**) :

– d'une **barre générale de l'application** : cette barre contient le logo du laboratoire avec un lien hypertexte vers le site du labo, le nom de l'application, les informations de connexion, la date.

– la **barre d'outils** : elle contient les boutons permettant de manipuler la carte (zoom, déplacement, sélection de la zone d'étude, recherche, impression).

– **l'espace de travail** : ce composant occupe presque la totalité de la surface de l'application. Il contient la carte qui sera étendue sur tout l'espace de travail. D'autres composants seront ajoutés sur le premier plan de l'application.

– le **panneau d'options** : ce panneau contient des sous-panneaux, dont chacun est réservé à une fonctionnalité. Quatre panneaux sont prévus : (1) pour la gestion de la visibilité des couches, (2) pour l'analyse thématique qui contient tout les objets permettant le paramétrage de cette analyse (par symbole et par couleurs) (**figure 4.24**), (3) pour l'écriture et l'exécution de requêtes, (4) pour l'exportation des données.

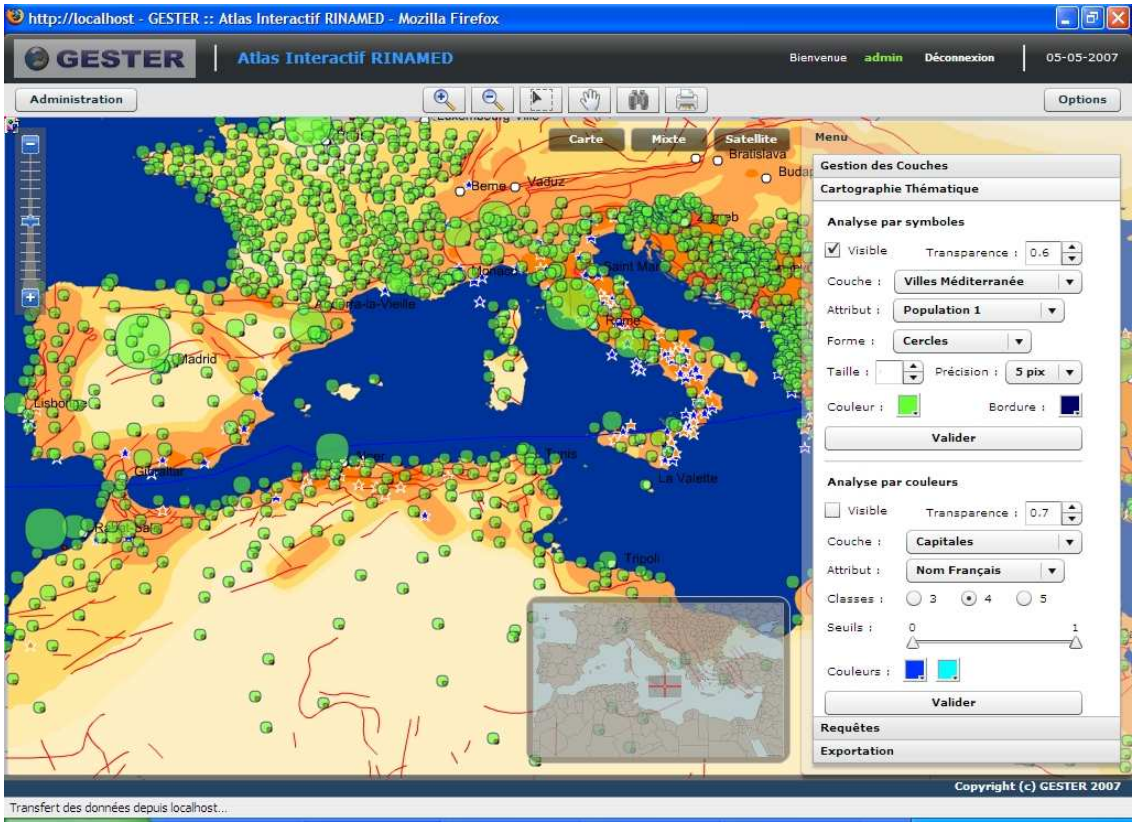


Figure 4.24. Capture d'écran de l'interface Web du futur Atlas interactif sur les risques naturels en Méditerranée (Atlas RINAMED). Menu de cartographie statistique.

Cette application de cartographie en ligne « *Open Source* » représente un défi pour tout organisme possédant des données cartographiques et statistiques destinées à la publication en ligne, car elle implique une remise en question des concepts dynamiques, voire l'accès en temps réel aux données du SIG ainsi que la possibilité de mise à jour de l'application d'une manière transparente. Pour pouvoir éviter ces problèmes, nous avons choisi tout d'abord d'extraire les données cartographiques et statistiques du SIG et de les stocker dans une base de données spatiale PostGIS, ensuite de créer une application client-serveur permettant d'interroger les données de notre base, et qui fonctionne sur un navigateur web. Cette solution peut être bénéfique dans la mesure où nous aurons besoin de mettre à jour les données de la base, ou bien l'interface utilisateur.

Ce travail de valorisation des produits de notre recherche représente un point de départ pour d'autres projets de cartographie en ligne sur les risques naturels. Il s'agit en premier lieu de l'atlas en ligne des risques au Sénégal, projet qui devrait démarrer en 2008.

4.4. Conclusion

Nous venons de voir que la cartographie des risques, travail de synthèse et d'évaluation des risques par excellence, peut revêtir différentes formes, toutes utiles à l'analyse géographique et à la prise de décision. Elle peut s'exprimer par une simple localisation des éléments du territoire et des menaces, par une quantification des enjeux exposés, ou sous une forme encore plus synthétique au moyen d'indices composites qui intègrent les valeurs des éléments exposés et leur degré d'endommagement potentiel. Cette approche synthétique et spatialisée du risque facilitée par l'introduction d'indicateurs devrait connaître des évolutions importantes dans un futur proche. Elle répond à une demande institutionnelle de plus en plus pressante pour alimenter les nombreux observatoires du risque en gestation.

D'un point de vue technique, la précision de ces cartes est très dépendante de l'information géographique disponible et des outils de l'analyse spatiale. Nous avons vu que certaines limitations apparaissent en fonction des échelles de l'évaluation. En théorie, l'évaluation à l'échelle de l'élément physique exposé (le bâtiment par exemple) permet d'accéder par agrégations successives aux échelles d'évaluation supérieures. Mais cette analyse nous renvoie au terrain et à la nécessité de mener des diagnostics fins, élément par élément, procédure difficilement envisageable lorsqu'on travaille sur un bassin de risque comme la Méditerranée.

On est donc contraint d'intégrer des informations simplifiées qui se préciseront avec l'évolution des bases de données internationales sur les aléas et les enjeux. La question des indicateurs de vulnérabilité n'en est pas pour autant résolue à cette échelle d'analyse régionale. De fait, leur prise en compte est encore rare dans l'évaluation cartographique du risque à petite échelle. Un moyen d'y parvenir serait de construire par exemple des fonctions de vulnérabilité urbaines qui expriment des pourcentages de dommages par niveau d'aléa global et par type de structures urbaines.

Partant de cette information géographique structurée qu'est par exemple SIG RINAMED, partant des développements méthodologiques propres à l'évaluation quantitative du risque développés en troisième partie de ce mémoire, et en s'appuyant sur les exemples d'indicateurs inédits proposés dans cette dernière partie, nous espérons avoir contribué à fournir des supports, des méthodes et les exemples d'une évaluation géographique de multiples risques d'origine naturelle.

CONCLUSION

BILAN ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Au terme de ces premières années de recherches nous pensons avoir apporté une contribution significative à la géographie des risques d'origine naturelle qui justifie notre demande d'habilitation à diriger des recherches.

Cette recherche s'est faite à travers le prisme des vulnérabilités, champ d'investigation relativement nouveau en France et qui peut se décliner sous différentes approches. Il a été pleinement introduit par le colloque international de Clermont-Ferrand de décembre 1994[1], organisé par Jean-Claude Thouret et Robert D'Ercole, deux géographes français dont les profils scientifiques témoignent du caractère indissociable du traitement de la vulnérabilité et des aléas dans l'évaluation, la gestion et la recherche sur les risques. Ce colloque était pour nous l'occasion de participer pour la toute première fois à un atelier scientifique sur les vulnérabilités et d'exposer notre projet de thèse de doctorat sur le concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain (Leone, 1996).

Cette thèse, soutenue en janvier 1996 à l'Institut de Géographie Alpine de Grenoble, co-encadrée et financée par le service géologique national (BRGM, Marseille), apportait un éclairage méthodologique sur la mesure de l'endommagement en tant qu'indicateur de vulnérabilité, et sur sa prise en compte dans la simulation des pertes potentielles associées à ces phénomènes complexes et variés que sont les mouvements de terrain. Pour la seconde fois en France, après la thèse de Robert D'Ercole (1991) qui développait une approche plus sociale de la vulnérabilité des populations face aux lahars du volcan Cotopaxi, une thèse de géographie introduisait explicitement, conceptualisait et développait cette notion, sans s'éloigner de la caractérisation de l'aléa et en restant dans une perspective de géographie appliquée.

Depuis, nos recherches et nos enseignements sur ce thème se sont poursuivis, en lui donnant une dimension encore plus géographique et transversale. Convaincus de l'apport important du géographe pour traiter des vulnérabilités et définitivement sortir d'une vision segmentée du risque qui prévalait jusque là, nous avons diversifié nos approches, nos expériences de terrain, nos territoires d'étude et les natures des risques ou des catastrophes étudiés.

Impliqué dans l'enseignement des risques, la formation initiale du géographe nous est apparue particulièrement appropriée pour mener des recherches appliquées sur les risques naturels. Cela tient en grande partie aux compétences suivantes, qui ne sont pas toutes acquises dans les autres grandes disciplines universitaires susceptibles de former des chercheurs ou des praticiens du risque (histoire, sociologie, sciences de la terre, urbanisme, ingénierie, droit) :

---

[1] *« Croissance urbaine et risques naturels dans les pays en développement », 2 et 3 décembre 1994.*

– la connaissance des aléas naturels ;
– la maîtrise des enjeux (territoriaux, humains, socio-démographiques, socio-culturels) ;
– la connaissance des outils et des pratiques de l'aménagement du territoire ;
– le diagnostic des territoires ;
– l'intérêt pour la spatialisation des processus humains et physiques ;
– l'intérêt pour la démarche historique et l'analyse diachronique ;
– la maîtrise de la technique cartographique et de l'analyse spatiale (sémiologie, SIG, télédétection, modélisation) ;
– la pratique du terrain ;
– l'approche naturaliste et l'observation ;

Autant d'aspects qui relèvent encore de l'enseignement général de la géographie française et qui prédisposent le géographe à travailler en étroite collaboration avec des chercheurs d'autres disciplines. La géographie a pu opérer à la faveur de la recherche sur les risques naturels un décloisonnement interne bénéfique et plein d'espoir, entre volet humain et volet physique. Cependant le géographe ne doit pas se déconnecter d'un bon apprentissage des méthodes, des techniques et du terrain en matière de caractérisation des aléas et donc des milieux physiques. C'est le gage de sa crédibilité et la garantie de son intégration au sein de projets de recherche sur les risques naturels encore très souvent pilotés par des représentants des sciences dures, très exigeants sur la rigueur des méthodes et moins attachés aux discours.

L'enseignement de la géographie de l'environnement et des risques dispense encore ce qui fait de plus en plus défaut aux sciences exactes : une approche naturaliste basée sur des investigations de terrain fines et des restitutions cartographiques de qualité bien maîtrisées d'un point de vue technique et sémiologique. Mais l'entretien de ces acquis, dont l'apport n'est plus à démontrer en France dans l'élaboration des plans de prévention des risques (PPR) ou des plans communaux de sauvegarde (PCS), ne pourra se faire qu'au prix du maintien du géographe sur son territoire d'étude, pendant sa formation et durant sa profession.

L'autre grande qualité que l'on doit encore reconnaître au géographe est sa capacité d'intégration de multiples connaissances, si importante pour l'analyse des risques et de plus en plus recherchée dans le monde de l'opérationnel. Autrement dit, les cindyniques et la géographie étaient faites pour se rencontrer et s'alimenter mutuellement. On ne peut que féliciter l'émergence de cette nouvelle problématique de recherche appliquée qu'est la géographie des risques et dont nous nous efforcerons de rester un fidèle représentant, via nos enseignements et via la recherche.

Cette recherche, nous l'avons axée sur les différentes formes de vulnérabilités et leurs caractérisations au moyen de contributions méthodologiques variées. Pour cela, nous avons dû puiser dans d'autres disciplines, parfois innover, en se basant toujours sur une importante analyse bibliographique. Une attention particulière a toujours été accordée aux espaces des vulnérabilités et à la production cartographique. La quasi-totalité des cartes produites dans ce mémoire a été confectionnée par nos soins à partir de SIG. C'est aussi à travers cet exercice de synthèse cartographique en laboratoire, de données recueillies sur des territoires parfois très éloignés et difficiles, que s'est aussi exprimée la passion d'être géographe, en continuant à vivre à distance son terrain et d'en souligner ses traits, parfois ses stigmates.

A travers les retours d'expérience, menés principalement dans les Alpes, au Maroc, aux Antilles, en Equateur, aux Philippines et en Indonésie, la vulnérabilité a été analysée rétrospectivement à travers son principal indicateur qu'est le niveau d'endommagement et de

dysfonctionnement des systèmes éprouvés (infrastructures, réseaux, sociétés, territoires).

Par le biais de diagnostics de risques, menés en Martinique et aux Philippines (Pinatubo et prochainement Kanlaon), la vulnérabilité humaine a été appréhendée *a priori* à partir de l'analyse de certains de ses facteurs psycho-sociologiques mesurés au moyen d'enquêtes et d'entretiens. A travers d'autres diagnostics, couplés aux précédents (Martinique) ou conduits sur d'autres territoires (Méditerranée et Arc latin), la vulnérabilité territoriale a été évaluée au moyen d'indicateurs spatialisés.

A travers une réflexion méthodologique sur les scénarios de risques (application en Martinique), alimentée par différentes analyses de cas (constats d'endommagement), la vulnérabilité physique a été appréhendée sous une forme synthétique en tant que niveau d'endommagement potentiel pouvant être décrit par des courbes et des matrices d'endommagement.

Selon ces différentes approches, plusieurs types de vulnérabilités ont donc été analysés, suivant la nature des éléments et des systèmes exposés : humaine aux Antilles et aux Philippines, territoriale en Martinique et en Méditerranée, technique (infrastructures) et fonctionnelle (réseaux) dans les Alpes (Diois), en Equateur et au Maroc. D'autres formes de vulnérabilité, en particulier institutionnelle et organisationnelle face aux crises ont été évoquées (Antilles, Philippines) mais sont peu développées dans ce mémoire. Elles ont néanmoins fait l'objet de recherches à part entière et ont été publiées (Leone & Gaillard, 1999 ; Sarant et al., 2003 ; Cornet et al., 2004). Elles sont présentées dans le parcours professionnel (*cf.* travaux au Maroc, aux Philippines et aux Antilles) (**volume 1**).

Ces différentes formes de vulnérabilité analysées ont donc concerné différents territoires et contextes sociétaux, avant ou après des catastrophes. Les phénomènes naturels impliqués dans ces catastrophes où à l'origine des situations de risque diagnostiquées ont été tout aussi variés : séismes, tsunami, cyclone, mouvements de terrain, éruption volcaniques. Une attention particulière a été accordée aux tsunamis et aux mouvements de terrain, notamment en matière de constats d'endommagement et de modélisation prédictive des pertes en s'inspirant des protocoles méthodologiques développés par d'autres auteurs pour les scénarios sismiques.
Pour cela, ces aléas ont été reconsidérés et comparés au regard de leurs processus d'endommagement et de leurs critères de magnitude. Cela a conduit à proposer de nouvelles échelles de magnitude et d'intensité des dommages (mouvements de terrain, tsunami) plus adaptées à une mesure locale et spatialisée du risque.

Les facteurs de vulnérabilité pris en compte ont été multiples, en fonction des éléments vulnérables étudiés : facteurs techniques du bâti et des réseaux (face aux séismes, aux tsunamis et aux mouvements de terrain, facteurs géographiques (insularité, distance au danger, mobilité, exposition), facteurs psychosociologiques (mémoire collective, représentations du risque, comportements potentiels), facteurs organisationnels et institutionnels (préparation aux crises, gestion des crises passées, reconstruction et résilience territoriale). Autant de facteurs qui ont été qualifiés, ou quantifiés au moyen d'indicateurs, et intégrés dans nos évaluations.

Ces évaluations ont souvent débouché sur des cartes, de manière à comprendre les logiques spatiales du dommage, pour reconstituer un évènement ou pour faciliter la gestion territoriale du risque. Les échelles d'analyse et de représentation cartographique ont été variées : celle du bâtiment et de ses occupants au Maroc (séisme), en Indonésie (tsunami) et aux Antilles (cyclone), celle du tronçon routier dans les Alpes (mouvements de terrain), celle de la commune en Martinique ou aux Philippines, celle de l'agglomération en Indonésie et en

Martinique, celle de la province (NUTS3) ou de l'Etat en Méditerranée, celle du bassin de risque avec la Méditerranée et l'Arc latin.

Pour toutes ces raisons, qui tiennent à la fois à la diversité des formes et facteurs de vulnérabilité étudiés, à la variabilité des échelles spatiales des analyses, à la nature des phénomènes impliqués et à la chronologie des étapes de l'expertise (avant, pendant et après des crises), nous estimons avoir contribué à une évaluation intégrée et spatialisée des risques générés par multiples aléas naturels. Cette contribution s'insère pleinement dans le champ de recherche de la géographie des risques et de ses prolongements opérationnels en matière d'aménagement du territoire et de gestion de crise.

Ces prolongements d'une recherche avant tout appliquée prennent la forme de documents utiles à la décision, de nature essentiellement cartographique : cartes d'indicateurs multi-risques (Martinique, Méditerranée), cartes d'exposition aux menaces (Martinique, Arc latin), carte de vulnérabilité intégrée des populations (Philippines), proposition de zonage réglementaire du risque volcanique (Martinique), Atlas des risques et des catastrophes en ligne (Méditerranée), cartographie des dommages (Equateur, Indonésie, Alpes, Maroc), résultats d'enquêtes sur les représentations des risques et le vécu des catastrophes. Des documents qui sont généralement assortis de nombreuses recommandations utiles à la prévention des risques d'une manière générale, et à la sauvegarde des vies humaines en particulier.

Ce mémoire et le recueil des publications donnent une vision assez synthétique et ordonnée des principaux fruits théoriques et appliqués de notre recherche. Mis à part nos contributions générales sur la géographie des risques de différents territoires (Antilles, Philippines, Méditerranée), d'autres apports significatifs concernent des contributions méthodologiques, parfois nouvelles. Ces dernières nous semblent importantes pour faire progresser la discipline et le transfert d'expérience. Elles sont classées dans le **tableau C.1.** par grand thèmes (conformes aux parties de ce mémoire et au classement des publications) et par nature d'aléas naturels. Certaines contributions méthodologiques prennent l'allure de résultats à part entière, du moment où elles participent à la chaîne d'évaluation du risque. C'est notamment le cas des matrices et des courbes d'endommagement, qui sont à la fois des méthodes de structuration des données et à la fois des résultats synthétiques recherchés par d'autres chercheurs pour alimenter leurs modèles. Il en va de même avec les échelles de magnitude et d'intensité.

A l'issue de ce bilan, plusieurs pistes de recherche se dessinent dans la continuité de nos travaux. Leur développement va bien entendu dépendre des opportunités de financement et de partenariat qu'elles supposent. La première concerne l'élaboration de matrices d'endommagement volcaniques. Une analyse détaillée des différents retours d'expérience menés sur des éruptions, couplée à de nouveaux constats d'endommagement post-volcaniques, devrait permettre de compléter progressivement des matrices de correspondance magnitude/dommages nécessaires aux scénarios de pertes. La réflexion internationale est encore faible sur ce plan, mais quelques projets de recherche, tel MIA-VITA (*cf.* plus loin) devraient favoriser ces problématiques. Sur le même thème, les protocoles méthodologiques et les typologies développés sur le tsunami de l'Océan Indien pourront être réemployés à la faveur de futurs retours d'expérience. L'accumulation organisée de données sur les dommages post-tsunami permettra d'affiner les courbes d'endommagement ébauchées sur Banda Aceh. Une fois validées, ces courbes viendront alimenter de futurs scénarios de pertes, notamment sur les Outres mers français, très exposés aux tsunamis (Mayotte, Réunion, Antilles, Pacifique). Quelques projets se profilent dans ce sens.

Tableau C.1. Résumé des principales contributions méthodologiques issues de nos recherches.
Rq. Les thèmes ci-dessous sont introduits dans le recueil des publications (volume 3 de l'HDR) avec les références bibliographiques qui s'y rapportent

Aléas ▼	THEME 2 Retours d'expériences cat. nat.	THEME 3 Diagnostics de vulnérabilité humaine	THEME 4 Scénarios et indicateurs de risque multi-scalaires	THEME 5 Prévention des risques
Sismique	Création d'un questionnaire d'enquête post-sismique pour les personnes se trouvant dans un bâtiment au moment des secousses **→ Ce questionnaire a été mis au point et validé en Martinique suite au séisme du 8 juin 1999. Il a été utilisé par la suite au Salvador, en Algérie, au Maroc et en Guadeloupe à l'occasion de séismes meurtriers et par différents collaborateurs. Une partie de ce questionnaire est réservée au diagnostic de vulnérabilité des populations en axant les questions sur la mémoire individuelle, la connaissance des moyens de prévention et la perception du danger**			
Tsunami	Elaboration d'une méthodologie d'analyse spatiale des dommages basée sur des typologies du bâti et des dommages physiques associés. Proposition d'une échelle d'intensité « macro-tsunamique » **→ Cette méthodologie a été mise au point à Banda Aceh (Indonésie) suite au tsunami du 26 décembre 2004.**		Elaboration de courbes d'endommagement du bâti en cas de tsunami. Application à la simulation des dommages **→ Ces courbes et les fonctions qui les décrivent ont été construites à partir de l'analyse statistique des dommages sur le bâti suite au tsunami du 26 décembre 2004.**	
Volcanique		Création d'un questionnaire de diagnostic de vulnérabilité humaine face aux éruptions volcaniques (perception, comportements, mémoire, représentations, attentes, connaissances) **→ Ce questionnaire a été mis au point à partir d'une première version proposée par R. D'Ercole. Il a été utilisé en Martinique, en Guadeloupe, à la Réunion et à Naples sous des versions légèrement différentes les unes des autres. Certains aspects se retrouvent également dans le questionnaire mis au point avec J.C. Gaillard pour le Pinatubo (Philippines)**		Elaboration d'une méthodologie de zonage réglementaire du risque volcanique et de contenu de règlement **→ Cette réflexion a été menée en Martinique dans le cadre d'un projet de PPR volcan autour de la Montagne Pelée**
Mouvements de terrain			Proposition d'une nouvelle typologie des mouvements de terrain basée sur les processus d'endommagement associés. Elaboration d'échelles de magnitude et d'endommagement. Mise au point de matrices d'endommagement multi-enjeux permettant d'intégrer la vulnérabilité dans le calcul d'indices de risque **→ Ces méthodes de formalisation analytique du risque mouvements de terrain sont basées sur plusieurs retours d'expérience menés dans les pré-Alpes et en Equateur**	
Cyclonique	Mise au point (travail d'équipe) d'une méthodologie de retour d'expérience (REX interactive) basée en particulier sur des questionnaires d'évaluation des comportements des populations et de représentation du risque cyclonique **→ Les questionnaires d'évaluation des comportements durant le cyclone et de diagnostic de la vulnérabilité humaine face aux cyclones en général ont été élaborés pour la Martinique et la Guadeloupe suite au cyclone Lenny de novembre 1999**			
Multi-aléa			Mise au point d'indicateurs spatialisés sur les risques naturels à partir de l'analyse spatiale de données géoréférencées **→ Ce jeu d'indicateurs a été proposé pour les régions NUTS3 de l'Arc latin en Méditerranée occidentale** **→ D'autres types d'indicateurs ont été proposés et cartographiés pour les risques mouvements de terrain, sismique et volcanique à la Martinique**	Elaboration d'un logiciel de cartographie interactive en ligne (*webmapping*) **→ Cet outil, en cours de développement avec l'aide d'un informaticien, valorisera dans un premier temps les données du SIG RINAMED sous la forme d'un atlas permanent en ligne (catastrophes et risques naturels en Méditerranée).**

En parallèle de futurs retours d'expérience, les diagnostics de vulnérabilité pourront s'étoffer sur d'autres volcans et d'autres sites à risque, en accordant une attention particulière aux populations. Les différents questionnaires mis au point pour les séismes, les cyclones et les éruptions, pourront être transposés sur d'autres sites et d'autres évènements afin de mieux comprendre les déterminants humains du risque et se livrer à des comparaisons enrichissantes pour la discipline. Là encore, quelques projets en phase de démarrage devraient favoriser ces recherches sur des volcans des Philippines, d'Indonésie et d'Afrique (projet MIA-VITA notamment).

L'autre problématique de recherche qui nous tient à cœur est celle des indicateurs géographiques du risque. Elle implique certes une dimension technique et cartographique passant par la constitution de bases de données et de systèmes d'information géographique, ce qui n'est pas pour nous déplaire, mais pas seulement. Ce travail doit aussi se baser sur l'identification de la demande en indicateurs, sur la pertinence de ces indicateurs au regard des décisions à prendre, sur la disponibilité des données servant à leur construction, sur les moyens d'appropriation de ces indicateurs par ceux qui peuvent en avoir l'utilité, sur les échelles d'analyse et de prise de décision à privilégier. Bref il s'agit bien de mener en amont une réflexion avant tout géographique sur l'utilité de tels indicateurs pour une meilleure gestion de nos territoires au regard des risques encourus. Une forte demande locale en matière d'indicateurs de risque et de suivi du développement durable est en train d'émerger en région Languedoc-Roussillon au sein d'un Observatoire des Risques. Nous venons d'intégrer son comité de pilotage et nous nous préparons à mener une réflexion de fond sur la construction de futurs indicateurs de mesure des risques et d'évaluation des politiques de leur gestion.

Sans présager de l'avenir, il paraît évident que nos sociétés sécuritaires accorderont un intérêt toujours grandissant pour la gestion des risques et la sauvegarde des vies humaines face aux aléas de la nature. Nos recherches ont concerné surtout des pays en développement, où se conjuguent ces aléas et des conditions de vulnérabilité exacerbées par la pauvreté, la corruption, les inégalités sociales, l'absence de régulation territoriale, l'incurie politique … Ces racines profondes et quotidiennes de la vulnérabilité, peuvent être compensées au niveau local par l'éducation aux risques, par l'appropriation du territoire et de ses dangers, par le réveil des consciences, par des comportements adaptés pour surmonter les crises. Aussi, nos recherches immédiates vont se poursuivre auprès de ces communautés principalement, pour alimenter les décideurs et les populations locales en outils d'aide à la gestion des crises et des risques.

Deux projets de recherche se dessinent dans cette optique. Le premier (MIA-VITA), regroupant un consortium de 15 organismes dirigé par le BRGM, vient d'être financé par l'Union Européenne dans le cadre du 7ème Programme Cadre de Recherche Technologique (PCRDT). Il va concerner l'évaluation et la gestion intégrées du risque volcanique sur trois volcans (Mérapi en Indonésie, Kanlaon aux Philippines et Mont Cameroun). En partenariat avec d'autres géographes spécialistes de ces pays et en aval des analyses d'aléa des volcanologues, nous aurons la charge de mener de front plusieurs diagnostics de vulnérabilité humaine et institutionnelle, en particulier sur le Kanlaon sous notre co-responsabilité, avec J.C. Gaillard de l'Université de Grenoble 1. En parallèle, nous allons participer à effort de réflexion méthodologique sur les matrices et courbes d'endommagement volcaniques qui viendront alimenter les futurs outils de modélisation des impacts d'éruptions développés antérieurement par le BRGM pour les séismes (ARMAGEDOM).

Le second projet, coordonné par Fanck Lavigne (Université Paris 1) est en phase de reformulation. Il s'agit d'une évaluation intégrée du risque tsunami sur les côtes de plusieurs

îles de l'Océan indien (Mayotte, Comores, Réunion). Après une première tentative de soumission auprès de l'Agence Nationale de la Recherche française (Programme Catastrophes Telluriques et Tsunamis 2006), ce projet s'apprête à être de nouveau présenté. Nous aurons la charge d'y développer des scénarios d'endommagement et de dysfonctionnement tsunami basés sur des SIG et valorisant les travaux menés par l'équipe du programme « Tsunarisque » sur l'Indonésie, et en particulier les fonctions d'endommagement issues de nos propres analyses.

Deux autres projets se profilent, plutôt sous forme de contrats de recherches et avec une dimension encore plus appliquée. Le premier, pour lequel nous attendons la réponse, concerne la réalisation d'un atlas des risques au Sénégal basé notamment sur la construction de jeux d'indicateurs. Le second, en partenariat avec l'Université des sciences d'El Jadida au Maroc, vise à développer des diagnostics de risque sur le littoral nord atlantique marocain sous l'effet des changements climatiques et des actions anthropiques, et en vue d'une gestion intégrée.

En parallèle de ces actions internationales, nous allons poursuivre le développement du Système d'Information Géographique sur les Risques Naturels en Méditerranée, afin de favoriser la construction d'indicateurs de risque à des échelles plus fines et sur les rives orientales et méridionales de la Méditerranée. Ce projet de longue haleine, qui nécessite une mise à jour régulière des bases de données, va s'accompagner de développements informatiques visant à mieux enrichir, diffuser et partager son contenu. Il va prendre la forme d'une plateforme technique, scientifique et éducative dédiée à la géographie des risques naturels en Méditerranée et alimentant un futur atlas permanent (Atlas RINAMED) …

Nous espérons pouvoir mener à terme tous ces projets, et bien d'autres, en qualité de directeur de recherche universitaire !

REFERENCES

1. Abe K. (1981) – Magnitudes of large shallow earthquakes from 1904 to 1980 – *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 27, 72–92.

2. Abramovitz J. (2001) – *Unnatural disasters* – Paper No. 158, Worldwatch Institute, Washigton D.C.

3. Abric J.C. (1994) – *Pratiques sociales et représentations* – Presses Universitaires de France, Paris.

4. Aceves–Quesada J.F., Diaz–Salgado J., Lopez–Blanco J. (2007) – Vulnerability assessment in a volcanic risk evaluation in Central Mexico through a multi–criteria–GIS approach – *Natural Hazards*, 40, pp. 339–356.

5. Adger W. N. & Kelly P.M. (1999) – Social Vulnerability to Climate Change and the Architecture of Entitlements – *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 4 (3–4), pp. 253–266.

6. Adoul K. (2005) – *Contribution au Système d'Information Géographique sur les risques naturels en Méditerranée. Mise en place de bases de données* – Rapport de stage, D.U. Cartographie des Territoires et Systèmes d'Information Géographique, Université Paul Valéry – Montpellier III, 92 p.

7. Adrianto L. & Matsuda Y. (2002) – Developing economic vulnerability indices of environmental disasters in small island regions – *Environmental Impact Assessment Review*, 22, pp. 393–414.

8. AFPS (2005) – *Vulnérabilité sismique du bâti existant : Approche d'ensemble* – Cahier Technique de l'Association Française du Génie ParaSismique, 25, Paris, 122 p.

9. Alberico I, Lirer L, Petrosino P., Scandone R. (2002) – A methodology for the evaluation of long–term volcanic risk from pyroclastic flows in Campi Flegrei (Italy) – *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 116, Issues 1–2, pp. 63–78.

10. Alexander D.E. (1984) – Building damage by landslides: the case of Ancona, Italy, 1982 – *Ekistics*, 51(308), pp. 452–462.

11. Alexander D.E. (1986) – Landslide Damage to Buildings – *Environment Geology and Water Science*, Vol. 3, N°8, pp.147–151.

12. Alexander D.E. (1988) – Developing a Landslide Damage Scale: the lessons of the Great Ancona Landslide of 1982 – Ground Failure, N°4, 4 p.

13. Alexander D.E. (1991) – Applied geomorphology and the impact of natural hazards on the built environment – *Natural Hazards*, Vol.4, N°1, pp. 57–80.

14. Alexander D.E. (2000) – *Confronting Catastrophe. New Perspectives on Natural Disasters* – Oxford University Press, Oxford, 282 p.

15. Allen K. (2003) – Vulnerability reduction and the community–based approach – in: Pelling (ed.), *Natural Disasters and Development in a Globalising World*, pp. 170–184.

16. Ambraseys N.N. (1962) – Data for the investigation of the seismic sea–waves in the eastern Mediterranean – *Bull. Seismol. Soc. Am.,* 52, pp. 895–913.

17. Amendola A., Ermoliev Y., Ermolieva T. Y., Gitis V., Koff G., Linnerooth–Bayer J. (2000) – A System Approach to Modelling Catastrophic Risk and Insurability – *Natural Hazards*, 21 (2–3), pp. 381–393.

18. Anagnos T., Rojahn C., Kiremidjian A.S. (1995) – *NCEER–ATC joint study on fragility of buildings* – Technical report NCEER–95–0003.

19. Applied Technology Council (ATC) (1985) – *Earthquake Damage Evaluation Data for California (ATC–13)* – Redwood City, California, Applied Technology Council.

20. Applied Technology Council (ATC) (1988) – *Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: a handbook* – ATC–21, Redwood City, California.

21. Applied Technology Council (ATC) (1991) – *Seismic vulnerability and impact of the disruption of lifelines in the coterminous United–States* – Redwood City, CA, Report ATC–25.

22. Association Française du génie ParaSismique (AFPS) – *Le séisme du 13 janvier 2001 au Salvador* – Rapport de Mission, Paris, 116 p.

23. Asté J.P. (1991) – Faisabilité d'un système d'alerte aux populations en cas de risques générés par des mouvements de terrain – Rapport BRGM, R 30704 ENV 4S, 106 p.

24. Asté J.P. (1994) – Les outils d'aide à la prévention et à la gestion du risque en milieu urbain – *Revue de Géographie Alpine*, n° 4, Tome LXXXII, pp. 125–130.

25. Asté J.P. (2006) – Une méthodologie pour l'évaluation économique des risques et de l'efficacité des parades : EVARISK – In : **Leone** F. & Vinet F. (dir.) : *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques – Géorisques*, n°1, coll. de l'Equipe d'Accueil GESTER, Ed. Publications de l'Université Paul–Valéry–Montpellier 3, pp. 107–116.

26. Asté J.P., Dumolard P., **Leone** F., Jin S. (1993a) – SIG et risques naturels : le glissement de terrain de Séchilienne (Isère) – *Mappemonde*, n°4, pp. 24–25.

27. Asté J.P., **Leone** F., Kruze H., Terrier M. (1993b) – *Perfectionnement de la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité et du risque sur les P.E.R. Mouvements de terrain* – Rapport BRGM R 36866 SGN/GEO/RNG pour la Délégation aux Risques Majeurs, 50 p.

28. Asté J.P. & Leroi E. (1994) – *Etude des modalités de préparation à la situation de crise en cas de risques générés par des mouvements de terrain : le projet CIVIC (connaissance et information sur les versants instables en situation de crise)* – Ministère de l'intérieur, Direction de la sécurité civile, Rapport BRGM R 37144, 98 p.

29. Attane & Courbage (2001) – *La démographie en méditerranée, situation et projections* – Plan Bleu, fascicule n°11, Ed. Economica, 240 p.

30. Audras F. et al. (1999) – *Le séisme de Martinique du 8 juin 1999* – Rapport de mission, Association française du génie parasismique, Paris, 91 p.

31. Avramidou N. (2003) – *Vulnerability of cultural heritage to hazards and prevention measures* – Federation of the international centers for the rehabilitation of architectural heritage CICOP), University of Florence, Florence, 21 p.

32. Badal J., Vasquez–Prada M., Gonzales A. (2005) – Preliminary Quantitative Assessment of Earthquake Casualties and Damages – *Natural Hazards*, 34, pp. 353–374.

33. Barbat A.H., Moya F.Y., Canas J.A., (1996) – Damage scenarios simulation for seismic risk assessment in urban zones – *Earthquake spectra*, No. 12 (3), pp. 371–394.

34. Barberi F., Macedonio G. Pareschi M.T., Santacroce R. (1990) – Tephra fallout risk for the next eruption of Vesuvius (Italy) – *Nature*, No. 334, pp. 142–144.

35. Barbut L., Bauduceau N., Devaux Ros C. (2004) – Vers une évaluation de la vulnérabilité des activités agricoles aux Inondations – *Ingénieries*, n°39, pp. 29–41.

36. Bard P.Y., Meneroud J.P., Durville J.L., Mouroux P. (1987) – Microzonage sismique : application aux plans d'exposition aux risques (PER) – *Bull. Liaison Labo. des Ponts et Chaussées*, N° 150–151, spécial Risques Naturels, pp. 130–139.

37. Barroca B. (2007) – Risque et vulnérabilités territoriales : Les inondations en milieu urbain – In : *Résumés des contributions pour le colloque CNFG* « Evolution de la recherche sur le risque en Géographie », Université de Nanterre, 31 mai-1er juin 2007, pp. 8-13.

38. Barrows Y.H. (1923) – Geography as human ecology – *Annals of the Association of American Geographers*, 13, pp. 1–14.

39. Barthelemy F., Huet P., Lefrou C., Suzanne J.C. (1999) – *Organisation du retour d'expérience dans le domaine des risques naturels* – Rapport, Conseil Général des Ponts et Chaussées, Mission d'Inspection Spécialisée de l'Environnement.

40. Bastet J.C., Doury J.L., Durville J.L. (1985) – Simulation de l'action d'un séisme à l'échelle d'une ville et de la région avoisinante In : *Génie Parasismique*, Chap. X–7, pp. 1022–1034, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

41. Bates F.L. (1982) – *Recovery, Change and Development: A Longitudinal Study of the 1976 Guatemalan Earthquake* – Athens: University of Georgia.

42. Baxter P.J., Gresham A. (1997) – Deaths and injuries in the eruption of the Galeras volcano, Colombia, 14 January 1993 – *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, No. 77, pp. 325–338.

43. Baxter P. J., Neri A., Todesco M. (1998) – Physical Modelling and Human Survival in Pyroclastic Flows – *Natural Hazards*, 17 (2), pp. 163–176.

44. Baxter P., Boyd R., Cole P., Loughlin S., Spence R., Woods A., Zuccaro G. (2000) – Modelling the impacts of pyroclastic density currents: a building damage scale devised from the lateral blast eruption on 26 December, 1997, at the Soufriere Hills volcano, Montserrat – In: *Geophysical Research Abstracts*, vol. 2, session NH6.01 Volcanic hazards: Volcanic Hazards from Explosive Eruptions at the 25th General Assembly of the European Geophysical Society, Nice, France, 25–29 April 2000.

45. Baxter P.J., Boyle R., Cole P., Neri A., Spence R., Zuccaro G. (2005) – The impacts of pyroclastic surges on buildings at the eruption of the Soufrière Hills volcano, Montserrat – *Bulletin of Volcanology*, 67, pp. 292–313.

46. Beck E. (2007) – Approche multi-risques en milieu urbain. Application à l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin) – In : *Résumés des contributions pour le colloque CNFG* « Evolution de la recherche sur le risque en Géographie », Université de Nanterre, 31 mai-1er juin 2007, pp. 20-25.

47. Bendimerad F. (2001) – Loss estimation : a powerful tool for risk assessment and mitigation – *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Volume 21, Issue 5, pp. 467–472.

48. Benoit G. & Comeau A. (dir.) (2005) – *Méditerranée. Les perspectives du Plan Bleu sur l'environnement et le développement* – Ed. de l'Aube et Plan Bleu, 432 p.

49. Bernard A., Rose, J. (1990) – The injection of sulfuric acid aerosols in the stratosphere by El Chichón volcano and its related hazards to the international air traffic – *Natural Hazards*, Vol. 3, pp. 59–67.

50. Bernknopf R.L., Campbell R.H., Brookshire D.S. & Shapiro C.D. (1988) – A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with applications for economic evaluation – *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, Vol. XXV, No. 1, p. 39–56.

51. Besancenot J.P., (2002) – Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines – *Environnement, Risques et Santé*, Paris, vol. I, n°4, pp. 229–240.

52. Birkmann J. & Wisner B. (eds.) (2006) – *Measuring the Un–Measurable. The Challenge of Vulnerability* – *SOURCE* No. 5/2006, Publication Series of UNU Institute for Environment and Human Security (UNU–EHS), UN Campus, Bonn, Germany, 64 p.

53. Birkmann J. (2007) – Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications – *Environmental Hazards*, 7, pp. 20–31.

54. Birkmann J. (Ed.) (2006) – *Measuring Vulnerability to Natural Hazards. Towards Disaster–Resilient Societies* – UNU Press, Tokyo, New York.

55. Blaikie P., Cannon T., Davis I., Wisner B. (1994) – *At Risk: Natural Hazards. People's Vulnerability and Disasters* – London, Ed. Routledge, 275 p.

56. Blong R.J. (1981) – Some effects of tephra falls on buildings – In: Self S., and Sparks R.S.J. eds., *Tephra studies*, Dordrecht, D. Reidel Publishing Co., pp. 405–420.

57. Blong R.J. (1984) – *Volcanic Hazards: A sourcebook on the effects of eruptions* – Academic Press Australia, 424 p.

58. Blong R.J. (2004) – A Review of Damage Intensity Scales – *Natural Hazards*, 29, pp. 57–76.

59. Boarnet M. (1998) – Business Losses, Transportation Damage and the Northridge Earthquake – Journal of Transportation and Statistics, 1(2), pp. 49–64.

60. Bocquet F. & Charre J.P. (1984) – *Carte Intégrée du Danger en Montagne. Méthode d'évaluation et d'introduction des données naturelles et socio–économiques* – Coll. Mouvements de Terrain, Caen, Mémoire du B.R.G.M, n°83, p. 130–140 .

61. Boen T. (2006) – Observed Reconstruction of Houses in Aceh Seven Months after the Great Sumatra Earthquake and Indian Ocean Tsunami of December 2004 – *Earthquake Spectra*, vol. 22, No. S3, pp. S803–S818., Earthquake Engineering Research Institute.

62. Bommer J., Spence R., Erdik M., Tabuchi S., Aydinoglu N., Booth E., Del Re D., Peterken O. (2002) – Development of an earthquake model for Turkish catastrophe insurance. *Journal of Seismology*, 6, 431–446.

63. Bonfanti G. (2004) – *L'habitat et les cyclones tropicaux : analyses comparées en région Caraïbe d'un indicateur de la vulnérabilité urbaine* – Thèse de doctorat, Géographie, Université de Rennes II, 390 p.

64. Bonnet (2002) – *Risques Industriels : évaluation des vulnérabilités territoriales. Le cas de l'estuaire de Seine* – Thèse de doctorat, Université du Havre, Centre Interdisciplinaire de Recherches en Transports et Affaires Internationales, 331 pages (*http://monsieur.bonnet.free.fr/doc/theseEBONNET.zip).*

65. Bonnet J. (2005) – Risques urbains et sociétaux : la vulnérabilité des grandes villes – in : *La géographie des risques dans le monde*, dir. G. Wackermann, Ellipses, Paris, pp. 421–441.

66. Bouchon S. (2007) – La Protection des Infrastructures Critiques en Europe : l'Emergence de Nouveaux Territoires de la Vulnérabilité – In : *Résumés des contributions pour le colloque CNFG* « Evolution de la recherche sur le risque en Géographie », Université de Nanterre, 31 mai-1er juin 2007, pp. 46-49.

67. Boudon G. & Villemant B. (1997) – La montagne Pelée : un nouveau scénario catastrophe : l'éruption de l'an 1300 fut bien plus dévastatrice que celle de 1902 – *La Recherche*, n°302, pp. 48–53.

68. Bourdier J.L. (1994) – *Le volcanisme* – Ouvrage collectif, Ed. BRGM, Orléans, 420 p.

69. Braga F., Dolce M., Liberatore D. (1983) – Influence of Different Assumptions on the Maximum Likelihood Estimation of the Macroseismic Intensities" – In: *Proceed. 4th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Soil and Structural Engineering*, Firenze, 1983.

70. BRED (1981) – *Assessment of damage in low–rise buildings with particular reference to progressive foundation movement* – UK Building Research Establishment Digest, 251, 8 p.

71. Bromet E. & Dew M. A. (1995) – Review of psychiatric epidemiologic research on disasters – *Epidemiologic Reviews*, 17(1), pp. 113–119.

72. Brunet R., Ferras R., Théry H. (1993) – *Les mots de la géographie. Dictionnaire critique* – Editions Reclus, La Documentation Française, Paris, 520 p.

73. Bruno Ledoux Consultant (1995) – *Bilan de mise en oeuvre des méthodologies d'élaboration des études de vulnérabilité dans le cadre des PER (1984–1994). Eléments de réflexion pour l'élaboration des PPR* – Rapport pour le compte du MEDD, Paris.

74. Bruno Ledoux Consultant, Sageris (2001) – *Guide pour la conduite des diagnostics des vulnérabilités aux inondations pour les entreprises industrielles* – Rapport, MATE, Equipe Plan Loire, 138p.

75. Canceill M. (1983) – Risques naturels et théorie mathématique du risque. – *Hydrogéologie, Géologie de l'ingénieur*, n°2, p. 137–146.

76. Cannon T., Twigg J., Rowell J. (2002) – *Social Vulnerability, Sustainable Livelihoods and Disasters.* (http://www.benfieldhrc.org);

77. Cardona O. D. (2004) – The Need for Rethinking of the Concepts of Vulnerability and Risk from a Holistic Perspective. A Necessary Review and Criticism for Effective Risk Management – In: Bankoff G., Frerks G., Hilhorst, D. (Eds.): *Mapping Vulnerability, Disasters, Development and People*, Earthscan Publishers, London.

78. Cardona O.D. (2005) – *Indicators of disaster risk and risk management* – Main technical report, IDB/IDEA Program of Indicators for Disaster Risk Management, National University of Colombia, Manizales. (http://idea.unalmzl.edu.co).

79. Cartier G. & Delmas P. (1984) – Les mécanismes des mouvements de terrain : nécessité de la mesure des déplacements – In : *Actes du colloque de Caen*, mémoire du B.R.G.M, N°83, pp. 338–344.

80. Casadevall T.J. (1992) – Volcanic hazards and aviation safety – Federal Aviation Administration, *Aviation Safety Journal*, v. 2, no. 3, pp. 9–17.

81. Casadevall T.J., Delos Reyes P., Schneider D.J. (1996) – The 1991 Pinatubo Eruptions and Their Effects on Aircraft Operations – In: Newhall (C.G.), Punongbayan (R.S.) Eds., *Fire and mud : Eruptions and lahars of Mt Pinatubo, Philippines*, University of Washington Press, Seattle.

82. Chaline C. (2001) – *L'urbanisation et la gestion des villes dans les pays méditerranéens. Evaluation et perspectives d'un développement urbain durable* – Rapport établi pour le compte du Plan Bleu et la Commission Méditerranéenne du Développement Durable, 46 p.

83. Chan L.S., Chen Y., Chen Q., Chen L., Liu J., Dong W., Shah H. (1998) – Assessment of Global Seismic Loss Based on Macroeconomic Indicators – *Natural Hazards*, 17, pp. 269–283.

84. Chang S.E. (1996) – Economic impact of lifeline disruption in the 17 January 1995 Hansin–Awaji earthquake – In: *Proceedings of the Sixth US National Conference on Earthquake Engineering*, Seattle, Washington, paper No. 70.

85. Chang S.E. (2000) – Disasters and transport systems: loss, recovery and competition at the Port of Kobe after the 1995 earthquake – *Journal of Transport Geography*, No. 8, pp. 53–65.

86. Chang S.E. et al. (1996) – *Estimation of the Economic Impact of Multiple Lifeline Disruption : Memphis Light, Gas and Water Division Case Study* – Technical Report NCEER–96–0011, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.

87. Chang S.E., Rose A., Shinozuka M., Svekla D., Tierney K.J. (nd) – *Modelling earthquake impact on urban lifeline systems: advances and integration* – Internet Publication, University of Washington, 14 p.

88. Chanson H. (2005) – Le Tsunami du 26 décembre 2004 : un phénomène hydraulique d'ampleur internationale. Premiers constats – *La Houille Blanche*, 2, pp. 25–32.

89. Chardon A.C. (1996) – *Croissance urbaine et risques « naturels » : évaluation de la vulnérabilité à Manizales, Andes de Colombie* – Thèse de doctorat, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble.

90. Chassagneux D. et al. (1996) – *Microzonage sismique des communes de Schoelcher, Fort–de–France et Le Lamentin : effets de site et liquéfaction* – Rapport BRGM R39186, 93 p., Fort–de–France.

91. Chatelain J.L., Yepes H., Guillier B., Fernandez J., Valverde J., Kaneko F., Souris M., Dupérier E., Hoefer G., Yamada T., Bustamante G., Tucker B, Villacis C. (1994) – Les scénarios sismiques comme outils d'aide à la décision pour la réduction des risques : projet pilote à Quito, Équateur – *Revue de Géographie Alpine*, 4, (LXXXII), pp. 131–150.

92. Cheminée J.L. et al. (1995) – Volcanic hazard in the French Antilles – In: *Natural Risk and Civil Protection*, Edited by Tom Horlick–Jones, Aniello Amendola and Riccardo Casale, Published by E & FN Spon, pp.96–115.

93. Chen K., Blong R., Jacobson C. (2001) – MCE–RISK: integrating multicriteria evaluation and GIS for risk decision making in natural hazards – *Environmental Modelling and Software,* 16 (4), pp. 387–397.

94. Chen Q., Chen Y., Liu J., Chen L. (1997) – Quick and Approximate Estimation of Earthquake Loss Based on Macroscopic Index of Exposure and Population Distribution – *Natural Hazards*, 15, 217–229.

95. Chen Y., Chen L., Güendel F., Kulhánek O., Juan L. (2002) – Seismic Hazard and Loss Estimation for Central America – *Natural Hazards*, 25 (2), pp. 161–175.

96. Chen Y., Chen Q., Chen L. (2001) – Vulnerability Analysis in Earthquake Loss Estimate – *Natural Hazards*, 23 (2–3), pp. 349–364.

97. Chen Y., Chen Q., Liu J. (1995) – Preliminary Study on world–wide map of future earthquake losses – XXX IUGG General Assembly, Abstracts, July 2–14, p. B370.

98. Chen Y., Chen X., Fu Z. (1982) – Estimating Losses from Future Earthquakes in China in the Forthcoming 50 years – *Seismological Press*, Beijing.

99. Chester D.K., Degg M., Duncan A.M., Guest J.E. (2001) – The increasing exposure of cities of volcanic eruptions: a global survey – *Environmental Hazards*, 2, pp. 89–103.

100. Chiroiu L. (2004) – *Modélisation des dommages consécutifs aux séismes. Extension à d'autres risques naturels* – Thèse de doctorat en Géographie, Université Paris 7, 188 p.

101. Cho et al. (1998) – *Integrating transportation network and regional economic models to estimate the costs of a large earthquake* – Vol. II, Final Report, National Science Foundation, USA.

102. Choudhurry G.S. & Jones N.P. (1996) – Development and application of data collection forms for post–earthquake surveys of structural damage and human casualties – Natural Hazards, N° 13, pp. 17–38.

103. Chrétien S. & Brousse R. (1988) – *La montagne Pelée se réveille : Comment se prépare une éruption cataclysmique* – Paris : Société Nouvelle des Editions Boubée, 243 p.

104. Clark G.E., Moser S.C., Ratick S.J., Dow K., Meyer W.B., Emani S., Jin W., Kasperson J.X., Kasperson R.K., Schwarz H.E. (1998) – Assessing the Vulnerability of Coastal Communities to Extreme Storms: The Case of Revere, MA., USA – *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 3 (1), pp. 59–82.

105. Coburn A.W. & Spence R.J.S. (1992) – *Earthquake Protection* – Ed. John Wiley, London.

106. Cochrane (1974) – *Predicting the economic impact of earthquakes* – Working paper N°25, University of Colorado, Boulder, U.S.A.

107. Cochrane H.C. (1997) – Forecasting the Economic Impact of a Midwest Earthquake – In: Barclay G. Jones (ed.): *Economic Consequences of Earthquakes: Preparing for the Unexpected*., Buffalo: NCEER.

108. Cœur D (2003) – *La maîtrise des inondations dans la plaine de Grenoble (XVIIe–XVIIIe siècles) : enjeux techniques, politiques et urbains* – Thèse de doctorat, Université Grenoble II et Institut d'Urbanisme de Grenoble.

109. Cohen V. (1992) – Evaluation d'un risque naturel dans un contexte décisionnel – Etudes du CEMAGREF, Séminaire sur les aspects socio–économiques de la gestion des risques naturels – *Montagne*, n°2, p. 97–102.

110. Cola R.M. (1996) – Responses of Pampanga households to lahar warnings: lesson from two villages in the Pasig–Potrero river watershed – In: Newhall (C.G.), Punongbayan (R.S.) Eds.: *Fire and mud. Eruptions and lahars of Mt Pinatubo, Philippines*, University of Washington Press, Seattle, pp. 141–149.

111. Colbeau–Justin L. (1995) – *Réactions et comportements face au séisme savoyard de décembre 94* – Rapport, Direction de la Sécurité Civile, Bureau de la prévention des crises, 21 p.

112. Colbeau–Justin L. & de Vanssay B. (1996) – *Analyse psychosociale d'une situation de crise limitée : le cas du séisme niçois d'avril 1995* – Orléans, Comité français pour la Décennie Internationale de la Prévention des Catastrophes Naturelles– BRGM.

113. Commissariat Général au Plan (1994) – *Transports : pour un meilleur choix des investissements* – Ed. La documentation française, Paris, 132 p.

114. Commissariat Général du Plan, Comité interministériel de l'évaluation des politiques publiques & Premier ministre, (1997) – *La prévention des risques naturels* – Rapport de l'instance d'évaluation (présidée par P.H. Bourrelier), Editions La documentation française, 703 p.

115. Conseil Régional de la Martinique (1998) – *Schéma d'Aménagement Régional (S.A.R.)* – Rapport de synthèse, Fort–de–France, 245 p.

116. Cook, R.J., Barron, J.C., Papendick R.I., Williams G.J. (1981) – Impacts on agriculture of Mount St Helens eruption – *Science*, 211, pp. 16–22.

117. Corburn, A. W., Spence R.J.S., Pomonis A. (1992) – Factors determining human casualty levels in earthquakes: mortality prediction in building collapse – In: *Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, July 1992, A.A.. Balkema, Rotterdam, pp. 5989–5994.

118. Cornet J.P. (dir.), **Leone** F., Baize S., Masure P. (2004) – *Le séisme d'Al Hoceima du 24 février 2004, Maroc* – Rapport pour le compte de l'Association Française du Génie Parasismique (AFPS) & du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (M.E.D.D.), Paris, 65 p.

119. Cospar O. (en préparation) – *La vulnérabilité des populations exposées aux mouvements de terrain aux Antilles* – Thèse de doctorat, Département de Géographie, Université des Antilles et de la Guyane, Martinique.

120. CRED (2006) – *Base de données EM–DAT (EMergency DATabase)* – Centre de Recherche sur l'Epidémiologie des Désastres, Université Catholique de Louvain, Bruxelles (http://www.em–dat.net/).

121. Cronin S., Hedley M., Smith G., Turner M. (1996) – Impacts on soil and pasture chemical composition – In: *Impacts of October 1995 Ruapehu ash fall on soil fertility*, Department of Soil Science and Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University.

122. Crowder B. (1995) – *The Wonders of the Weather* – Bureau of Meteorology, Australian Government Publishing Service, Canberra, 270 p.

123. D.D.E. (1997) – *Cartographie de l'aléa inondation. Commune du Lamentin* – Rapport Direction Départementale de l'Equipement Martinique, Préfecture de la Martinique, BCEOM.

124. D.E.F.R.A (2003) – *Flood risk to people: phase 1* – London, 123 p.

125. D.R.M. (1985) – *Plans d'exposition aux risques : évaluation de la vulnérabilité* – Délégation aux Risques Majeurs, Ministère de l'environnement, Paris, 112 p.

126. D.R.M. (1990) – *Les études préliminaires à la cartographie réglementaire des risques naturels majeurs* – Délégation aux Risques Majeurs, Ministère de l'environnement, Ed. La documentation française, Paris, 142 p.

127. D.R.M. (1992) – *Les mouvements de terrain* – Délégation aux Risques Majeurs, Ministère de l'environnement, Brochure d'information, 40 p.

128. Dale V.H. (1986) – Plant recovery on the debris avalanche at Mount St Helens – In: *Mount St Helens: Five years later*, Eastern Washington University Press, 208–214.

129. Dauge Y. (1999) – *Les Politiques publiques de prévention des inondations : rapport au Premier ministre* – Ed. La documentation française, 56 p.

130. Dauphiné A. (2001) – *Risques et catastrophes* – Ed. Armand Colin, Paris, 288 p.

131. Dauphiné A. (2004) – Réflexions préliminaires sur les vulnérabilités analytiques et synthétiques – In : Veyret, Y., Garry, G. et Meschinet de Richemond, N. (dir.): *Risques naturels et aménagement en Europe*, E. Armand Colin, Paris, pp. 68-71.

132. De Blois C.J. & Wind H.G. (1996) – Assessment of Flood Damages and Benefits of Remedial Actions: "What are the Weak Links? with Application to the Loire – *Phys. Chem. Earth*, Vol. 20, No. 5–6, pp. 491–495.

133. De Mazières J. & Mas M. (2003) – *Evaluation du risque volcanique à travers la prise en compte de la vulnérabilité des populations. Le cas de la Soufrière de Guadeloupe* – Mémoire de maîtrise (TER), Département de géographie, Université Paul Valéry – Montpellier III, 120 p.

134. De Vanssay B. & Colbeau–Justin L. (2000) – *La construction des dynamiques des résistances à l'évacuation : la Soufrière de Montserrat (1995–1999)* – Rapport MATE, Programme Risques Collectifs et Situations de Crise du CNRS, DIPCN.

135. De Vanssay B. (2001) – Risques naturels et relations hommes / environnements dans les Caraïbes – In : *Actes du colloque international « Risques et territoires »*, Atelier 3, ENTPE, Vaulx–en–Velin, pp. 75-92.

136. De Vanssay B., Sarant P.M., Pagney F., **Leone** F., Colbeau–Justin L., Pontikis R. (2004) − Retour d'expérience : la reconstruction post–catastrophe. Développement durable et réduction de la vulnérabilité − In : Scarwell H. J. & Franchomme M. (dir.) : *Contraintes environnementales et gouvernance des territoires* – Editions de l'aube nord, 8 p.

137. Deakin E. (1991) – *Transportation impacts of the 1989 Loma Prieta Earthquake: The Bay Bridge Closure* – University of California Transportation Center Working Paper UCTC No. 294, Berkeley, CA.

138. Delmas P., Cartier G., Pouget P. (1987) – Méthodes d'analyse des risques liés aux glissements de terrain – *Bull. Liaison Labo. des Ponts et Chaussées*, N° 150–151, spécial Risques Naturels, pp. 29–38.

139. Demoraes F. (2004) – *Mobilité, enjeux et risques dans le district métropolitain de Quito (Equateur)* – Thèse de Doctorat, laboratoire EDYTEM, Chambéry, IRD et Mairie de Quito, Grenoble, 587 p.

140. Denis H. (1998) – *Comprendre et gérer les risques sociotechnologiques majeurs* – Ecole Polytechnique de Montréal.

141. DERC (1998) – *Disaster Management Glossary* – edited by Krisno Nimpuno, Delft, the Netherlands: Disaster and Emergency Reference Center.

142. D'Ercole R. (1991) – *Vulnérabilité des populations face au risque volcanique. Le cas de la région du volcan Cotopaxi (Equateur)* – Thèse de doctorat, spécialité Géographie–Aménagement, Université Joseph Fourier, Grenoble, 459 p.

143. D'Ercole R. (1994) – Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse – *Revue de Géographie Alpine*, N°4, Tome LXXXII, pp. 87–96.

144. D'Ercole R. (1996a) – De l'évaluation à la gestion des risques : la vulnérabilité en question – *Pangea* (Revue du CIFEG, Orléans), n° 25, pp. 5–12.

145. D'Ercole R. (1996b) – La catastrophe et son impact a moyen terme : l'exemple de Popayan (Colombie), dix ans après le séisme du 31 mars 1983 – *Cahiers des Sciences Humaines*, 96–2, pp. 445–470.

146. D'Ercole R. (1996c) – Représentations cartographiques des facteurs de vulnérabilité des populations exposées à une menace volcanique. Application à la région du volcan Cotopaxi (Equateur) - *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines*, tome 25, n°3, pp. 479-507.

147. D'Ercole R. (2002) – Forces et faiblesses de la gestion des risques au Japon : une réflexion à partir de la crise liée à l'éruption du volcan Usu (Hokkaido) de 2000 – *Annales de Géographie*, n°627–628, pp.524–548.

148. D'Ercole R. et al. (1997) – *Diagnostic préalable aux plans d'action DIPECHO en Amérique Centrale et dans les Caraïbes* – Programme ECHO de prévention, d'atténuation et de préparation aux catastrophes, ECHO–CRED–CIFEG, 184 p.

149. D'Ercole R., Martin Ch., Rançon J.Ph. (1993) – *Programme DIPCN/Antilles–Caraïbes. Préparation à la gestion des situations de crise : application aux collèges de Martinique. Dernière phase* – Ministère de l'Environnement, Délégation aux Risques Majeurs, rapport BRGM R37849, décembre 1993, 194 p. + 6 plaquettes d'information.

150. D'Ercole R. & Metzger P. (2000) – La vulnérabilité de Quito (Equateur) face à l'activité du Guagua Pichincha. Les premières leçons d'une crise volcanique durable – *Cahiers Savoisiens de Géographie*, n°1, p. 39–52.

151. D'Ercole R. & Metzger P. (2001) – Différenciations spatiales et sociales, Représentations et Gestion du risque volcanique à Quito – In : *Actes du colloque international « Risques et territoires »*, Atelier 3, ENTPE, Vaulx–en–Velin, pp. 237–250.

152. D'Ercole. R. & Metzger, P. (2004) – *La vulnerabilidad del distrito metropolitano de Quito* – Ed. IRD & Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 496 p.

153. D'Ercole R & Pigeon P. (1999) – L'expertise internationale des risques dits naturels : intérêt géographique – *Annales de Géographie*, n°608, pp. 339–357.

154. D'Ercole R. & Rançon J.P. (1994) – La future éruption de la montagne Pelée: Risque et représentations – *Mappemonde*, N°4, p.31–36.

155. D'Ercole R. & Rançon J.Ph. (1999) – Représentation des risques liés à une éruption de la montagne Pelée, Martinique. Confrontation des points de vue des populations proches (Saint–Pierre, Le Prêcheur et Le Morne–Rouge) et des volcanologues – In : *Terres d'Amérique*, N°2 : « Les Antilles, Terres à risques», Editions KARTHALA et GEODE Caraïbe, pp.165–182.

156. D'Ercole R. & Trujillo M. (2003) – *Amenazas, Vulnerabilidad, Capacidades y Riesgo en el Ecuador. Los desastres, un reto para el desarrollo* – Ed. IRD, COOPI, Oxfam, 120 p + anexes.

157. D'Ercole R. & Pigeon P. (dir.), Baussart O., Cambot, V., Gnemmi L., Wattez J. (2000) – *Analyse du système urbain d'Annecy et définition de ses enjeux* – Rapport, Département de Géographie - Université de Savoie, 96 p.

158. Devaux–Ros C. (1999) – Évaluation des enjeux et des dommages potentiels liés aux inondations de la Loire moyenne – In : Gilles HUBERT et Bruno LEDOUX, Dir. : *Le coût du risque. L'évaluation des impacts socio–économiques des inondations*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris pp. 139–142.

159. Deville Sainte–Claire C. (1843) – *Observations sur le tremblement de terre éprouvé a la Guadeloupe le 8 Février 1843* – Imprimerie du Gouverneur, Basse–Terre.

160. Dibben C. & Chester D.K. (1999) – Human vulnerability in volcanic environments : the case of Furnas, São Miguel, Azores – *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 92, Issues 1–2, pp.133–150.

161. Dilley M., Chen R.S., Deichmann U., Lerner–Lam A., Arnold M., Agwe J., Buys P., Kjekstad O., Lyon B., Yetman G. (2005) – *Natural Disaster Hotspots: a Global Risk Analysis* – Synthesis Report, International Bank for Reconstruction an Development/The World Bank and Columbia University, 29 p. (http://www.ldeo.columbia.edu/chrr/research/hotspots).

162. Doutres N. (2006) – *Le risque tsunami en Méditerranée : quelle gestion, pour quel risque ?* – Mémoire de spécialité de Master 1 « Gestion des Catastrophes et des Risques Naturels », Département de Géographie, Université Paul Valéry – Montpellier III, 150 p.

163. Durville J.L. (1992) – Mécanismes et modèles de comportement des grands mouvements de versant – *Bull. Assoc. Intern. Géol. Ing.*, N°45, pp.25–40.

164. Durville J.L. & Meneroud J.P. (1987) – Vulnérabilité aux séismes des itinéraires routiers – *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*, N°150–151, spécial risques naturels, pp. 185–193.

165. Dyer J.M. & Baird P. (1997) – Wind disturbance in remnant forest stands along the prairie–forest ecotone, Minnesota, USA – *Plant Ecology*, 129 (2), pp. 121–134.

166. Dymon U.J. & Winter N.L. (1991) – Emergency Mapping in Grass Roots America: A Derailment Evacuation Case Study – *Geoforum*, Vol. 22, No. 4, pp. 337–345.

167. Dymon U.J. & Winter N.L. (1993) – Evacuation Mapping: the Utility of Guidelines – *Disasters*, Vol.17, No. 1, pp. 12–24.

168. Eco Maires (1997) – *La responsabilité des élus face aux risques majeurs. Guide pratique à l'usage des élus locaux* – Ed. Association les Eco Maires, Paris, 54 p.

169. EEA (2003) – *EEA Core set of indicators. Guide* – European Environmental Agency, Technical Report, No. 2005, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities, 38 p.

170. Eggler W.A. (1948) – Plant communities in the vicinity of the volcano El Páricutin, Mexico, after two and a half years of eruption – *Ecology*, 29, pp. 415–436.

171. Einstein H.H. (1988) – Landslide risk assessment procedure – Special lecture, In: *Proc. 5th Int. Symp. Landslides*, Lausanne, Vol. 2, pp. 1075–1090.

172. Equipe pluridisciplinaire Plan Loire (2001) – *Diagnostic de la vulnérabilité des entreprises face au risque inondation.*

173. Faccioli E., Pessina V., Calvi G.M., Borzi B. (1999) – A study on damage scenarios for residential buildings in Catania city – *Journal of Seismology*, 3 (3), 327–343.

174. Fäh D., Kind F., Lang K., Giardini D. (2001) – Earthquake scenarios for the city of Basel – *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, No. 21, pp. 405–413

175. Fares A. (1994) – *Essai méthodologique de la cartographie des risques naturels liés aux mouvements de terrain. Application à l'aménagement de la ville de Taounate (Rif, Maroc)* – Thèse de doctorat, Université de Besançon, 177 p.

176. Farissier P. (1995) – Modélisation et simulation de crue : le programme inondation du CEMAGREF – *S.I.G. et Télédétection*, N°13, pp.10–11.

177. Farmer A.M. (1993) – The Effects of Dust on Vegetation. A Review – *Environmental Pollution*, 79, pp. 63–75.

178. Faugères L. (1990) – La Géo–cindynique, Géo–science du risque – *Bulletin Association Française Géographie*, n° 3, 16 p.

179. Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1999) – *HAZUS99. Earthquake loss estimation methodlogy: user's manual* – Washington D.C.

180. Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2000) – *FEMA 366: HAZUS99 estimated earthquake losses for the United States* – Washington D.C.

181. FEMA (1990) – Definitions of Terms (Instruction 5000.2) – Washington, DC: FEMA, April 4.

182. Fernandez et al. (1994) – *The Quito, Ecuador, Earthquake Risk Management Project: An Overview* – Geohazards International Publication, Stanford University.

183. Finlay P.J. (1996) – *The risk assessment of slopes* – School of civil Engineering, University of New South Wales, Australia, PhD Thesis.

184. Foster, Carrey (1976) – The simulation of earthquake damage – *Western Geogr. series*, Vol. 12, Chap. 6.

185. Gaillard J.C. (2001) – *Implications territoriales et socio–économiques des crises et des réponses liées à l'éruption et aux lahars du Mt Pinatubo (Philippines), 1991–2001* – Thèse de Doctorat, Université de Savoie, Chambéry (France), 540 p.

186. Gaillard J.C. (2007) – De l'origine des catastrophes : phénomènes extrêmes ou âpreté du quotidien ? – *Natures Sciences Sociétés,* 15, pp. 44–47. (http://www.edpsciences.org/nss).

187. Gaillard J.C., D'Ercole R., **Leone** F. (1998) – Cartographie de la vulnérabilité des populations face aux phénomènes volcaniques et aux lahars du Pinatubo (Philippines). Cas du bassin de la rivière Pasig-Potrero (Province de Pampanga) – *Pangea*, n°29-30, Ed. du CIFEG, Orléans, pp. 5-19.

188. Gaillard J.C., D'Ercole R., **Leone** F. (2001) – Cartography of population vulnerability to volcanic hazards an lahars of Mount Pinatubo (Philippines) : a case study in Pasig–Potrero River basin (province of Pampanga) – *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, N°3, pp.209–222.

189. Gaillard J.C. & **Leone** F. (2000) – Implications territoriales de l'éruption du Mont Pinatubo pour la minorité autochtone aeta. Cas des bassins–versants des rivières Pasig et Sacobia (provinces de Pampanga et Tarlac, Philippines) – Cahiers Savoisiens de Géographie, n°1/2000, pp. 53–68.

190. Gaillard J.C. & **Leone** F. (inédit) – *Retour sur une décennie de gestion des conséquences de l'éruption du volcan Pinatubo aux Philippines : de la catastrophe au miracle économique ?* – document inédit, 22 p.

191. Gamblin M.S., Griffith J.S., Platts W.S. (1986) – Response of trout populations in St Joe River drainage, Idaho, to Mt St Helens tephra – In: *Mount St Helens: Five years later*, Eastern Washington University Press, pp. 297–306.

192. GEMITIS (1999) – *Evaluation des dommages directs d'un séisme sur la ville de Nice : scénarios de risques* – Rapport BRGM R40612, 171 pages + 9 annexes.

193. Gendreau N. (1999) – L'évaluation de la vulnérabilité et des enjeux : la méthode Inondabilité – In : Ledoux et Hubert, Dir. : *Le coût du risque. L'évaluation des impacts socio–économiques des inondations*, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris p. 123–127.

194. Ghobarah A., Saatcioglu M., Nistor I. (2006) – The impact of the 26 December 2004 earthquake and tsunami on structure and infrastructure – *Engineering Structures*, 28, 312–326.

195. Gilbert C. (1992) – *Le pouvoir en situation extrême : catastrophe et politique* – Éd. L'Harmattan. Paris.

196. Gilbert C. (1999) – Premiers éléments de réflexions pour une approche transversale du retour d'expérience – *Annales des Ponts et Chaussées*, n°91, p.4–10.

197. Gilbert C. & Bourdeaux I. (1999) – *Procédures de retour d'expérience, d'apprentissage et de vigilances organisationnels* – Rapport de fin d'opération structurante de recherche, Ministère de l'Environnement, Ministère de l'Intérieur, MSH–Alpes, Grenoble, 308 p.

198. Giovinazzi S. & Lagomarsino S. (2003) – Seismic risk analysis: a method for the vulnerability analysis of built–up areas – In: *Proc. European Safety and Reliability Conf. ESREL*, June, Maastricht, The Netherlands.

199. Giuliano G., Golob J., Bahl D., Lee W., Liao Y.C. (1996) – *Impacts of the Northridge Earthquake on Transit and Highway use* – University of Southern California, Lusk Center Research Institute Research Report No. LCRI–96–03R, Los Angeles, CA.

200. Gleyze J.F. (2005) – *La vulnérabilité structurelle des réseaux de transports dans un contexte de risque* – Thèse de doctorat, Université Paris VII, Laboratoire COGIT-IGN, 826 p.

201. Godefroy P. (1989) – Risque sismique, construction et aménagement en Provence – Science Technique Technologie, N°9, pp.17–28.

202. Godefroy P. et al. (1991) – Etude et prévention du risque sismique aux Petites Antilles. Evaluation de l'aléa sismique sur l'île de la Martinique – Rapport de synthèse, R 32 923, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Marseille, 206 p.

203. Gomez–Fernandez F. (2000) – Contribution of Geographical Systems to the Management of Volcanic Crises – Natural hazards, No. 21, pp. 347–360.

204. Gordon P., Richardson H. W., Davis B. (1998) – Transport–related impacts of the Northridge earthquake – *Journal of Transportation and Statistics*, 1 (2), pp. 21–36.

205. Gratton Y. (2002) – Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale – In : *Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique*, http://www.iag.asso.fr, 4 p.

206. Green B.D. & Rose W. I. (nd) – *Volcanic Risk Map for Santa Maria, Guatemala: What can Risk Maps Contribute to Volcanic Hazard Communications* – Source Internet : www.geo.mtu.eduvolcanoes/santamaria/volcrisk, 7p.

207. Green C.H. (1988) – *The Relationships Between the Magnitude of Flooding, Stress and Health* – Flood Hazard Research Centre Middlesex University, Enfield.

208. Greene M.R., Perry R.W., Lindell M.K. (1981) – The March 1980 eruptions of Mt St. Helens : citizen perceptions of volcano hazards – *Disasters*, 5 (1), pp. 49–66.

209. Griot C. & Ayral P.A. (2002) – *Recueil de définitions. Terminologie en Science du Risque* – Document du Groupe des Ecoles des Mines (G.E.M. Risques), 88 p.

210. Grünthal G. (dir.) (2001) – European Macroseismic Scale 1998 (EMS 1998) – *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, vol. 19. http://geology.about.com/gi/dynamic/offsite.htm?site=http://www.gfzpotsdam.de/pb1/pg2/ems_new/INDEX_d.HTM

211. Gruppo Nazionale da Difensa dai Terremoti (GNDT) (1993) – *Rischio Sismico di Edifici Pubblici* – Parte I: aspetti metodologici. Cento Servizi Quasco, Bologna.

212. GSC, Météo France, Cemagref (2002) – *Détermination d'une échelle d'intensité en 5 niveaux par type de phénomènes naturels* – Phase 1, Etat de l'art : Echelle d'intensité et de dommages, enjeux + Annexes par aléas – Phase 4–5, Guide général d'usage des échelles + Annexes par aléas, MEDD/DPPR/SDPRM, Paris.

213. GSHAP (1999) – Global Seismic Hazard Assessment Program – (http://www.seismo.ethz.ch/GSHAP/)

214. Gutenberg B. (1945) – Amplitudes of surface waves and magnitudes of shallow earthquakes – *Bulletin of the Seismological Society of America*, 35, pp. 3–12.

215. Gutenberg B. & Richter C.F. (1936) – Magnitude and energy of earthquakes – *Science*, 83, pp. 183–185.

216. Gutenberg B. & Richter C. F. (1956) – Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration – *Bulletin of the Seismological Society of America*, 46, pp. 105–145.

217. Hamparian R. (1999) – L'Ouragan Hugo sur la Guadeloupe : les enseignements d'une cartographie des effets locaux – In : *Terres d'Amérique*, n°2, Editions Karthala et Géode–Caraïbe, Paris, pp. 19–40.

218. Handmer J. & Wisner B. (1998) – Conference Report: Hazards, Clobalization and Sustainability – *Development in Practice*, Vol. 9, No. 3, pp. 342–346.

219. Hardy S. (2003) – *Processus de fragmentation urbaine et risques dits « naturels » dans la ville de Managua (Nicaragua)* – Thèse de doctorat en géographie, EHESS, 416 p.

220. Hassani N. & Takada S. (1995) – Lifelines performance and damage during 17 Jan. 1995, South Hyogo Great Earthquake – In: *Proceedings of the first Iran–Japan Workshop on Recent Earthquakes in Iran and Japan*, Iran, 1995, pp. 1809–1821.

221. Hatori T. (1986) – Classification of tsunami magnitude scale – *Bull. Earthquake Res., Inst. Univ. Tokyo*, 61, pp. 503–515 (japonais).

222. Hawlick S.W. (1996) – *Third world cities at risk: building for calamity* – New York, Environment, n°28.

223. Haynes K., Barclay J., Pidgeon N. (2007) – Volcanic hazard communication using maps: an evaluation of their effectiveness – *Bulletin of Volcanology*, Springer Berlin / Heidelberg.

224. Herold–Revaz A., Dulex Putallaz S., Bridel L. (1998) – Représentation du risque d'avalanches et comportements sociaux dans deux communes valaisannes – In : *Rapport de travail PNR 31*, 228 p., 62 fig. et photos – Vdf Hochschulverlag, EPF Zurich, Suisse.

225. Hoover G.A. & Bates F.L. (1985) – The Impact of a Natural Disaster on the Division of Labor in Twelve Guatemalan Communities: A Study of Social Change in a Developing Country – International Journal of Mass Emergencies and Disasters 3 (3), pp. 7–26.

226. Hubert G., Reliant C., Ledoux B. (2001) – *La place et le rôle des approches socio–économiques dans la politique réglementaire de prévention des risques d'inondation* – Rapport RIO II, Ministère de l'Environnement.

227. Hulsbergern J.G. & Carree G. J. (1987) – A method for estimating damage to buildings in subsiding areas – In: *Proccedings European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Dublin, Vol. 2, pp. 699–702.

228. IFEN (Dir. T. Lavoux et J. Theys) (2003) – *45 indicateurs de développement durable : une contribution de l'IFEN* – Edité par l'IFEN (Institut Français de l'Environnement), collection «Etudes et Travaux» n°41, 145 pages (http://www.ifen .fr/publications).

229. IFRC (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies) (1999) – *Vulnerability and Capacity Assessment. International Federation Guide* – IFRC, Switzerland, 33 p.

230. Iida K. (1963) – Magnitude, energy and generation mechanisms of tsunamis and a catalogue of earthquakes associated with tsunamis – *International Union of Geodesy and Geophysics Monograph*, 24, pp. 7–17.

231. Ingleby I. (1966) – Mt. Lamington Fifteen Years after – *Australian Territories*, 6, pp. 28–34.

232. IPCC (2001) – *Climate change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability* – Summary for Policymakers, WMO.

233. ISDR (2002) – *Living with risk. A global review of disaster reduction initiatives* – Preliminary version, United Nations/ISDR, Palais des Nations, Genève, 382 p.

234. Islam K.M.N. (1997) – *The Impacts of Flooding and Methods of Assessment in Urban Areas of Bangladesh* – Ph.D. thesis, Flood Hazard Research Centre, Middlesex University, UK.

235. Jaramillo J. D. & Campos Garcia A., (nd) – *Vulnerabilidad sismica de la ciudad de Pereira, Colombia* – Article en préparation, Proyecto para la Mitigacion del riego sismico de Pereira, CARDER, Colombia, 11p.

236. Jones R. & Boer R. (2003) – *Assessing current climate risks Adaptation Policy Framework: A Guide for Policies to Facilitate Adaptation to Climate Chang* – UNDP, in review (http://www.undp.org/cc/apf–outline.htm).

237. Jonkman S.N., Van Gelder P., Vrijling (2002) – Loss of life models for sea and river floods – In : Wu et al.,. (Eds), *Flood Defence 2002*, New York: Science Press, pp. 196–206.

238. Kalayjian A., Kanazi R.L., Aberson C.L., Feygin L. (2002) – A Cross–Cultural Study of the Psychosocial and Spiritual Impact of Natural Disaster – *International Journal of Group Tensions*, 31 (2), pp. 175–186.

239. Kanamori H. (1977) – The energy release in great earthquakes – *Journal of Geophysical Research*, 82, pp. 2981–2987.

240. Kappos A.J., Stylianidis K.C., Pitilakis K. (1998) – Development of Seismic Risk Scenarios Based on a Hybrid Method of Vulnerability Assessment – *Natural Hazards*, 17 (2), pp. 177–192.

241. Kelman I. & Spence R. (2002) – Vulnerabilities of Residential Buildings in England to the Physical Forces Imposed by Floods – Geophysical Research Abstracts, vol. 4, session NH5 Natural Hazards Impact on Urban Areas and Infrastructure at the 27th General Assembly of the European Geophysical Society, Nice, France, 21–26 April 2002.

242. Kelman I. & Spence R. (2004) – An overview of flood actions on buildings – *Engineering Geology*, 73. pp. 297–309.

243. Kervern G.Y (1994) – *Eléments fondamentaux des Cindyniques* – Ed. Economica, Paris.

244. Kervern G.Y. & Rubise P. (1991) – *L'Archipel du danger, introduction aux cindyniques* – Paris : Economica, 444 p.

245. Kervern G.Y. & Wybo J.L. (2001) – Le retour d'expérience de la gestion des crises : d'octobre 1986 à septembre 2001 – *Revue des ingénieurs*, Dossier l'avenir du Nucléaire, novembre–décembre. (www.mines–energie.org/Dossiers/Nucl2003_18.pdf).

246. Khanduri A. C. & Morrow G. C. (2003) – Vulnerability of buildings to windstorms and insurance loss estimation – *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 91, Issue 4, pp. 455–467.

247. Kienholz H. (1992) – Risk zoning in mountains: the quantification of vulnerability and hazards – In : *Actes Colloque Bogota*, pp. 499–505.

248. King D. (2001) – Uses and Limitations of Socioeconomic Indicators of Community Vulnerability to Natural Hazards: Data and Disasters in Northern Australia – *Natural Hazards*, 24 (2), pp. 147–156.

249. Kircher, C.A., Nassar A.A., Kustu 0., Holmes W.T. (1997) – Development of building damage functions for earthquake loss estimation – *Earthquake Spectra*, No. 13 (4), pp. 663–682.

250. Klein R.J.T. & Nicholls R. J., Thomalla F. (2003) – Resilience to natural hazards: how useful is this concept ? – *Environmental Hazards*, 5, pp. 35–45.

251. Kloner R.A., Leor J., Poole K., Perritt R. (1997) – Population–based analysis of the effect of the Northridge eartrhquake on cardiac death in Los Angeles county, California – *JACC*, Vol. 30, No. 5, pp. 1174–1180.

252. Kouabenan, R.D. (1999) – *Explication naïve de l'accident et prévention* – Ed. PUF, Paris

253. Kozlowski S.R.T. (1997) – Analysis of storm–damage factors for low–rise structures – *J. Perform. Construct. Facilities*, ASCE 11 (4), 168–177.

254. Kuhlicke C. (2007) – (Non–)Knowledge in Hazard and Vulnerability Research: A Heuristic Typology for Empirical Case Studies – In: Koko Warner (Ed.): *Perspectives on Social Vulnerability*, *SOURCE* No. 6/2007, Publication Series of UNU Institute for Environment and Human Security (UNU–EHS), UN Campus, Bonn, Germany, pp. 24–35.

255. Kuribayashi E., Ueda O., Tazaki T. (1982) – An econometric model considering subground conditions for long term effects of earthquake losses – In: *Proc. 3rd Int. Earthq. Microzonation Conf.*, Seattle, pp. 209–243.

256. Lacroix A. (1904) – *La Montagne Pelée et ses éruptions* – Editions Masson et Cie, Paris, 662 p.

257. Laforge C. & Thouret J.C. (1991) – Contribution à la méthode d'évaluation des risques dans les villes des PVD (Ibagué, Colombie) – *Bulletin de l'Association des Géographes Français*.

258. Lagadec P. (1981) – *La civilisation du risque* – Paris : Ed. du Seuil.

259. Lagadec P. (1995) – *Les dirigeants et les crises : nouvelles cultures, nouveaux outils, pour un nouveau champ de responsabilité* – Paris, Administration n°166.

260. Lagadec, P. (2001) – Le rapport de la commission d'Enquête britannique sur l'ESB au Royaume Uni entre 1986 et 1996 – *Cahiers du GIS risques collectifs et situations de Crise*, n°1 juillet 2001.

261. Lavigne F. (1999a) – SIG et zonage des risques volcaniques : application au volcan Merapi, Java, Indonésie – *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, pp. 371–382

262. Lavigne F. (1999b) – Lahar hazard micro–zonation and risk assessment in Yogyakarta city, Indonesia – *GeoJournal*, 49 (2), pp. 173–183.

263. Lavigne F., Paris R., Grancher D., Wassmer P., Setiawan A., Syahnan Gunawan T., Fachrizal Waluyo B., Cahyadi R., Mahieu L., Flohic F., De Coster B. (2006) – Le tsunami du 26 décembre 2004 : chronologie et reconstitution de la catastrophe dans la région de Banda Aceh – In : Lavigne F. & Paris R. (dir.) : *Rapport scientifique du programme Tsunarisque (2005–2006) sur le tsunami du 26 décembre 2004 en Indonésie* – Délégation Interministérielle pour l'aide Post–Tsunami (DIPT), Ambassade de France en Indonésie, Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 22−37.

264. Le Net M. (1978) – Le prix de la vie humaine – *Notes et études documentaires*, n°4455, Ed. La Documentation française, Paris, 152 p.

265. Ledoux B., Colas G., Durville J.L. (1990) – Etude de l'impact économique des mouvements de terrain. Exemple du Var – *Revue de Géologie Alpine*, mémoire H.S. N°15, Risques naturels dans le sud–est de la France, pp. 133–145.

266. Ledoux B. & Hubert G. dir. (1999) – *Le coût du risque. L'évaluation des impacts socio–économiques des inondations* – Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 232 p.

267. Ledoux B. & **Leone** F. (2002) – *La société française face au risque inondation. Demande sociale et recherche scientifique* – Rapport pour le compte de l'Institut National Polytechnique de Grenoble et le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Ledoux Consultants, Montpellier, 142 p.

268. Ledoux B. & Sageris (1999) – *Guide de la conduite des diagnostics des vulnérabilités aux inondations pour les entreprises industrielles* – Rapport, MATE, 126 p.

269. Leicester R. H. & Reardon G. F. (1976) – A statistical analysis of the structural damage by Cyclone Tracy – In: *Proc. Annual Conference Institution of Engineers*, Australia, Townsville, pp. 242–247.

270. Leigh R. & Kuhnel I. (2001) – Hailstorm Loss Modelling and Risk Assessment in the Sydney Region, Australia – *Natural Hazards*, 24 (2), pp. 171–185.

271. **Leone** F. (1996a) – *Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain* – thèse de doctorat, spécialité géographie, Université J. Fourier, Grenoble, publiée dans les Documents du BRGM, N°250, Editions du BRGM, Orléans, 286 p.

272. **Leone** F. (1996b) – Impacts et gestion des crises liés à l'éruption et aux lahars du volcan Pinatubo (1991–1996). Contribution à l'analyse du système institutionnel philippin de réponse aux catastrophes volcaniques – *Pangea*, n°26, Ed. du CIFEG, Orléans, pp.13–34.

273. **Leone** F. (1997) – Réflexions à propos d'un essai de formalisation analytique du risque : application aux mouvements de terrain – *Pangea*, Editions du CIFEG n°27–28, Orléans, pp. 41–52.

274. **Leone** F. (2002) – Implications territoriales et socio–économiques des menaces naturelles en Martinique (Antilles françaises) : une approche spatiale assistée par S.I.G. – *Annales de Géographie*, 627/628, pp. 549–573.

275. **Leone** F. (2003) – *Les travaux de recherche portant sur l'évaluation de la vulnérabilité aux menaces naturelles. Etat de l'art et disponibilité opérationnelle (hors inondations)* – Rapport d'étape pour le compte du Ministère de l'Equipement, des Transports et du Logement. Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et Techniques, Paris, 28 p.

276. **Leone** F. (2004) – Une approche quantitative de la cartographie des risques naturels : application expérimentale au patrimoine bâti de la Martinique (Antilles françaises) – *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, N°2, pp. 117–124.

277. **Leone** F., Asté J.P., Leroi E. (1996a) – Vulnerability assessment of elements exposed to mass-movement: Working toward a better risk perception – In: Senneset K. (ed.): *Landslides*, Ed. Balkema, Rotterdam, pp. 263-269.

278. **Leone** F., Asté J.P., Leroi E. (1996b) – L'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrain : pour une meilleure quantification du risque – *Revue de Géographie Alpine*, n°1, tome 84, pp. 35-46.

279. **Leone** F., Asté J.P., Velásquez E. (1995) – Contribution des constats d'endommagement au développement d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité appliquée aux phénomènes de mouvements de terrain – Bulletin de l'Association de Géographes Français, 4, 350–371.

280. **Leone** F., Denain J.C, Vinet F., Waechter F., Rambaud D., Cherel J.P., Adoul K., Doutres N. (2006a) – *Le Système d'Information Géographique sur les Risques Naturels en Méditerranée (SIG RINAMED) : outil d'analyse territoriale, d'évaluation des risques et de production d'atlas permanent* – Rapport de présentation pour le compte de l'Agence Méditerranéenne de l'Environnement (AME), Conseil Régional du Languedoc–Roussillon, programme européen RINAMED, Equipe d'Accueil GESTER, Université Paul Valéry–Montpellier III, 54 p.

281. **Leone** F., Denain J.C., Vinet F., Bachri S. (2006b) – Analyse spatiale des dommages au bâti de Banda Aceh (Sumatra, Indonésie). Contribution à la connaissance du phénomène et à l'élaboration de scénarios de risque tsunami – In : Lavigne F. & Paris R. (dir.) : *Rapport scientifique du programme Tsunarisque (2005–2006) sur le tsunami du 26 décembre 2004 en Indonésie* – Délégation Interministérielle pour l'aide Post–Tsunami (DIPT), Ambassade de France en Indonésie, Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, pp. 69–94.

282. **Leone** F. & Gaillard J.C. (1999) – Analysis of the institutional and social responses to the eruption and the lahars of Mount Pinatubo volcano from 1991 to 1998 (Central Luzon, Philippines) – *Geojournal*, N°49, pp. 223–238.

283. **Leone** F. & Ledoux B. (2003) – Demande sociale et orientations scientifiques sur le thème des inondations en France – In : *Actes du colloque sur les inondations en France : prévention, gestion, responsabilités* − Montpellier, 16–17 décembre 2002, Ed. Agropolis International, Montpellier, pp. 47–55.

284. **Leone** F. & Lesales T. (1999) – Un aperçu de l'impact des mouvements de terrain en Martinique, en France et dans le monde – In : Dossier "Les Antilles, terres à risques", *Terres d'Amériques*, n°2, Ed. Karthala, Paris, pp. 97–114.

285. **Leone** F. & Lesales T. (2003) – *Evaluation de la perception du risque volcanique. Résultats préliminaires du questionnaire d'enquête lancé dans 4 communes du massif de la montagne Pelée (Ajoupa–Bouillon, Basse–Pointe, Macouba, Grand–Rivière)* – Rapport pour le compte du Parc Naturel Régional de la Martinique, Equipe d'Accueil GEODE–Caraïbe, Université des Antilles et de la Guyane, Schoelcher, Martinique, 22 p. + annexes.

286. **Leone** F. & Lesales T. (2006) – Des cartes pour gérer le risque volcanique à la Martinique (Antilles françaises) – *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 16/3–4, pp. 341–358.

287. **Leone** F. & Mavoungo J. (2000) – *Séisme du 8 juin 1999. Martinique. Résultats de l'enquête post–sismique sur les personnes se trouvant à l'intérieur des bâtiments* – (www.prevention2000.org), 39 diapositives.

288. **Leone** F. & Pagneux E. (2007) – *Elaboration d'un jeu d'indicateurs de risques naturels et anthropiques sur l'Arc latin (Portugal, Espagne, France, Italie)* – Rapport final pour le compte de l'Association Arc latin et le Conseil Général de l'Hérault (Présentation, Atlas, Métadonnées), Equipe d'Accueil GESTER, Université Paul Valéry–Montpellier III, 209 p.

289. **Leone** F. & Velasquez E. (1997) – Analyse en retour de la catastrophe de la Josefina (Equateur, 1993) : contribution à la connaissance du concept de vulnérabilité appliqué aux mouvements de terrain – *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines*, Tome 25, N°3, pp. 461–478.

290. **Leone** F. & Velasquez E. (2002) – La catástrofe del deslizamiento de la Josefina (Ecuador, 1993) : algunas enseñanzas sobre la vulnerabilidad – In : José Lugo Hubp & Moshe Inbar (compiladores) : *Desastres Naturales en América Latina* – Ed. Fondo de Cultura Económica, Mexico, pp. 429–445.

291. **Leone** F. & Vinet F. (2006) – La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels – In : **Leone** F. & Vinet F. (dir.) : *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques – Géorisques*, n°1, coll. de l'Equipe d'Accueil GESTER, Ed. Publicatio ns de l'Université Paul–Valéry–Montpellier 3, pp. 9–25.

292. **Leone** F., Vinet F., Denain J.C., Bachri S. (sous presse, 2007) – Développement d'une méthodologie d'analyse spatiale des destructions consécutives au tsunami du 26 décembre 2004 (Banda Aceh, Indonésie). Premiers résultats pour l'élaboration de futurs scénarios de risque – *Géocarrefour* (numéro spécial risques et territoires), 20 p.

293. Lepointe E. (1984) – *Essai sur la réponse sociale à une catastrophe : La Soufrière de Guadeloupe en 1976* – Thèse de doctorat, Université de Paris X Nanterre, 975 p.

294. Lepointe E. (1999) – Le réveil du volcan de La Soufrière en 1976 : la population guadeloupéenne à l'épreuve du danger – In : *Les Catastrophes naturelles aux Antilles. D'une Soufrière à l'autre*, Ouvrage collectif, Ed. Karthala–CERC, Paris, pp. 15–74.

295. Leroy A. & Signoret J.P. (1992) – *Le risque technologique* – Collection "Que sais–je ?", Paris : PUF, 128 p.

296. Lesales T. (1994) – *La gestion des crises éruptives de la Montagne Pelée : 1792, 1851–52, 1902–1905, 1929–1932 : Quelles leçons pour demain ?* – BRGM Martinique, Rapport de stage, 38 p.

297. Lesales T. (1996) – *Une petite île des Antilles face à une crise volcanique sans précédent – Rapport de mission à Montserrat (British West–Indies)* – CIFEG, Orléans, 50p + Annexes.

298. Lesales T. (1999) – Zone d'abri et zone à risque : deux notions clés dans la gestion des crises volcaniques dans les Petites Antilles. Le cas de la Soufrière Hills (Montserrat) et de la Montagne Pelée (Martinique) – In : Dossier « Les Antilles, terres à risques », *Terres d'Amériques*, n°2, Ed. Karthala, Paris, pp.134–145.

299. Lesales T. (2005) – *La vulnérabilité des sociétés exposées aux risques volcaniques, le cas des Petites Antilles* – Thèse de doctorat, Géographie, Université des Antilles et de la Guyane, 370 p.

300. Lewis H.E., Roberts D.F., Edwards A.W.F. (1972) – Biological Problems, and Opportunities, of Isolation among the Islanders of Tristan da Cunha – *Population and Social Change*, edited by D.V. Glass and R. Revelle, London, pp. 383–417.

301. Lirer L. & Vitelli L. (1998) – Volcanic Risk Assessment and Mapping in the Vesuvian Area Using GIS – *Natural Hazards*, 17 (1), pp. 1–15.

302. Liu X. & Lei J. (sous presse) – A method for assessing regional debris flow risk : an application in Zhaotong of Yunnan province (SW China) – *Geomorphology*.

303. Longhurst R. (1995) – The assessment of community vulnerability in hazard prone areas, the Royal Society, London, 31 March 1995 – *Disasters*, Volume 19, Issue 3, pp. 269–270

304. LPC (1978) – Eboulements et chutes de pierre sur les routes : recensement des parades. – Groupe d'Etudes des Falaises (GEF) – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Rapport de Recherche LPC n°81, 252 p.

305. Lutoff C. (2000) – *Le système urbain niçois face à un séisme. Analyse des enjeux et des dysfonctionnements potentiels* – Thèse de doctorat de l'Université de Savoie, Chambéry, 382 p.

306. Mahue–Giangreco M., Wendy Mack, Seligson H., Bourque L. B. (2001) – Risk Factors Associated with Moderate and Serious Injuries Attributable to the 1994 Northridge Earthquake, Los Angeles, California – *Annals of Epidemiology*, No. 11, pp. 347–357.

307. Martin C. et al. (1993, 1994, 1996, 1997) – *Programme DIPCN / Antilles – Caraibes, projet GEMITIS (1993–1996) Pointe–à–Pitre et Fort–de–France* – Rapports BRGM R 37850, R 38244, R 38946, R 39384, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Fort–de–France.

308. Masson E. (2006) – Enquête post-crise et SIG pour une gestion de la vulnérabilité dans les zones inondées : application à l'échelle communale (Ivry-la-Bataille, Eure) – In : **Leone** F. & Vinet F. (dir.) : *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques*, Coll. Géorisques, n°1, Ed. Publications de l'Univer sité Montpellier III, pp. 81-88.

309. MATE & METL (1997) – *Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR). Guide général* – Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement et Ministère de l'Equipement, des Transports et du Logement, Ed. La documentation française, Paris, 76 p.

310. Mathot P. & Mariani T. (1994) – *Inondations : une réflexion pour demain* – Ed. de l'Assemblée Nationale, rapport n°1641.

311. Matsushita M. (1998) – Kobe water system and the 1995 Hansin–Awaji Earthquake – In: *Proceedings of the world Urban–Earthquake conference in Fukui*, Japan, June 1998, pp. 125–129.

312. Mavoungo J. (1997) – *Le risque sismique en Martinique : analyse et évaluation des principaux facteurs de vulnérabilité de la population urbaine. L'exemple de Fort–de–France* – Mémoire de maîtrise (TER), Département de géographie, Université des Antilles et de la Guyane, Martinique, 138 p.

313. Mavoungo J. (2000) – *La comportement des Martiniquais face à la construction et au risque sismique* – Rapport, Service Equipement des collectivités et qualité de l'ingénierie publique, DDE Martinique, 49 p.

314. Mavoungo J. (2006) – *La vulnérabilité des populations des Petites Antilles face au risque sismique : l'exemple principal de la Martinique. Aspects comportementaux, cognitifs, perceptifs ; gestion préventive de proximité et aménagement des espaces de vie* – Thèse de doctorat, Département de Géographie, Université des Antilles et de la Guyane, Martinique, 539 p.

315. Maxwell I. (1996) – Mount Ruapehu eruption 1995. Effects on the Taupo fishery. Tongariro – *The Annual Journal of the Tongariro Taupo Conservancy*, 5, pp. 46–48.

316. Mazzocchi M & Montini A. (2001) – Earthquake effects on Tourism in Central Italy – *Annals of Tourism Research*, No. 4, pp. 1031–1046.

317. Meadena G.T., Kochevb S., Kolendowiczc L., Kosa–Kissd A., Marcinonienee I, Sioutasf M., Toomingg H., Tyrrellh J. (2007) – Comparing the theoretical versions of the Beaufort scale, the T–Scale and the Fujita scale – *Atmospheric Research*, Volume 83, Issues 2–4, pp. 446–449.

318. Medvedev S., Sponheuer W., Karnik V. (1967) – Seismic Intensity scale version 1964 – *Pub. Inst. Geodyn*, 48, Iena.

319. MELTT (1996) – *Expertise pré–sismique de la vulnérabilité des maisons individuelles* – Rapport de mission SOCOTEC–CETE en Martinique et Guadeloupe, Ministère de l'Equipement, du Logement, des Transports et du Tourisme, 168 p.

320. Mengual P. (2005) – *Contribution à la caractérisation de la vulnérabilité des PME-PMI aux inondations, vers l'autodiagnostic* – Thèse, Ecole des Mines de Paris.

321. Menoni S. (2001) – Chains of damages and failures in a metropolitan environment: someobservations on the Kobe earthquake in 1995 – *Journal of Hazardous Materials*, Volume 86, Issues 1–3, pp. 101–119.

322. Merlin P. (1994) – *Les transports en France* – Notes et études documentaires, n°4986, Ed. La Documentation française, Paris.

323. Meroni F. & Zonno G. (2000) – Seismic Risk Evaluation – *Surveys in Geophysics*, 21 (2–3), pp. 257–267.

324. Météo France (1999) – *Atlas climatique. Le temps à la Martinique* – Ed. Météo France, Direction Interrégionale Antilles–Guyane, 104 p.

325. Metzger P. & D'Ercole R. (1999) – Political and scientific uncertainties in volcanic risk management: The yellow alert in Quito in October 1998 – *Geojournal*, volume 49, n°2, pp. 213–221.

326. Michellier C. (1999) – *L'évaluation des risques aux catastrophes naturelles en vue de leur prévention : l'utilité et l'utilisation de EM–DAT à une échelle mondiale et infra–nationale* – Mémoire de maîtrise (dir. P. Pigeon et R. D'Ercole), Département de Géographie, Université de Savoie, Chambéry, 193 p.

327. Ministry of Agriculture and Forestry of New Zealand (1999) – *Impact of a Volcanic Eruption on Agriculture and Forestry in New Zealand* – (http://www.maf.govt.nz/).

328. Mirgon C., Leroi E., Mouroux P., Bour M. (1993) – *Propagation en grande masse des mouvements de terrain : inventaire et analyse des modèles existants* – Rapport B.R.G.M. R37764 SGN/UPE/RNG, Marseille, 85 p.

329. Mitchell J.K. (1999a) – *Crucibles of Hazard: Mega–cities and disasters in transition Tokyo* – United Nation University Press.

330. Mitchell J. K. (1999b) – Megacities and natural disasters: a comparative analysis – *Geojournal*, vol. 49, no. 2, pp. 137–142.

331. Mitchell J.T. & Cutter S.L. (1997) – *Global Change and Environmental Hazards: Is the World Becoming More Disastrous?* – Washington, DC: Association of American Geographers.

332. Miyakoshi J., Hayashi Y., Tamura K., Fukuwa N. (1997) – Damage ratio functions for building using damage data of the Hyogo–ken Nanbu earthquake – In : *Proceedings 7th Int. Conf. Struct. Safety and reliability* (ICOSSAR'97), Kyoto.

333. MOC (1996) – *Outline of River Improvement Economic Research Investigation* – Technical Report, River Engineering Bureau, Ministry of Construction, Japan.

334. Monge O. et al. (1999) – *Projet GEMITIS Fort–de France 1998. Evaluation et réduction du risque sismique* – Rapport BRGM R 40631, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Fort–de–France.

335. Monmonier, M. (1997) – *Cartographies of Danger: Mapping Hazards in America* – University of Chicago Press, Chicago.

336. Mora S. (1992) – Analisis preliminar de la vulnerabilidad economica de la ciudad de Cartago. A causa de los efectos de una avalancha que transite por el rio Reventado. Costa Rica – In : *Actes Colloque Bogota*, pp. 571–592.

337. Moriconi–Ebrard F. & Dinard F. (2000) – L'urbanisation du littoral méditerranéen – *Mappemonde*, 57, 1, pp. 32–36.

338. Moriconi–Ebrard F. (2001) – *L'urbanisation en méditerranée de 1955 à 1995 : analyse régionale* – Les Cahiers du Plan Bleu, 55 p. (www.planbleu.org).

339. Mouroux P., Margon P., Pinte J.C. (1988) – *La construction économique sur sols gonflants* – BRGM–REXCOOP, Ed. du BRGM, Manuels et méthodes, N°14.

340. Munch P.A. (1964) – Culture and Superculture in a Displaced Community: Tristan da Cunha – *Ethnology*, 3 (4), pp. 369–376.

341. Murty T.S. & Loomis H.G. (1980) – A new objective tsunami magnitude scale – *Marine Geology*, 4, pp. 267–282.

342. Musson R.M.W. (2000) – Intensity–based seismic risk assessment – Soil Dynamics and *Earthquake Engineering*, No 20, pp. 353–360.

343. N'Jai, A., Tapsell, S.M., Taylor, D., Thompson, P.M., Witts, R.C., 1990. (1990) – Flood Loss Assessment Information Report – Middlesex Polytechnic Flood Hazard Research Centre, London, December.

344. Nations Unies (1979) – *Prévention et atténuation des catastrophes, le point des connaissances actuelles : aspects économiques* – Vol.7, New York.

345. Newhall C. G. & Self S. (1982) – The volcanic explosivity index (VEI): an estimate of explosive magnitude for historical volcanism – *Journal of Geophysical Research (Oceans and Atmosphere),* 87, pp. 1231–1238.

346. Ng'Walali P.M. , Koreeda A., Kibayashi K., Tsunenari S. (1999) – Fatalities by inhalation of volcanic gas at Mt. Aso Crater in Kumamoto, Japan – *Legal Medicine*, No. 1, pp. 180–185.

347. NHRC (1999) – *Risk Fontiers Damage Scales* – Macquarie University New South Wales, 2109, Australia.

348. Nolan M.L. (1972) – *The towns of the volcano: a study of the human consequences of the eruption of Parícutin volcano* – Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station.

349. Nolan M.L. (1979) – Impact of Parícutin on Five Communities – in: *Volcanic activity and Human Ecology*, edited by P.D. Sheets and D.K. Grayson. New York, Academic Press. pp. 293–335.

350. Nolan M.L. & Nolan S. (1993) – Human Communities and their Responses – in: *Parícutin: The Volcano Born in a Mexican Cornfield*, edited by J.F. Luhr and T. Simkin. Phoenix: Geoscience Press Inc, pp. 189–214.

351. NRC (National Research Council) (1999) – *The Impacts of Natural Disasters: A Framework for Loss Estimation* – National Academy Press, Washington, DC.

352. Oak Ridge National Laboratory (ORNL) (2004) – LandScan™ Global Population Database, (http://www.ornl.gov/landscan.

353. Oike K. (1991) – A discussion on the relation between magnitude and number of deaths by earthquakes – In: *Proc. Int. Seminar on Earthquake and Hazard Mitigation Technology*, Tsukuba, Japan, pp. 333–341.

354. Oliver–Smith A. (1977) – Traditional Agriculture, Central Places, and Post–Disaster Urban Relocation in Peru – *American Ethnologist*, 4, pp. 102–116.

355. Oliver–Smith A. (1979a) – Disaster Rehabilitation and Social Change in Yungay, Peru – *Human Organization*, 36 (1), pp. 5–13.

356. Oliver–Smith A. (1979b) – The Yungay Avalanche of 1970: Anthropological Perspective on Disaster and Social Change – *Disasters*, 3 (1), pp. 95–101.

357. Oliver–Smith A. (1992) – *The Martyred City: Death and Rebirth in the Andes* – 2nd ed. Prospect Park: Waveland Press.

358. ONU/DHA (2000) – *Glossaire international multilingue agréé de termes relatifs à la gestion des catastrophes* – Nations Unies, Département des affaires humanitaires, 81 p. Genève.

359. Ourdouillie D. (2005) – *Séisme en Guadeloupe du 21 novembre 2004. Retour d'expérience* – Mémoire de spécialité de Master 1 « Gestion des Catastrophes et des Risques Naturels », Département de Géographie, Université Paul Valéry – Montpellier III, 72 p.

360. Pagneux E. (2006) – *Contribution à l'élaboration d'indicateurs de risques et de développement durable sur le territoire de l'Arc Latin* – Rapport de stage effectué au sein du Laboratoire GESTER, Université Montpellier III, spécialité de Master 2 « Gestion des Catastrophes et des Risques Naturels », Département de Géographie, Université Paul Valéry – Montpellier III, 66 p. + atlas cartographique, 34 p.

361. Pagney F. & Suédois J. (1999) – Connaissances et perceptions du risque cyclonique en contexte micro insulaire (Terre de Haut des Saintes) – In : *Terres d'Amérique*, n°2, Editions Karthala et Géode–Caraïbe, pp.61–80.

362. Panizza M ., Corsini A., Marchetti M., Pasuto A., Silvano S., Soldati M. (2002) – Landslide risk mapping in Italy : an example of pilot study for a municipality of South Tyrol – In : *Actes du colloque international « Risques naturels et aménagement en Europe »*, 22–25 octobre 2002, Paris, pp. 25–28.

363. Papadopoulos G. & Imamura F. (2001) – A proposal for a new tsunami intensity scale – In: *ITS 2001 Proceedings*, Session 5, Number 5–1, 569–577. (http://geology.about.com/).

364. Pareschi M. T., Cavarra L., Favalli M., Giannini F., Meriggi A. (2000) – GIS and Volcanic Risk Management – *Natural Hazards*, 21 (2–3), pp. 361–379.

365. Pate (1980) – Loss estimation from earthquake shaking in California – In: *Proceedings 7th World Conference in Earthquake Engineering*, Istambul, pp. 301–306.

366. Paton D., Millar M., Johnston D. (2001) – Community Resilience to Volcanic Hazard Consequences – *Natural Hazards*, 24 (2), pp. 157–169.

367. Peek–Asa C, Ramirez M.R., Shoaf K., Seligson H., Kraus J.F. (2000) – GIS mapping of earthquake related deaths and hospitals admissions from the 1994 Northridge, California, earthquake – *Annals of Epidemiology*, Vol. 10, No 1, pp. 5–13.

368. Péray E. (1991) – *Le chapelier pirate* – Ed. Seghers, Paris, 379 p.

369. Peretti–Watel P. (2000) – *La sociologie du risque* – Ed. Armand Colin, Collection U, Série sociologie, Paris, 286 p.

370. Peretti–Watel P. (2001) – *La société du risque* – Repère, Ed. La découverte, 124 p.

371. Philipponnat G. (1978) – Désordres dus à la présence de sols gonflants dans la région parisienne – *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des travaux publics*, n°364, pp. 2–15.

372. Pico L. (2006) – *Géographie et Assurance. Le risque sismique dans les espaces urbains mal documentés. Le cas de Beyrouth* – Thèse de doctorat, Université Paris IV, 494 p.

373. Pigeon P. (1991) – *L'homme face au risque lié aux glissements de terrain dans le massif préalpin du Chablais et son piedmont* – Thèse de doctorat, spécialité Géographie, Université Joseph Fourier, Grenoble, 351 p.

374. Pigeon P. (2005) – *Géographie critique des risques* – Ed. Économica, collection Anthropos, Paris, 217 p.

375. Plan Bleu (2001) – *L'étalement urbain en Méditerranée* – Rapport, 6 p. (www.planbleu.org)

376. Planat (2003) – *Stratégie « Dangers naturels en Suisse »* – Rapport de synthèse. OFEG, Bienne, Suisse, 89 p.

377. PNUD (2004) – *La réduction des risques de catastrophes. Un défi pour le développement* – Rapport du programme des Nations Unies pour le développement, Bureau pour la prévention des crises et du relèvement, New York, USA, 159 p. (www.undp.org/bcpr).

378. Pomonis A., Spence R., Baxter P. (1999) – Risk assessment of residential buildings for an eruption of Furnas Volcano, São Miguel, the Azores – *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 92, Issues 1–2, pp. 107–131.

379. Porfiriev B. (1995) – Disaster and Disaster Areas: Methodological Issues of Definition and Delineation – *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, vol. 13, pp. 285–304.

380. Pottier N. (2007) – L'enquête et le diagnostic de vulnérabilités, outils de connaissance des risques et de prévention aux échelons individuels et collectifs – In : *Actes du colloque « Géographes et assureurs face aux risques naturels »*, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, 6 avril 2006, Ed. MAIF, pp. 134-165.

381. Pratt C.R., Kaly U.L., Mitchell, J. (2004) – Manual: How to Use the Environmental Vulnerability Index (EVI) – SOPAC Technical Report 383, 60 p., 1 appendix, 2 figures, United Nations Environment Programme (UNEP). South Pacific Applied Geoscience Commission (SOPAC) (http://www.sopac.org/evi).

382. Provitolo D. (2002) – *Risque urbain, catastrophes et villes méditerranéennes* – Thèse de doctorat, Université Nice-Sophia Antipolis, 365 p.

383. Qi G. Z. (1994) – Performance of gas line shutoff valves in Los Angeles urban during earthquakes – In: Z. Hou, S. Takada, L. Wangs (Eds.), *Proceedings of the Second China–Japan Trilateral Symposium on Lifeline Earthquake Engineering*, 1994, pp. 237–245.

384. Quarantelli E.L. (1985) – What Is Disaster: The Need for Clarification in Definition and Conceptualization in Research – in: *Disasters and Mental Health*, Barbara J. Sowder (ed.). Washington, D.C.: U.S. Department of Health and Human Services, National Institute of Mental Health, pp. 41–73

385. Quenet G. (2005) – *Les tremblements de terre aux XVIIe et XVIIIe siècles. La naissance d'un risque* – Seyssel, Champ Vallon, 587 p.

386. Rasmussen (1974) – *Reactor Safety study. An assessment of accident risk in U.S. commercial power plants* – USAEC report WASH 1400.

387. Rees J.D. (1970) – Parícutin revisited: a review of man's attempts to adapt to ecological changes resulting from volcanic catastrophe – *Geoforum*, 4, pp. 7–25.

388. Reese S., Cousins W.J., Power W.L., Palmer N.G., Tejakusuma I.G., Nugrahadi S. (2007) – Tsunami vulnerability of buildings and people in South Java. Field observations after the July 2006 Java tsunami – *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*., 7, pp. 573–589.

389. Refai W. (2007) – *Conception et développement d'un Atlas Interactif en ligne pour l'étude des Risques Naturels en Méditerranée* – Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme national d'ingénieur en sciences appliquées et en technologie, filière génie logiciel, Ecole Nationale des Sciences Appliquées et de Technologie de Tunisie, stage effectué au sein du laboratoire GESTER (Université Montpellier III) (dir. F. **Leone**), 60 p.

390. Reghezza M. (2006) – *Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine : la métropole parisienne face au risque de crue centennale* – Thèse de géographie, Université Paris X Nanterre, 384 p.

391. Reghezza M. (2006) – La vulnérabilité : un concept problématique – In : **Leone** F. & Vinet F. (dir.) : *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques*, Coll. Géorisques, n°1, Ed. Publications de l'Unive rsité Montpellier III, pp. 35-40.

392. Richter C. F. (1935) – An instrumental earthquake magnitude scale – *Bulletin of the Seismological Society of America*, 25, pp. 1–32.

393. Risk Management Solutions, Inc. (RMS) (1995a) – *What if the 1906 earthquake strikes again? A San Francisco Bay area scenario* – Topical Issues Series, RMS, Menlo Park, California, USA.

394. Risk Management Solutions, Inc. (RMS) (1995b) – *What a major earthquake strikes the Los Angeles area?* – Topical Issues Series, RMS, Menlo Park, California, USA.

395. Risk Management Solutions, Inc. (RMS) (1995c) – *What if the 1923 earthquake strikes again? A five prefecture Tokyo region scenario* – Topical Issues Series, RMS, Menlo Park, California, USA.

396. RISK–UE (2003) – *An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns* – Rapport, Projet Européen, EVK4–CT–2000–00014.

397. Ritchie A.M. (1963) – The evaluation of rockfall and its control – *Highway Record*, Vol. 17, pp. 13–28.

398. Roca A., Goula X., Susagna T., Gonzales M., Chavez J. (nd) – Earthquake risk assessment and damage scenarios mapping: application to Catalonia – In: *Proceedings of the Third congress on regional geological cartography and information systems* – Source Internet, pp. 258–260.

399. Roces M.C., White M.E., Dayrit M.M., Durkin M.E. (1992) – Risk factors for injuries due to the 1990 earthquake in Luzon, Philippines – *Bull. World Health Orga*., N°70, pp. 509–514.

400. Rochet L. (1987) – Application des modèles numériques de propagation à l'étude des éboulements rocheux – *Bull. Liaison Labo. des Ponts et Chaussées*, N° 150–151, spécial Risques Naturels, pp. 84–95.

401. Rogers A. M., Algermissen T., Hays W. W. (1976) – *A study of earthquake losses in the Salt Lake City, Utah Area* – Open file report 76–89, USGS, Washington DC.

402. Rogers G. (1981) – The Evacuation of Niuafo'ou, an Outlier in the Kingdom of Tonga – *The Journal of Pacific History,* 16 (3), pp. 149–163.

403. Rose A., Lim D. (2002) – Business interruption losses from natural hazards: conceptual and methodological issues in the case of the Northridge earthquake – *Environmental hazards*, No. 4, pp. 1–14.

404. Rosentahl U. (1998) – Future Disasters, Future Definitions – in: *What Is A Disaster?* E.L. Quarantelli (ed.), London and NY: Routledge, Chapter 13, pp.146–159.

405. Ruin I. & Lutoff C. (2004) – Vulnérabilité face aux crues rapides et mobilités des populations en temps de crise – *La Houille Blanche*, Publication de la Société Hydrotechnique de France, N°6.

406. Saarinen T.F. & Sell J.L. (1985) – *Warning and response to the Mount St. Helens eruption* – State University of New York Press, Albany, 240 p.

407. Salagnac J.L. & Bessis B. (2006) – Réduire la vulnérabilité des bâtiments en zone inondable – *Géorisques*, n°1, coll. de l'Equipe d'Accueil GESTER, Ed. Publicatio ns de l'Université Paul–Valéry–Montpellier 3, pp. 199-124

408. Samardjieva E. & Badal J. (2002) – Estimation of the expected number of casualties caused by strong earthquakes – *Bull. Seism. Soc. Am*. 92, pp. 2310–2322.

409. Samardjieva E. & Oike K. (1992) – Modelling the number of casualties from earthquakes – *J. Nat. Disaster Sci*, XIV 1, pp. 17–28.

410. Sanderson D. (nd) – *Villes, catastrophes naturelles et moyens de subsistance* – Rapport pour le compte de l'ONG Care International, 16 p. (www.carefrance.org).

411. Sarant P.M. (dir.), de Vanssay B., **Leone** F., Asselin de Beauville C., Pontikis C., Pagney F., Koussoula–Bonneton A., Colbeau–Justin L., Schick O., Lesales T., Gaspard G., Pollion G., Legrand E., Jean–Marius L., Benito–Espinal E., Boyer O., Faure Y. (2003) – *Retour d'expérience sur la prise de décision et le jeu d'acteurs : le cas du cyclone Lenny dans les Petites Antilles au regard du passé* – Rapport final du programme « Evaluation et prise en compte des risques naturels et technologiques », Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (M.E.D.D.), Paris, 332 p. (http://perso.orange.fr/coris–sarant/index.htm).

412. Sassa K. (1988) – Geotechnical model for the motion of landslides – Special lecture, In: *Proc. 5th Int. Symp. Landslides*, Lausanne, Vol. 1, p. 37–55.

413. Satgé A. (2006) – *Evaluation du risque volcanique à travers la prise en compte de la vulnérabilité des populations. Etude du niveau de connaissance et du comportement potentiel de la population face à une future éruption du Vésuve* – Mémoire de spécialité de Master 1 « Gestion des Catastrophes et des Risques Naturels », Département de Géographie, Université Paul Valéry – Montpellier III, 85 p.

414. Sauret B. (1987) – Coulées de débris canalisées. Compte rendu bibliographique – *Bull. Liaison Labo. des Ponts et Chaussées*, N°150–151, spécial Risques Naturels, pp. 65–77.

415. Schmidt–Thomé P. (ed.) (2006) – *The Spatial Effects and Management of Natural and Technological Hazards in Europe* – Rapport du Projet ESPON 1.3.1 (European Spatial, Geological Survey of Finland (coord.), 198 p. (www.espon.lu).

416. Schoeneich P. & Busset–Henchoz M.C. (1998) – Les Ormonans et les Leysenouds face aux risques naturels. Représentation des risques naturels et stratégies d'occupation du territoire dans la vallée des Ormonts (Préalpes vaudoises) – In : *Rapport final PNR 31*, 228p, 62 fig. et photos, Vdf Hochschulverlag, EPF Zurich, Suisse.

417. Schwimmer E.G. (1969) – *Cultural consequences of a volcanic eruption experienced by the Mount Lamington Orokaiva* – Department of Anthropology Report Number 9, University of Oregon, Eugene.

418. Schwimmer E.G. (1977) – What Did the Eruption Mean? – In: *Exiles and Migrants in Oceania*, edited by M.D. Leimer. Honolulu: University of Hawaii Press, pp. 296–341.

419. Sedan O. et al. (1998) – Atlas communaux des risques naturels de la Martinique – Rapports BRGM R40177 à R40207, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Fort–de–France et édition Internet, site www.brgm.fr/risques/antilles (possibilité de téléchargement des cartes pour une utilisation sous SIG).

420. Sedan O. & Mompelat J.M. (1996) – *Microzonage sismique des communes de Schoelcher, Fort–de–France et Le Lamentin : Base de données cartographique et évaluation de l'aléa mouvements de terrain* – Rapport BRGM N 2301, 23 p., Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Fort–de–France.

421. SERGISAI Working Group (1998) – Assessing seismic risk at different Geographical scales: Concepts, tools, and procedures – In: *Proceedings 11th European Conference on Earthquake Engineering*, 6–11 September, Paris, Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5410 982 3, CD–ROM.

422. Shih F.J., Liao Y.C., Chan S.M., Duh B.R., Gau M.L. (2002) – The impact of the 9–21 earthquake experiences of Taiwanese nurses as rescuers – *Social Science & Medicine*, No. 55, pp. 659–672.

423. Shinozuka M., Chang S.E., Eguchi R.T., Abrams D.P., Hwang H.H.M., Rose A. (1997) – Advances in earthquake loss estimation and application to Memphis, Tennessee – *Earthquake Spectra*, No. 13 (4), pp. 739–758.

424. Schoeneich P. & Busset-Henchoz M-C. (1998) – La dissonance cognitive : facteur explicatif de l'accoutumance au risque – Revue de Géographie Alpine 1998, nº2, tome 86, pp. 53–62.

425. Shuto (1991) – Tsunami intensity and disasters – In: *Tsunamis in the world* (S. Tinti ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 197–216.

426. Sieberg A. (1927) – *Geologische, physikalische und angewandte Erdbebenkunde* – Verlag von Gustav Fischer, Jena.

427. Simpson D. M. & Katirai M. (2006) – *Measurement and Indicators for Disasters: Topical Bibliography* – Working Paper # 06–01, University of Louisville, KY, Center for Hazards Research and Development, 12 p. (http://hazardcenter.louisville.edu).

428. Simpson R. H. & Riehl H. (1981) – *The Hurricane and Its Impact* – Louisiana State University Press, Baton Rouge, LA.

429. Sinozuka M. (1998) – Development of Bridge Fragility Curves – In: *Proceedings of the Joint US–Italy Workshop on Seismic Protective Systems for Bridges*, New York: Columbia University, April 26–28.

430. Soloviev S.L. (1970) – Recurrence of tsunamis in the Pacific – In : *Tsunamis in the Pacific Ocean*, W.M. Adams Ed., East–West Center Press, Honolulu, pp. 149–163.

431. Spence R.J.S. & D'Ayala D. (1999) – *Damage Assessment and Analysis of the 1997 Umbria–Marche Earthquakes* – Report, Structural Engineering International, 3/99, pp. 229–233.

432. Spence R.J.S. et al. (1998) – Estimating Human Casualties in Earthquakes : the Case of Wellington, New Zealand – In: *Seismic Design Practice into the Next Century*, Balkema, Amsterdam, pp. 277–288.

433. Spence R.J.S., Coburn A.W., Pomonis A. (1992) – Correlation of ground motion with building damage : the definition of a new damage–based seismic intensity scale – Earthquake Engineering, Tenth World Conference, Balkema, Rotterdam, Vol.1, pp.551–556.

434. Spence R.J.S., Pomonis A., Baxter P.J., Coburn A.W., White M., Dayrit M. and Field Epidemiology Training Program Team (1996) – Building Damage Caused by the Mount Pinatubo Eruption of June 15, 1991 – In: Newhall (C.G.), Punongbayan (R.S.) Eds., *Fire and mud : Eruptions and lahars of Mt Pinatubo*, Philippine, University of Washington Press, Seattle.

435. Srivichai S., Chidtong Y., Supratid S., Shuto N. (2005) – The 2004 Sumatra tsunami: Deaths and damages to buildings at the Kamala beach, Phuket, Thailand – Powerpoint presentation. (http://tsunami.ait.ac.th/tsunami–forum/Program.html).

436. Steinbrugge K. V., Algermissen S. T., Lagorio H. J., Cluff L. S., Degenkolb H. J. (1981) – Metropolitan San Francisco and Los Angeles earthquake loss studies – Open file report 81–113, USGS, 46 p.

437. Stewart M.G. (2003) – Cyclone damage and temporal changes to building vulnerability and economic risks for residential construction – *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 91, No. 5, pp. 671–691.

438. Stieltjes L. & Mirgon C. (1998) – *Approche méthodologique de la vulnérabilité aux phénomènes volcaniques. Test d'application sur les réseaux de la Martinique* – Rapport de synthèse, R 40098, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Marseille, 218 p.

439. Tavakoli B., Tavakoli S. (1993). – Estimating the vulnerability and loss functions of residential buildings – *Natural Disasters*, N°7, pp.155–171.

440. Tayag J.C., Insauriga S.I. (1992) – Organizational response to the July 1990 Luzon earthquake disaster – In: *Inter–agency Committee for Documentation and Establishing Database on the July 1990 Earthquake*, The July 16, 1990, Luzon Earthquake : a technical monograph. Inter–agency Committee for Documentation and Establishing Database on the July 1990 Earthquake, Manila, pp. 239–260.

441. Tayag J.C., Insauriga S.I., Ringor A., Belo M. (1996) – People's response to eruption warning : the Pinatubo experience, 1991–1992 – In: Newhall (C.G.), Punongbayan (R.S.) Eds., *Fire and mud : Eruptions and lahars of Mt Pinatubo, Philippines*. University of Washington Press, Seattle, pp. 87–106.

442. Theys J. (1991) – *Conquète de la sécurité, gestion des risques* – Postface in : Dourlens, Galland, Theys, Vidal–Naquet, L'Harmattan, Paris.

443. Thomas A. (1975) – Analyse, estimation et cartographie des risques en géotechnique. Application à la planification urbaine – *Sciences de la Terre*, Tome XX, n° 2, pp. 201–218.

444. Thorarinsson S. (1979) – On the damage caused by volcanic eruptions with special reference to tephra and gases – In: Sheets, P.D., Grayson, D.K. (eds.), *Volcanic activity and human ecology*, Academic Press, New York, pp. 125–159.

445. Thouret J.C. (2003) – Evaluation, prévention et gestion des risques naturels dans les villes d'Amérique latine – In : Y. Veyret (dir.) : *Les risques*, Coll. Dossiers des images économiques du Monde, Ed. Sedes, Paris, pp. 63-87.

446. Thouret J–C. & D'Ercole R. (1996) – Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales – *Cahiers des Sciences humaines*, 32 (2), pp. 407–422.

447. Thouret J.C. & **Leone** F. (2003) – Aléas, vulnérabilités et gestion des risques naturels – In : *Questions de Géographie. Les Risques* (V. Moriniaux, dir.) – Editions Du Temps, Paris, pp. 37–70.

448. Tipple G. (2005) – Housing and Urban Vulnerability in Rapidly–Developing Cities – *Journal of Contingencies and Crisis management*, vol. 13, No. 2, pp. 66–75.

449. Tobin G.A. (1999) – Sustainability and community resilience: the holy grail of hazards planning? – *Environmental Hazards*, 1, pp. 13–25.

450. Tol R.S.J. (2002) – Estimates of the Damage Costs of Climate Change, Part II. Dynamic Estimates – *Environmental and Resource Economics*, 21 (2), pp. 135–160.

451. Tomita Y., Hagashi Y., Ieda H., Nakagawa D. (1995) – *The transport behavioral analysis after the Hyogoke–Nambu earthquake for the reduction of motor transportation* – Research paper, Kobe, Japan.

452. Tonkinson R. (1968) – *Maat village, Efate: a relocated community in the New Hebrides* – Department of Anthropology, University of Oregon, Eugene.

453. Tonkinson R. (1977) – The exploitation of ambiguity: a New Hebrides case – in: Leimer, M.D. (Ed), *Exiles and migrants in Oceania*, University of Hawaii Press, Honolulu, pp. 269–295.

454. Tonkinson R. (1985) – Forever Ambrymese? Identity in a relocated community, Vanuatu – *Pacific Viewpoint*, Vol. 26 No. 1, pp. 269–295.

455. Torres–Vera M. A. & Canas J. A. (2003) – A lifeline vulnerability study in Barcelona, Spain – *Reliability Engineering and System Safety*, No. 80, pp. 205–210.

456. Torterotot, J.P., (1993) – *Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyse des incertitudes* – Thèse de l'ENPC–CERGRENE, Noisy–le–Grand.

457. Toulemont M. (1994) – Le risque sécheresse : la réparation des dommages et la prévention des risques – *Aménagement et Nature*, Les risques naturels, N°112, pp. 12–13.

458. Turner B.L. (1978) – *Man–Made Disasters* – Londres, Wykeham Publications.

459. Turner B.L., Kasperson R.E., Matson P.A., McCarthy J.J., Corell R.W., Christensen L., Eckley, N., Kasperson J.X., Luers A., Martello M.L., Polsky C., Pulsipher A., Schiller. A. (2003) – A framework for vulnerability analysis in sustainability science – In: *Proceedings of the National Academy of Sciences.* vol. 100, no. 14, pp. 8074–8079. (http://yaquivalley.stanford.edu).

460. University of Delaware (1990) – Public perception of volcano hazard at Mt. St. Helens – In: *UN, NSF, CNR, GNDCI, WARREDOC, DRC, Geneva Ricerche, Prediction and perception of Natural hazards. International Conference*, Perugia, Oct. 22–26, 1990.

461. Ursulet L. (1994) – *La destruction de Saint–Pierre par la Montagne Pelée : antécédents et conséquences socio–économiques et politiques sur la vie de la Martinique* – Thèse de Doctorat, Université des Antilles–Guyane.

462. Ursulet L. (1997) – *Le désastre de 1902 à la Martinique. L'éruption de la Montagne Pelée et ses conséquences* – Ed. L'Harmattan, Paris, 472 p.

463. Van Wassenhove W. (2004) – *Définition et opérationalisation d'une Organisation Apprenante (O.A.) à l'aide du Retour d'Expérience. Application à la gestion des alertes sanitaires liées à l'alimentation* – Thèse en Génie Bio–Industriel, ENGREF, Paris, 266 p. (pastel.paristech.org/bib/archive/00001157/01/vanwassenhove.pdf).

464. Varnes D.J. (1984) – Landslides hazard zonation: A review of principles and practice – *Natural Hazards*, n°3, UNESCO, 63 p.

465. Veyret Y. (2004) – *Géographie des risques naturels en France. De l'aléa à la Gestion* – Ed. Hatier, Paris, 251 p.

466. Veyret Y. & Reghezza M. (2006) – Risques, assurance et vulnérabilité – In : *Actes du colloque « Géographes et assureurs face aux risques naturels »*, Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines, 6 avril 2006, Ed. MAIF, pp. 21-35.

467. Vinet F. (1994) – Les dégâts de la grêle sur les cultures : cartographie de l'averse du 1er juin 1993 dans le Saumurois – *Mappemonde*, No. 4, pp. 41–43.

468. Vinet F., Denain J.–C., Gaillard J.–C., Clavé E., **Leone** F., Giyarsih S., Bachri S. (2006) – Enjeux et modalités spatiales de la reconstruction post–tsunami à Banda Aceh – In : Lavigne F. & Paris R. (dir.) : *Rapport scientifique du programme Tsunarisque (2005–2006) sur le tsunami du 26 décembre 2004 en Indonésie* – Délégation Interministérielle pour l'aide Post–Tsunami (DIPT), Ambassade de France en Indonésie, Centre National de la Recherche Scientifique, Paris, 227−259.

469. Voight B. (1990) – The 1985 Nevado del Ruiz volcano catastrophe: anatomy and retrospection – Journal of Volcanology and Geothermal Research, N°44 , pp. 349–386.

470. Walker B., Holling C.S., Carpenter S.R., Kinzig A. (2004) – Resilience, Adaptability and Transformability in Social Ecological Systems – *Ecology and Society,* 9 (2), 5 p. (http://www.ecologyandsociety.org).

471. Wang L.R.L., Wang J. C. C., Ishibashi I. (1991) – *GIS applications in seismic loss estimation model for Portland, Oregon water and sewer systems* – US Geological Survey, Open File Report, 71 p.

472. Watts M.J. & Bolhe H.G (1993) – The Space of Vulnerability: The Causal Structure of Hunger and Famine – *Progress in Human Geography*, 17(1), pp. 43–67.

473. Webb J. D. C., Elsom. D. M., Reynolds D. J. (2001) – Climatology of severe hailstorms in Great Britain – *Atmospheric Research*, 56, pp. 291–308.

474. Westercamp D. & Tazieff H. (1980) – *Guides géologiques régionaux : Martinique, Guadeloupe, Saint–Martin, la Désirade* – Masson, Paris, 135 p.

475. White, G. F. (1973) – *Natural Hazards Research* – In: Chorley R. J.: *Directions in Geography*, Ed. Methuen & Co Ltd, London, pp. 193–249.

476. White G. F. (1974) – *Natural Hazards: Local, National, Global* – Oxford University, Press, Oxford, 288 p.

477. White G. F. & Haas E. (1975) – *Assessment of Research on Natural Hazards* – MIT Press, Cambridge, M.A., 487 p.

478. Whitman R. V. et al. (1974) – Earthquake damage probability matrices – In: Proceedings 5th World Conference on Earthquake Engineering (Rome, 1973), EAEE: Rome, 2, pp. 2531–2540.

479. Wisner B. (1993) – Disaster Vulnerability: Scale, Power, and Daily Life – *GeoJournal* 30(2), pp. 127–140.

480. Wisner B. (1998) – Marginality and vulnerability : Why the homeless of Tokyo don't `count' in disaster preparations – Applied Geography, Volume 18, Issue 1, pp. 25–33.

481. Wisner B. (2004) – Assessment of Capability and Vulnerability – In: Bankoff G., Frerks G., Hilhorst, D. (Eds.): *Mapping Vulnerability, Disasters, Development and People*, Earthscan Publishers, London. Earthscan, pp. 183–193.

482. Wisner B., Blaikie P., Cannon T., Davis. I. (2004) – *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters* – 2nd. Ed., London, Routledge.

483. Witham C.S. (2005) – Volcanic disasters and incidents: A new database – *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148, pp. 191– 233.

484. Wood H.O. & Neumann F. (1931) – Modified Mercalli Intensity scale of 1931 – *Bulletin of the Seismological Society of America*, 21, pp. 277–283.

485. Wybo J.L. (2001) – Comment apprendre du retour d'expérience sur la gestion des crises ? – In : *Actes de la table ronde « Sécurité civile et gestion des risques naturels, Problématique, Conseils et Solutions Technologiques »*, Journées Méditerranéennes pour la Prévention des Risques Naturels – 6 & 7 Décembre 2001, 5 p. (www.geri–forum.org/fr/Geri2001/actesGeri/D03_Wybo.pdf).

486. Wybo J.L., Colardelle C., Guinet V., Denis–Rémis C. (2002) – L'Erika : l'exemple d'une gestion de crise – *Revue de la Gendarmerie Nationale*, n°205, Décembre 2002.

487. Yamazaki F. & Murao O. (2000) – Vulnerability functions for Japanese building based on damage data from the 1995 Kobe earthquake – In: Elnashai A.S. and Antoniou S. (eds), *Implication of Recent Earthquakes on Seismic Risk*, Imperial College Press, pp. 91–102.

488. Zacek M. (1998) – *Construire parasismique : Risque sismique, conception parasismique des bâtiments* – Ed. Parenthèses, Marseille, 1998, 340 p.

489. Zihri. G. (2004) – *Risques liés aux ouvrages souterrains : constitution d'une échelle de dommages* – Thèse, Ecole nationale supérieure des mines de Nancy, 231 p. (http://www.mines.inpl–nancy.fr/laego/Risques/docs/thesezihrifinal.pdf).

***

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier vivement les personnes suivantes, pour leur gentillesse, leur disponibilité, leurs conseils, leur soutien :

Alain Morel, Ali El Samad, Albert Colas, Aline Gherardi, Christian Rey, Claude Pellier, Colette Médouze, David Lefèvre, Elkin Velasquez, Franck Lavigne, Françoise Pagney, Freddy Vinet, Gilbert Gherardi, Gilles Hubert, Jack Leone, Jean-Charles Denain, Jean-Christophe Gaillard, Jean-Claude Thouret, Jean-Marie Miossec, Jean-Pierre Asté, Lahcen Ben Mohammadi, La famille Lesales, Laurent Chapelon, Marie-Paule Leone, Mario Rey, Martine Fabre, Maurice Burac, Michel Desse, Monique Gherardi, Nancy De Richemond, Pierre Usselmann, Raffaele Cattedra, Robert D'Ercole, Stéphanie Defossez, Thierry Lesales, Tony Rey, Yvette Veyret.

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION

Figure I.1. Localisation des 402 millions de personnes vivant à moins de 50 km d'un des 1521 volcans actifs émergés du globe (activité au cours de l'Holocène) (54 % au pied de volcans ayant eu une période d'activité historique)....9
Figure I.2. Deux grandes approches d'évaluation des vulnérabilités....12

PARTIE 1

Figure 1.1. Répartition des références exploitées en fonction des disciplines impliquées par type de recherche (individuelle ou collective) (Ledoux & Leone, 2002). 20

Figure 1.2. Répartition des références en fonction des thèmes qui y sont traités (Leone & Ledoux, 2003). 21
Figure 1.3. Schéma de synthèse des différentes approches d'évaluation des vulnérabilités aux catastrophes naturelles. 30

PARTIE 2

Figure 2.1. La démarche méthodologique suivie dans le cadre du retour d'expérience interactif et systémique sur le cyclone Lenny aux Antilles (1999).....45
Figure 2.2. Moments clés analysés dans le cadre du retour d'expérience mené consécutivement à l'éruption et aux lahars du volcan Pinatubo aux Philippines de 1991 à 2001 (Gaillard & Leone, inédit).....47
Figure 2.3. Les étapes et enseignements recherchés dans le cadre d'un retour d'expérience sur l'endommagement (Leone et al., 1995).....48
Figure 2.4. Identification de l'intensité moyenne du séisme du 8 juin 1999 ressenti en Martinique à partir de l'analyse statistique de ses effets physiques (Leone & Mavoungo, 1999).....49
Figure 2.5. Phénomènes induits par le glissement de terrain de la Josefina (Equateur, 1993) et processus d'endommagement associés (Leone& Velasquez, 1997). 50
Figure 2.6. Modèle conceptuel du système vulnérable....59
Figure 2.7. Carte de vulnérabilité humaine synthétique face aux lahars intégrant différents facteurs de représentation du risque. Secteur de la rivière Pasig-Potrero, Pinatubo, Philippines (Gaillard, D'Ercole et Leone, 1998).....63
Figure 2.8. Qualité des comportements potentiels face aux lahars dans la bassin de la rivière Pasig-Potrero (Pinatubo, Philippines) (Gaillard, D'Ercole et Leone, 1998)....64
Figure 2.9. Distribution spatiale de l'échantillon retenu pour l'enquête sur le vécu et la représentation du risque cyclonique aux Antilles (cyclone Lenny). 67
Figure 2.10. L'île de la Martinique dans son contexte géodynamique actif. 1 : failles transformantes ; 2 : zones de subduction ; 3 : dorsales ; 4 : sens et vitesses moyennes annuelles de déplacement des plaques tectoniques (modifié d'après Westercamp et Tazieff, 1980, in Leone, 2004).....68
Figure 2 .11. Trajectoires historiques des ouragans sur les Petites Antilles entre 1890 et 2007....69
Figure 2.12. La Montagne Pelée surmontant la baie de Saint-Pierre de la Martinique. Photo prise le 8 mai 2002, 100 ans après la catastrophe volcanique qui a fait 29 000 morts (Photo M. Desse).....71
Figure 2.13. Synthèse cartographique des principaux évènements naturels dommageables ayant affecté la Martinique dans la période historique documentée. En rouge : cas étudiés. 72
Figure 2.14. Emprise spatiale des aléas naturels en Martinique. Contraintes pour l'aménagement du territoire (Leone, 2002).....74

Figure 2.15. Le quartier très vulnérable de Trenelle à Fort-de-France, caractérisé par de l'auto-construction (photo M. Gherardi, 2006)....76
Figure 2.16. Cartographie des aléas volcaniques associés à une future éruption maximale crédible de la Montagne Pelée (adapté d'après des données de Stieltjes & Mirgon, 1998)....79
Figure 2.17. Le zonage réglementaire proposé dans le cadre du PPR volcan de la Martinique....81
(Leone & Lesales, 2002).....81
Figure 2.18. Illustration de la mauvaise prise en compte des menaces naturelles dans les projets d'aménagement futurs en Martinique (Leone, 2002).....82
Figure 2.19. Les phénomènes naturels perçus comme les plus graves en Martinique (n=129) 84
Figure 2.20. Délais de reconnaissance du séisme du 8 juin 1999 (n=224).....85
Figure 2.21. Les phénomènes volcaniques les plus souvent cités en cas de future éruption de la Montagne Pelée (n=129) 86
Figure 2.22. Les causes avancées pour expliquer l'origine de la houle du cyclone Lenny de novembre 1999 (n=200).....87
Figure 2.23. Confrontation statistique entre les fréquences cycloniques mensuelles réelles et les citations des mois les plus menacés (n=200). Etat de la représentation temporelle du phénomène cyclonique. 88
Figure 2.24. Carte de la représentation collective des espaces menacés par une éruption future de la Montagne Pelée (Leone & Lesales, 2006). Populations du Nord-Atlantique (n=103).....89
Figure 2.25. Qualité des réactions pendant et juste après les secousses du séisme du 8 juin 1999. Personnes situées à l'intérieur des bâtiments (n=224). 91
Figure 2.26. Différents documents d'information préventive sur le risque sismique aux Antilles (photo. F. Leone, 2002). 91
Figure 2.27. Comportements potentiels attendus en cas de demande d'évacuation face au réveil de la Montagne Pelée (n=129).....92
Figure 2.28. Confrontation statistique entre les fréquences annuelles de séismes réels et les citations des années sismiques. Etat de la mémoire collective des séismes (n=129).....94
Figure 2.29. Dessin humoristique donnant un aperçu des croyances populaires en matière de protection contre les séismes en Martinique (source France Antilles, 1999) 95
Figure 2.30. Synthèse graphique de la vulnérabilité humaine face à 3 menaces naturelles majeures en Martinique. Prise en compte de 10 facteurs psycho-sociologiques des représentations collectives des risques (IRCR). 97
Figure 2.31. Etat des arrêtés cat. nat. pris en Martinique et en Guadeloupe à la suite d'un cyclone entre 1990 et 2000 98

PARTIE 3

Figure 3.1. Classification des principaux aléas naturels dommageables en fonction du nombre de victimes sur 30 ans (1973-2002) (Thouret & Leone, 2003). 102
Figure 3.2.Illustration des différentes composantes entrant dans la mesure du risque : application au cas des phénomènes de mouvements de terrain (Leone, 1997). 104
Figure 3.3.Probabilités Pa pour q'un bloc atteigne un élément exposé (a : suivant la position de l'élément, b : suivant la pente de la trajectoire) (Leone, 1997). 105
Figure 3.4. Les composantes et variables d'un scénario de risque spatialisé (Leone, 2004). 110
Figure 3.5.Modélisation dynamique de la progression du tsunami du 26 décembre sur Banda Aceh (Indonésie) – Source CEA (H. Hébert) programme Tsunarisque. 114
Figure 3.6. Les principaux processus d'endommagement associés aux mouvements de terrain (Leone, 1996a) 117
Figure 3.7.Décomposition de la catastrophe de la Josefina (Equateur, 1993) en processus d'endommagement associés aux différents phénomènes impliqués (glissement de terrain, retenue hydraulique, onde de submersion, glissements induits par la rupture). Application à la construction de matrices d'endommagement (Leone & Velasquez, 1997 et 2002).....119
Figure 3.8. Principaux critères retenus pour caractériser la magnitude des phénomènes de mouvements de terrain (Leone, 1996a).....120
Figure 3.9. Zone d'étude des effets du tsunami du 26 décembre 2004 sur la ville de Banda Aceh (Sumatra, Indonésie) (Source Ikonos, janvier 2005). 125
Figure 3.10.Décomposition du tsunami en processus d'endommagement dominants et critères de magnitude associés (montage photo F. Leone). 126
Figure 3.11.Captures des deux vidéos montrant l'écoulement chargé en débris. 1 : près de la Grande Mosquée (première vague en fin de course, V=1,5 m/s, H = 1,5 m, distance à la côte = 2,5 km) ; 2 : point de coordonnées UTM WGS84 m : x=752952m et y=612274 m et photo de la zone en janvier 2006 (36 mn après la seconde vague, V=3 m/s, H=3m, distance à la côte = 2,4 km). .127

Figure 3.12. Extrait de scène du satellite Quick Bird (600 km d'altitude). Secteur de Banda Aceh avant le passage du tsunami du 26 décembre 2004. De résolution comparable aux photo-aériennes, ce support permet de différencier le bâti sur de vastes étendues (source http://www.digitalglobe.com)....128
Figure 3.13. Exemple de consultation de façade proposée par le site des Pages jaunes (Hôtel de Région Languedoc-Roussillon à Montpellier, situé en zone inondable)....129
Figure 3.14. Cartographie des atteintes physiques au réseau routier du Diois à la suite des intempéries de janvier 1994. Classification par type de phénomène en cause et par type de dommage (D0 à D4). (Leone, 1996a). 137
Figure 3.15. Interpolation spatiale des niveaux de dommages sur les bâtiments de classe B (A) et des intensités de dommages tous types de bâtiments (B). Tsunami du 26 décembre 2004 (Banda Aceh, Indonésie) (Leone et al., 2006). 142
Figure 3.16. Les principaux bateaux échoués à l'intérieur ou à proximité de la zone d'étude. Banda Aceh. (photos F. Leone & F. Vinet, janvier 2006). Cf. figure 3.15a pour situation des n°3, 4 et 5.....143
Figure 3.17. Exemple de courbes de vulnérabilité sismique (dommage moyen) pour 5 classes de bâti (d'après Giovinazzi & Lagomarsino, 2003)....146
Figure 3.18. Le bâti diagnostiqué et sélectionné pour la construction des courbes d'endommagement tsunami au sein de la ville de Banda Aceh (Indonésie) (données SIG in Leone et al., 2006). Les hauteurs de submersion (m) sont en gras. 147
Figure 3.19. Les différentes courbes d'endommagement (relation hauteur de submersion / dommages) produites à partir de l'analyse statistique et spatiale des dommages (bâti) consécutifs au tsunami du 26 décembre 2004 (Banda Aceh, Indonésie) (Leone et al. 2006).....149
A : niveau d'endommagement moyen ; B : intensité moyenne des dommages (échelle macro-tsunamique) ; C : % de destruction totale ; D : % de pertes humaines en fonction des % de destruction totale. 149
Figure 3.20. Glissement de terrain de la Josefina. Photo : 1. surface de glissement, 2 : pied, 3 : accumulations résiduelles, 4 : niveau maximum atteint par la retenue ; 5 : traces de l'onde de submersion ; 6 : lac résiduel. Reconstitution numérique de terrain avant et après (Leone, inédit)....150
Figure 3.21. Extrait de la matrice d'endommagement mouvements de terrain globale (ici pour 4 classes de bâti exposées à 5 gammes de vitesses de déplacements à dominante latérale) (Leone et al., 1996a,b) 152
Figure 3.22. Traitement cartographique de l'état de dysfonctionnement du réseau routier du Diois suite aux intempéries de 1994 (exprimées en interruptions). Indications sur certains critères de valeur fonctionnelle du réseau (kilométrage des déviations et trafic moyen journalier). Utilité pour décrire la vulnérabilité fonctionnelle du réseau face à un évènement climatique extrême impliquant des mouvements de terrain....155

PARTIE 4

Figure 4.1. Exemple d'indicateur composite de risque naturel (risque de mortalité) produit par l'Université de Columbia et la Banque Mondiale dans le cadre du projet Hotspots (d'après Dilley et al. 2005). 160
Figure 4.2. Principe du calcul d'un indice de risque de pertes liées à l'endommagement du bâti (mailles de 500 m de côté). Application à la Martinique (Leone, 2004). 162
Figure 4.3. Cartographie des aléas naturels et des enjeux (bâti) retenus pour le calcul des indices de risque en Martinique (sources BRGM, 1998). 164
Figure 4.4. Les différentes courbes d'endommagement utilisées pour quantifier la vulnérabilité du bâti en Martinique....165
Figure 4.5. Cartes des indices de risque (absolus et relatifs) pour la Martinique. A, D : risque mouvements de terrain ; B, E : risque sismique ; C, F : risque volcanique. 166
Figure 4.6. Les victimes de séismes historiques en Méditerranée (sources NEIC/USGS ; NGDC/NOAA ; EM-DAT/CRED in SIG RINAMED). 169
Figure 4.7. Les enjeux démographiques situés à moins de 5 km des côtes méditerranéennes (maille de 400 Km²) (sources DCWDS/PSU et LandScan/ORNL in SIG RINAMED) 170
Figure 4 .8. Les deux zones d'étude renseignées au sein du SIG RINAMED 171
Figure 4.9. Illustration des différents traits de côte disponibles. Le fond SWDB de l'USGS (en bleu) est le plus proche de celui de l'IGN français (BD topo en rouge)....171
Figure 4.10. Mosaïque de cartes produites à partir des données du SIG RINAMED (sources diverses) .172
Figure 4.11. Exemple de chaîne de traitement suivie pour l'homogénéisation et la structuration de données au sein du SIG RINAMED. Cas des victimes de séismes historiques à partir de trois bases de

données internationales. 173

Figure 4.12. Validation quantitative et spatiale des données de population LandScan par confrontation avec les statistiques officielles. A : pour les communes du Languedoc-Roussillon, B : pour les collectivités de rang NUTS3 de l'Arc latin..... 174
Figure 4.13. Principe du zonage des zones exposées à un tsunami moyen à fort. 175
Figure 4.14. Deux modes de représentation cartographique intégrée multi-aléas sur l'Arc latin (volcanisme, sismicité, tsunami, mouvements de versant, inondations). A : au moins un aléa élevé parmi 5, B : nombre d'aléas élevés présents. 177
Figure 4.15. Principe d'élaboration des différents types d'indicateurs géographiques de risques naturels produits sur la Méditerranée..... 180
Figure 4.16. Différents modes de représentation spatiale d'un indicateur d'exposition aux tsunamis..... 181
Figure 4.17. Classement des collectivités de rang NUTS3 de l'Arc latin sur la base d'un indicateur synthétique multirisque naturel intégrant 75 sous indicateurs..... 182
Figure 4.18. Illustration de la chaine de traitement aboutissant à un indicateur de risques naturels synthétique sur l'Arc latin (collectivités de rang NUTS3) (Leone, inédit). 183
Figure 4.19. Méthode de calcul de l'Indice de Risque Global (IRG) pour les pays proches de la Méditerranée 186
Figure 4.20. Méthode de calcul de l'Indice de Risque Sismique (IRS) des villes de plus de 20 000 habitants..... 188
Figure 4.21. Illustration de l'Indice Multirisque (IMR) pour la région de Naples. 189
Figure 4.22.Illustration de la chaîne de traitement aboutissant à l'Indice Multirisque naturel (IMR) sur la Méditerranée (Leone, inédit). 191
Figure 4.23. Schéma directeur de l'application informatique « Atlas Interactif sur les Risques Naturels en Méditerranée » (d'après Refai, 2007)..... 194
Figure 4.24. Capture d'écran de l'interface Web du futur Atlas interactif sur les risques naturels en Méditerranée (Atlas RINAMED). Menu de cartographie statistique..... 195

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION

Tableau I.1. Différentes définitions de la vulnérabilité dans le champ de l'évaluation des risques d'origine naturelle 11

PARTIE 1

Tableau 1.1. Correspondances entre la demande sociale et la production scientifique en matière de risque inondation. Synthèse. 23
Tableau 1.2. Niveaux de disponibilité de différentes approches d'évaluation des vulnérabilités aux catastrophes naturelles. Les références des travaux significatifs en France sont en blanc et ceux étrangers en noir. L'échelle de disponibilité est exprimée par un code couleur..... 33

PARTIE 2

Tableau 2.1. Pondération des différents facteurs de vulnérabilité du système institutionnel philippin de réponse à la catastrophe du Pinatubo (matrice de dysfonctionnement institutionnel) (Leone, 1996b)..... 48
Tableau 2.2. Sources d'informations (coûts) consultées dans le cadre du retour d'expérience mené dans le Diois après les intempéries de janvier 1994 (Leone, 1996a). 51
Tableau 2.3. Tentative d'approche du coût global moyen annuel des mouvements de terrain et de l'érosion en Martinique (dommages directs). Approche statistique basée sur les fréquences de retour (Leone & Lesales, 1999)..... 52
Tableau 2.4. Les différentes approches d'évaluation des vulnérabilités menées au cours de nos recherches dans le cadre de retours d'expérience (REX)..... 55
Tableau 2.5. Principaux enseignements des retours d'expériences menés dans le cadre de nos recherches. Contribution aux diagnostics de vulnérabilité physique, humaine et fonctionnelle. 57
Tableau 2.6. Les principaux facteur et critères de vulnérabilité du système vulnérable. Utilité pour les diagnostics..... 61
Tableau 2.7. Correspondances entre niveaux d'aléas et contraintes réglementaires retenues pour le PPR volcan de la Martinique (Leone & Lesales, 2002). 80
Tableau 2.8. Bilan quantitatif de l'état des représentations collectives des risques naturels en Martinique. Incidence sur la vulnérabilité humaine. 96

PARTIE 3

Tableau 3.1. Essai de synthèse des processus d'endommagement physiques associés aux principaux aléas naturels et proposition de critères d'évaluation de leur magnitude. Contribution à une quantification multi-risque. 112
Tableau 3.2. Principales échelles de magnitude et d'intensité disponibles dans la littérature pour caractériser des aléas naturels dommageables..... 115
Tableau 3.3. Critères et échelles de magnitude applicables aux phénomènes de mouvements de terrain (Leone, 1996a)..... 123
Tableau 3.4. Classification des phénomènes de mouvements de terrain en fonction de plusieurs gammes de magnitude des processus d'endommagement associés (Leone, 1996a)..... 124

Tableau 3.5. Typologie du bâti (classes de vulnérabilité) adaptée à l'analyse des dommages post-tsunami. Application à la reconstitution du phénomène et aux scénarios de pertes (Leone et al, sous presse) 131
Tableau 3.6. Typologie des éléments exposés retenus pour la construction des matrices d'endommagement « mouvements de terrain » (Leone, 1996a)..... 132
Tableau 3.7. Quelques indicateurs d'expression des différentes valeurs attribuables aux éléments exposés dans une démarche de scénario de risque 133
Tableau 3.8. Différentes estimations de la valeur économique de la vie humaine..... 134
Tableau 3.9. Exemples d'échelles d'intensités macro-sismiques : EMS98 (Grünthal, 2001)..... 135
Tableau 3.10. Echelle d'intensité des dommages sur le bâti provoqués par des écoulements pyroclastiques à Montserrat. Relation avec les pressions exercées (Baxter et al, 2005)..... 136
Tableau 3.11. Echelle d'intensité des dommages structurels et fonctionnels du réseau routier et taux correspondants (Ds). Exploitation des évènements de janvier 1994 sur le Diois (26). 138
Tableau 3.12. Echelle d'intensité des dommages structurels, corporels et fonctionnels induits par des phénomènes de mouvements de terrain et taux correspondants (D) (Leone, 1996a). 138
Tableau 3.13. Classification des dommages aux bâtiments consécutivement au tsunami du 26 décembre 2004. Banda Aceh, Indonésie (Leone et al., sous presse)..... 140
Tableau 3.14. Echelle d'intensité « macro-tsunamique » basée sur les dommages aux bâtiments (Leone et al., sous presse). Cf. tableau 3.5 pour les classes de vulnérabilité du bâti et tableau 3.13 pour les niveaux de dommages (D) 141
Tableau 3.15. Correspondances entre les intensités macro-tsunamiques et les hauteurs de submersion (H) du tsunami. 144
Tableau 3.16. Matrice d'endommagement associée à la catastrophe de la Josefina (Equateur, 1993). Les valeurs d'intensité des dommages (cellules) renvoient à une échelle non présentée ici (cf. Leone & Velasquez, 1997)..... 151
Tableau 3.17. Matrice de dysfonctionnement applicable aux effets des mouvements de terrain. Relations entre dommages physiques et dysfonctionnements induits sur différentes activités. 154
Tableau 3.18. Relations entre dommages structurels et perturbations fonctionnelles déduites des évènements de 1994 sur le réseau du Diois (26). Utilité pour l'élaboration de matrices de dysfonctionnement des réseaux routiers face aux phénomènes de mouvements de terrain... 155

PARTIE 4

Tableau 4.1. Liste des indicateurs d'aléas naturels retenus par le projet ESPON sur l'Union Européenne (d'après Schmidt-Thomé, 2006)..... 161
Tableau 4.2. Les zonages de référence des aléas naturels retenus sur l'Arc latin 176
Tableau 4.3. Proposition de différentes familles d'indicateurs de risques naturels spatialisables..... 179

CONCLUSION

Tableau C.1. Résumé des principales contributions méthodologiques issues de nos recherches. ……..201

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1
Classement analytique des principaux travaux de recherches ayant porté sur le thème des inondations en France avant juillet 2002 (hors programmes RIO) (Ledoux & Leone, 2002).

Annexe 2
Exemples de constats d'endommagement structural, corporel, fonctionnel et systémique menés après des catastrophes naturelles.

Annexe 3
Exemples de retours d'expérience sur les vulnérabilités humaines et sociales face à des aléas naturels.

Annexe 4
Synthèse de la démarche méthodologique et des principaux résultats issus de l'analyse en retour du tsunami du 26 décembre 2004 à Banda Aceh (Sumatra, Indonésie) .

Annexe 5
Exemples de diagnostics de vulnérabilité humaine ou sociale face aux menaces naturelles.

Annexe 6
Questionnaire post-sismique pour des personnes se trouvant dans un bâtiment au moment des secousses

Annexe 7
Questionnaire utilisé lors du retour d'expérience sur le cyclone Lenny aux Antilles (novembre 1999).

Annexe 8
Questionnaire d'analyse des représentations du risque volcanique utilisé en Guadeloupe.

Annexe 9
Proposition de règlement applicable dans le cadre du PPR Volcan de la Martinique (Leone & Lesales, 2002).

Annexe 10
Synthèse et pondération de l'état des représentations collectives (population) des risques naturels à la Martinique (séismes, volcanisme, cyclones).Contribution au diagnostic de vulnérabilité humaine (Leone, inédit).

Annexe 11
Exemples de scénarios d'endommagement et de pertes induites par des aléas naturels.

Annexe 12
Illustration des principaux facteurs de vulnérabilité structurelle du bâti révélés par le Séisme d'Al Hoceima (Maroc, 24 février 2004).

Annexe 13
Principaux effets associés aux différents aléas volcaniques et devant être considérés dans une perspective de construction de matrices d'endommagement volcaniques (Leone, inédit).

Annexe 14
Matrice d'endommagement globale « mouvements de terrain » (modifié d'après Leone, 1996).

Annexe 15
Illustration et description des principales sources d'information géographique externes alimentant le projet SIG RINAMED (dir. F. Leone).

Annexe 16
Liste complète des indicateurs de risques naturels et anthropiques développés sur l'Arc latin au niveau de découpage territorial NUTS3 (Leone & Pagneux, 2007).

Annexe 17
Quelques productions cartographiques issues du Système d'Information Géographique sur les Risques naturels en Méditerranée (SIG RINAMED) (dir. F. Leone).

Annexe 18
Captures d'écran des principaux menus du futur Atlas en ligne des Risques Naturels en Méditerranée (Atlas RINAMED).

ANNEXES

ANNEXE 1

Classement analytique des principaux travaux de recherches ayant porté sur le thème des inondations en France avant juillet 2002 (hors programmes RIO) (Ledoux & Leone, 2002).

Classement analytique des travaux de recherche portant sur le thème des inondations en France

(recensement juillet 2002 hors programmes RIO et EPR - 95 références)

| Intitulés des recherches recensées | Responsables ou auteurs | Organismes d'accueil ou pilotes | Durée ou fin | Types de recherche | | | | Disciplines concernées | | | | | | | | | | Thèmes principaux traités | | | | | | | | | |

| | | |

ANNEXE 2

Exemples de constats d'endommagement structural, corporel, fonctionnel et systémique menés après des catastrophes naturelles.

Exemples de constats d'endommagement structural, corporel, fonctionnel et systémique (dysfonctionnements) menés après des catastrophes naturelles

Zone géographique concernée et date de l'évènement	Références	Principaux éléments endommagés analysés [1]	Approche qualitative ou quantitative [2]
Séismes			
Divers séismes	Retours d'expérience de l'EERI, l'EEFIT et AFPS	Bâtiments – Réseaux physiques – Infrastructures diverses – Systèmes organisationnels	Qualitative et quantitative
Los Angeles – USA (1994)	Boarnet, 1998	Réseau routier – Activités commerciales	Quantitative
Kobe – Japon (1995)	Chang, 1996	Réseaux – Activités économiques	Quantitative
Kobe – Japon (1995)	Chang, 2000	Infrastructures portuaires – Activités économiques	?
Loma Prieta (1989)	Deakin, 1991	Transport routier	?
Los Angeles – USA (1994)	Giuliano et al., 1996	Transport autoroutier	?
Kobe – Japon (1995)	Hassani & Takada, 1995	Réseaux	?
Kobe – Japon (1995)	Matsushita, 1998	Réseaux d'eau	?
Umbria-Marche – Italie (1997)	Mazzocchi & Montini, 2001	Activité touristique	Quantitative
Kobe – Japon (1995)	Menoni, 2001	Système urbain dont réseaux	Qualitative
Los Angeles – USA (1994)	Qi, 1994	Réseau de gaz	?
Los Angeles – USA (1994)	Rose & Lim, 2002	Activités commerciales	Quantitative
Kobe – Japon (1995)	Tomita et al., 1995	Transport routier	?
Los Angeles – USA (1994)	Mahue-Giangreco et al, 2001	Personnes	Quantitative
Los Angeles – USA (1994)	Peek-Asa et al., 2000	Personnes	Quantitative
Luzon- Philippines (1990)	Roces et al., 1992	Personnes	?
Los Angeles – USA (1994)	Kloner et al., 1997	Personnes	?
Los Angeles – USA (1994)	Gordon et al., 1998	Transport routier	?
Kobe – Japon (1995)	Miyakoshi et al., 1997	Bâtiments	Quantitative
Kobe – Japon (1995)	Yamazaki & Murao, 2000	Bâtiments	Quantitative
Umbria-Marche – Italie (1997)	Spence & D'Ayala, 1999	Bâtiments	Quantitative
Eruptions volcaniques			
Soufrière Hills – Montserrat – BWI (1997) (écoulement pyroclastique)	Baxter et al., 2000	Bâtiments - Personnes	Quantitative
Mt St Helens – USA (1981)	Cook et al., 1991	Cultures et activité agricole	?
Mt Ruapehu – Nouvelle Zélande (1995)	Cronin et al., 1996	Sols	?
Mt St Helens – USA (1981)	Dale, 1986	Végétation	?
El Páricutin - Mexique	Eggler, 1948	Végétation	?
Mt St Helens – USA (1981)	Gamblin et al., 1986	Truites	?
Mt Ruapehu – Nouvelle Zélande (1995)	Maxwel, 1996	Elevages de poissons	?
Galeras – Colombie (1993) (explosion)	Baxter et al., 1997	Personnes décédées	Qualitative
Guaga Pichincha – Quito – Equateur (1999) (retombées de cendres)	D'Ercole & Metzger, 2000	Système urbain (infrastructures diverses dont réseaux, activités associées)	Qualitative
Mt. Aso – Kumamoto – Japon (1989-97) (gaz)	Ng'Walali et al., 1999	Personnes	Qualitative
El Chichon – Mexique (cendres et poussières)	Bernard & Rose, 1990	Avions et trafic aérien	Qualitative
Mt Pinatubo – Philippines (1991) (cendres)	Casadevall et al., 1996	Avions et trafic aérien	Qualitative
Mt Pinatubo – Philippines (1991) (cendres)	Spence et al., 1996	Bâtiments	Quantitative
Mt Pinatubo – Philippines (1991-2000)	Gaillard, 2001	Système territorial	Qualitative

Exemples de constats d'endommagement structural, corporel, fonctionnel et systémique (dysfonctionnements) menés après des catastrophes naturelles

Mouvements de terrain			
Josefina – Vallée de Paute – Equateur (1993) (glissement et phénomènes induits)	Leone, 1996 ; Leone & Velasquez, 1997	Bâtiments – Réseaux - Surfaces naturelles	Quantitative
Ancona – Italie (1982) (glissements)	Alexander, 1988	Bâtiments	Quantitative
Diois – France (1994) (glissements)	Leone, 1996	Réseau routier	Qualitative
La Salle-en-Beaumont – France (glissement)	Leone, 1996	Réseau routier - Bâtiments	Qualitative
Département du Var - France	Ledoux et al., 1990	Divers	Quantitative
Vents forts			
Guadeloupe – Antilles – France (1989)	Hamparian, 1999	Bâtiments	Qualitative
Polk County – Minnesota – USA (1994) (tornade)	Dyer & Baird, 1997	Forêt	Quantitative
Grêle			
Région de Saumur – France (1993)	Vinet, 1994	Vignoble	Quantitative

(1) Il s'agit soit des éléments physiques, soit/et des activités qui en dépendent.
(2) L'approche qualitative repose sur une simple description des dommages. L'approche quantitative repose sur la quantification des dommages, soit sous forme de bilans (taux ou % de pertes), soit en référence à une échelle d'intensité pour hiérarchisation (taux ou niveau d'endommagement).

ANNEXE 3

Exemples de retours d'expérience sur les vulnérabilités humaines et sociales face à des aléas naturels.

Exemples de retours d'expérience sur les vulnérabilités humaines et sociales face à des aléas naturels

Zone géographique concernée et date de l'évènement	Références	Type de population étudiée	Principaux aspects étudiés	Approche quantitative ou qualitative*
Séismes				
Salvador (2001)	AFPS, 2001	Population dans bâtiments – institutions - Médias	Comportements - Perceptions – Connaissances – Organisation - Réponses	Quantitative et qualitative
Martinique – Antilles – France (1999)	Leone, 2000	Population dans bâtiments	Comportements - Jugement des autorités – Perceptions – Connaissances - Mémoire	Quantitative
Savoie – France (1994)	Colbeau-Justin, 1995	Population – Institutions - Médias	Comportements - Réactions	Qualitative
Nice – France (1995)	Colbeau-Justin & de Vanssay B., 1996	Population – Institutions - Médias	Comportements - Réponses	Quantitative
Popayan – Colombie (1999)	D'Ercole, 1996	Population	Perception - Connaissance	Quantitative
Turquie (1999) et Los Angeles-USA (1994)	Kalayjian et al., 2002	Survivants	Traumatismes pshychologiques	Quantitative
Luzon – Philippines (1990)	Tayag et al., 1992	Population - autorités	Organisation des secours	?
Taiwan (1999)	Shih et al., 2002	Nurses	Comportements - Adaptation	Quantitative
Manosque – France (1702)	Quenet	Population	?	?
Eruptions volcaniques				
Mt Usu – Hokkaido – Japon (2000)	D'Ercole, 2002	Institutions	Réponses institutionnelles – Niveau de préparation	Qualitative
Soufrière Hills - Montserrat – British West Indies (1995-1999)	De Vanssay & Colbeau-Justin, 2000	Population - Institutions	Comportements – Résistances à l'évacuation – Efficacité de la gestion de crise	Qualitative
Guaga Pichincha - Quito – Equateur (1999)	D'Ercole & Metzger, 2001	Population	Connaissance – Représentations – Perceptions – Différenciations socio-spatiales	Quantitative
Mt Pinatubo – Luzon – Philippines (1991-99)	Gaillard & Leone, 2000	Minorité ethnique	Adaptation	Qualitative
Mt Saint Helens – USA (1981)	Greene et al., 1981	Population	Perceptions	?
Mt Pinatubo – Luzon – Philippines (1991-98)	Leone & Gaillard, 1999	Population - Institutions	Réponses sociales et institutionnelles - Facteurs contraignants	Qualitative
Soufrière de Guadeloupe – Antilles – France (1976)	Lepointe E., 1999	Population	Réponses sociales et institutionnelles - Croyances	Qualitative
Guaga Pichincha - Quito – Equateur (1998)	Metzger & D'Ercole, 1999	Autorités - Population	Réponses - Perceptions	Qualitative
Tristan de Cunha (1961-62)	Lewis et al. 1972	Population isolée	Comportements	?
Paricutin - Mexique	Nolan, 1979	Population (5 communautés)	?	?
Paricutin - Mexique	Rees, 1970	Population	Adaptation	?
Mt Saint Helens – USA (1981)	Saarinen & Sell, 1985	Population	Réponses	?
Mt Saint Helens – USA (1981)	University of Delaware, 1990	Population	Perception	?
Mt Nevado del Ruiz – Colombie (1985) (lahars)	Voight, 1990	Institutions – autorités	Réponses – Comportements - Perceptions	Qualitative
Soufrière Hills - Montserrat – British West Indies (1995-1996)	Lesales, 1996	Population - Institutions	Réponses – Comportements - Perceptions	Quantitative et qualitative
Montagne Pelée – Martinique – Antilles – France (1792, 1851-52, 1902-05, 1929-32)	Lesales, 1994	Institutions - Population	Réponses - Comportements	Qualitative
Mt Ruapehu - Nouvelle Zélande (1997)	Paton et al. 2001	Population	Résilience	Quantitative
Mt Pinatubo – Philippines (1991-92)	Cola, 1996	Population	Réponses aux alertes	?
Mt Pinatubo – Philippines (1991-92)	Tayag et al., 1996	Population	Réponses aux alertes	?
Montagne Pelée – Martinique – Antilles – France (1902)	Ursulet, 1994	Population - Institutions	Réponses - Comportements	Qualitative
Mouvements de terrain				
Boulc – France (1994) (glissement)	Leone, 1996	Population enclavée	Conséquences socio-économiques liées à l'enclavement d'une population	Quantitative
Massif du Chablais – France (glissements)	Pigeon, 1991	Population - Institutions	Réponses - Adaptations	?
Cyclones				
Petites-Antilles (1999)	Sarant et al., 2003	Population - Institutions	Comportements – Perceptions – Réponses - Satisfaction	Quantitative et qualitative
Multi-aléas (avalanches, mouvements de terrain, …)				
Vallée des Ormonts – Préalpes Vaudoises – Suisse (depuis XVII^{e} siècle)	Schoeneich & Busset-Henchoz, 1998	Populations	Réponses - Adaptations	Qualitative

* L'approche qualitative est basée sur un analyse descriptive. L'approche quantitative est basée sur des résultats d'enquêtes soumis à des traitements statistiques.

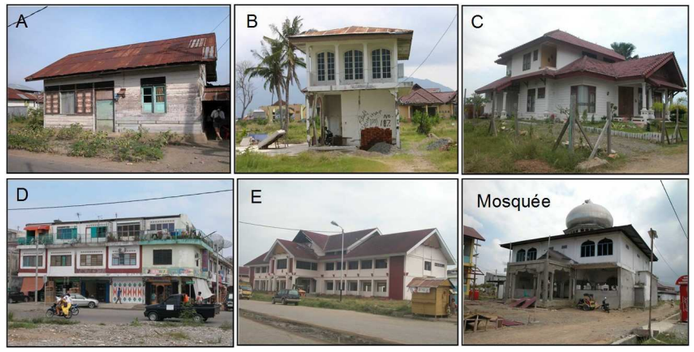
ANNEXE 4

Synthèse de la démarche méthodologique et des principaux résultats issus de l'analyse en retour du tsunami du 26 décembre 2004 à Banda Aceh (Sumatra, Indonésie).

Choix de la zone d'étude au coeur de Banda Aceh

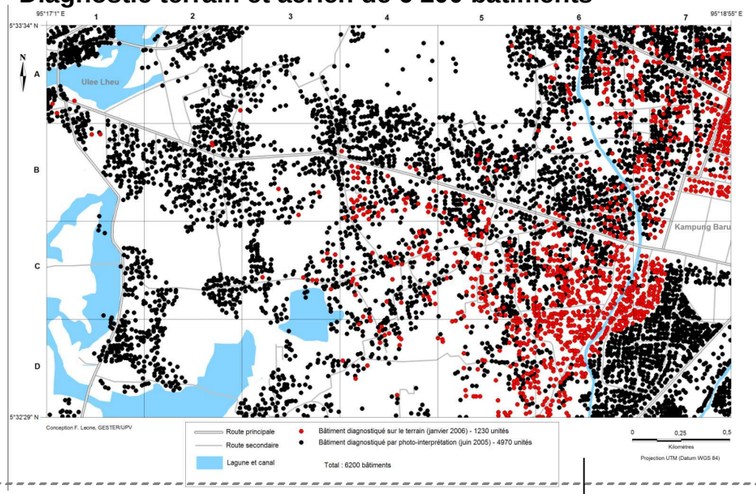
Elaboration de typologies reproductibles

Typologie du bâti (5 classes de vulnérabilité)



Typologie des dommages (6 classes)

Diagnostic terrain et aérien de 6 200 bâtiments



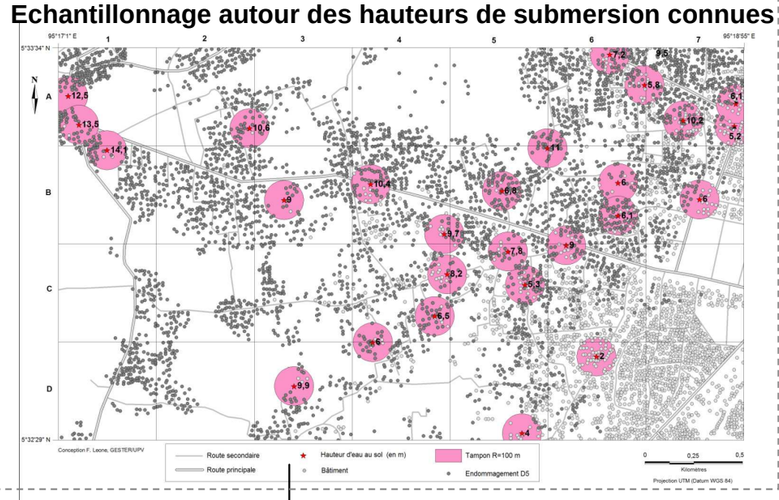
Mise au point d'une échelle d'intensité « macro-tsunamique »

basée sur les niveaux de dommage et les classes de vulnérabilité (6 degrés)

Classes de vulnérabilité du bâti	Niveaux d'endommagement du bâti				
	D0 à D1	D1 à D2	D2 à D3	D4 à D5	D5 à D6
A	I	II	III	IV	V
B	I	II	III	IV	VI
C	II	III	IV	V	VI
D	II	III	IV	V	VI
E	II	IV	V	VI	VI

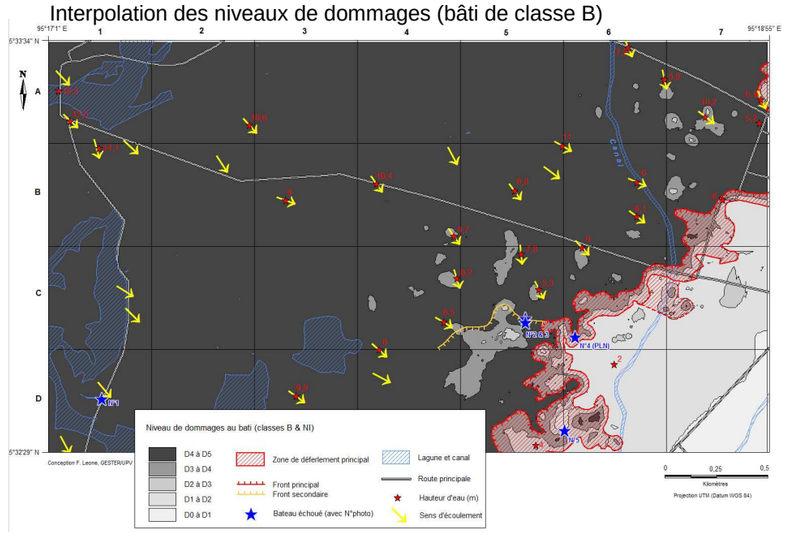
Validation d'après la position de la zone de déferlement

Echantillonnage autour des hauteurs de submersion connues

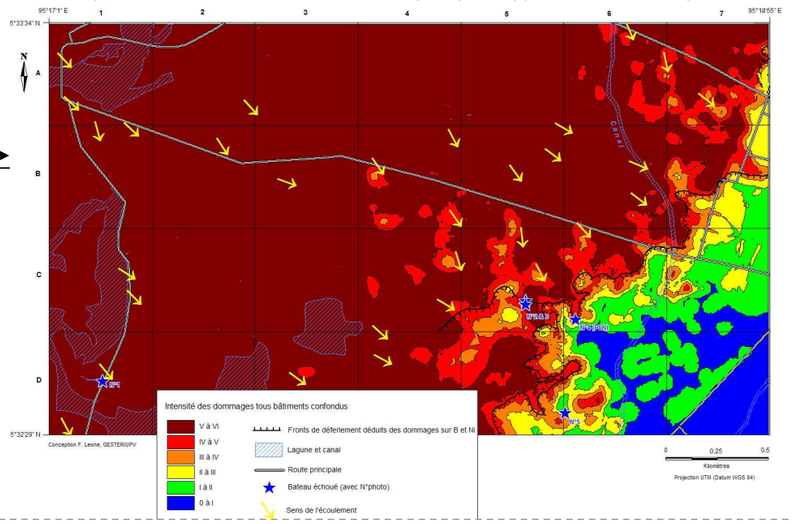


Interpolation des dommages sous SIG, cartographie de la zone de déferlement et validation de l'échelle d'intensité

Interpolation des niveaux de dommages (bâti de classe B)

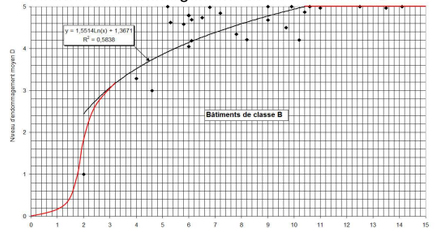


Interpolation des intensités de dommages (tous types de bâtiments)

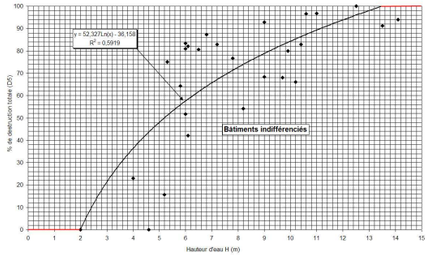


Corrélations dommages / hauteurs

Courbe d'endommagement du bâti de classe B



% de destruction totale (tous types de bâti)



ANNEXE 5

Exemples de diagnostics de vulnérabilité humaine ou sociale face aux menaces naturelles.

Exemples de diagnostics de vulnérabilité humaine ou sociale face aux menaces naturelles

Zone géographique concernée et type de population concernée si particulière	Références	Principaux critères de vulnérabilité humaine retenus [1]	Approche qualitative ou quantitative [2]	Représentations cartographiques et géocode [3]
Séismes				
Martinique - Antilles – France (établissements scolaires)	D'Ercole et al., 1993	Perceptions des menaces - Connaissances des moyens de protection - Sources d'information - Niveau de préparation - Qualité des systèmes d'alerte - Accessibilité des zones de refuge - Vulnérabilité des bâtiments - Vulnérabilité corporelle	Qualitative et quantitative	Non
Martinique - Antilles – France (habitants)	Mavoungo, 2006	Perception des menaces - Représentations - Comportements potentiels - Connaissance des moyens de protection - Vulnérabilité institutionnelle -	Qualitative et quantitative	Oui (quartier)
Martinique – France	Mavoungo, 2000	Perceptions - Connaissance - Information - Pratiques	Quantitative	Non
Tokyo – Japon (sans abris)	Wisner, 1998	Ressources économiques – Accès aux soins – Accès aux services – Assistance sociale	Qualitative	Non
Popayan – Colombie	D'Ercole, 1996	Perceptions et représentations	Qualitative et quantitative	Oui (quartier)
Eruptions volcaniques				
Région du Cotopaxi – Equateur (lahars)	D'Ercole, 1991	Perceptions - Représentations - Comportements potentiels - Connaissance des moyens de protection - Niveaux de confiance - Accessibilité / Localisation - Niveau socio-économique - Type d'habitat - Sexe - Age - Nombre de personnes dans le ménage - Temps de résidence - Confiance - Mémoire - Sources d'information	Quantitative	Oui (paroisse=commune)
Vallée de la Pasig-Potrero – Luzon – Philippines (lahars)	Gaillard et al., 2001	Perception du risque - Comportements potentiels - Attitudes en cas d'ordre d'évacuation	Quantitative	Oui (infra-communal)
Martinique – France (populations proches du volcan)	D'Ercole & Rançon, 1999	Comportements potentiels en cas d'évacuation - Perception de la nature des menaces - Perception des espaces menacés	Quantitative	Oui (île)
Furnas - Sao Miguel - Açores	Dibben & Chester, 1999	Durée de résidence - Attachement au village - Niveau de perception des menaces - Niveau de préparation - Caractéristiques sociales - Vulnérabilité technique du village	Qualitative	Non
Mérapi - Indonésie	Lavigne, 1999a	Critères socio-démographiques et socio-culturels (Densité de population - Part des moins de 15 ans - Part des plus de 50 ans - Taux d'analphabétisme) . Critères techniques et fonctionnels (Nombre de téléphones pour 1000 habitants - Nombre de bus et camions de capacité supérieure à 10 passagers pour 100 00 habitants - Nombre de minibus et de voitures de capacité inférieure à 10 passagers pour 10 000 habitants - Densité communale de routes bitumées au km2 - Nombre d'écoles pour 1000 habitants - Proportion de maisons en pierre - Nombre d'hôpitaux, de cliniques, de dispensaires et de médecins pour 10 000 habitants)	Quantitative	Oui (commune)
Quito - Equateur	D'Ercole & Metzger, 2000	Perception du risque - La connaissance des alertes volcaniques et de leurs différents niveaux - La représentation des caractéristiques d'une éventuelle éruption - La perception du risque personnel (au lieu de résidence de la personne interrogée) - Variables explicatives (critères de sélection des PSE ou facteurs indirects de vulnérabilité) : Niveau socio-économique - Niveau d'éducation - Crédibilité accordée aux autorités - Distance au volcan - L'exposition au risque volcanique	Quantitative	Oui (quartier)
Petites Antilles	Lesales, 2005	Perceptions - Représentations - Vulnérabilité institutionnelle - IDH - PIB	Qualitative et quantitative	Oui (îles)
Ibagué - Colombie (lahars)	Laforge & Thouret, 1991	Perceptions - Connaissance - Mémoire	Quantitative	Oui (transect)
Montserrat - BWI	Lesales, 1999	Perception du danger	Qualitative et Quantitative	Oui (districts)
Mouvements de terrain				
Antilles (maires, ...)	Cospar, en préparation	Vulnérabilité institutionnelle - Connaissance - Perceptions - Niveau de préparation	Qualitative	?
Vents forts				
Saintes - Guadeloupe - Antilles - France	Pagney & Suédois, 1999	Perception des menaces – Connaissances – Expériences – Niveau de préparation	Quantitative	Non
Antilles - France	Bonfanti, 2004	Vulnérabilité structurale du bâti - Perceptions - Comportements potentiels - Expérience	Qualitative et quantitative	?

Exemples de diagnostics de vulnérabilité humaine ou sociale face aux menaces naturelles

Multi-aléas				
Manizales – Colombie (séismes, glissements, inondations)	Chardon, 1996	Niveau socio-économique – Densité – Moyens de secours – Accessibilité – Organisation communautaire – Etablissements scolaires et universitaires	Quantitative (pondération)	Oui (quartier)
Cairns - Australie (cyclones, tempêtes, houles, inondations)	King, 2001	Indicateurs socio-économiques	Quantitative	Oui (quartier)
	Longhurst, 1995			
Caraïbe, Amérique centrale et Asie	D'Ercole & Pigeon, 1999 ; D'Ercole et al., 1997,	PIB - IDH - Taux de croissance urbaine	Quantitative	Non
Vallée des Ormonts – Préalpes vaudoises - Suisse	Schoeneich & Busset-Henchoz, 1998	Perceptions – Capacité d'adaptation	?	?
Marée de tempête				
Revere – Massachusetts – USA	Clark et al., 1998	Indicateurs socio économiques (âge, culture, niveau de vie, structure familiale, niveau d'éducation) – Mobilité - Temps de résidence	Quantitative	Oui (quartier)
Changements climatiques				
Xuan Thuy – Vietnam (littoral)	Adger & Kelly, 1999	Pauvreté – Inégalités – Capacité d'adaptation des institutions	Qualitative	Non
Avalanches				
Valais - Suisse	Herold-Revaz et al., 1998	Perceptions – Capacité d'adaptation	?	?
Inondations				
France	Cemagref (Gilard O. Givone P., 1998)	Niveau d'acceptabilité de l'aléa - modélisation		Oui
Angleterre	DEFRA, 2003	Type de population (âge, pers. handicapées) – type d'habitat – efficacité du système d'alerte et d'évacuation	Semi-quantitative	?
Angleterre	Kelman & Spence, 2002	Vulnérabilité du bâti	Quantitative	?
Suisse	Planat, 2003		Quantitative	?
USA	HAZUS-MH/FEMA	Vulnérabilité du bâti – Type d'occupation des immeubles	Quantitative	Oui
France	Ledoux & Sageris 1999 Equipe pluridisciplinaire Plan Loire, 2001	Vulnérabilité des entreprises – Vulnérabilité fonctionnelle et structurelle – Existence de – sinistres précédents – couverture par assurance	Qualitative et quantitative suivant les critères	?

(1) Facteurs ou indicateurs analysés ou pris en compte par les auteurs pour évaluer la vulnérabilité – Différencier les facteurs directs des facteurs indirects (variables explicatives) – Différencier ceux reflétant une sensibilité à l'endommagement de ceux traduisant une capacité de réponse à l'endommagement (résilience)

(2) L'approche qualitative repose sur une simple analyse des facteurs et conditions de vulnérabilité. L'approche quantitative implique un traitement statistique des éléments vulnérables sur la base de critères de vulnérabilité qualitatifs (qualité de la perception de la menace par ex.) éventuellement pondérés, ou quantitatifs (âge par ex.).

(3) Le géocode correspond à l'unité géographique servant à représenter les niveaux, facteurs, ou indicateurs de vulnérabilité issus de l'approche quantitative.

ANNEXE 6

Questionnaire post-sismique pour des personnes se trouvant dans un bâtiment au moment des secousses.

Date : **Enquêteur :** **N° :** _____

Questionnaire d'enquête POST-SISMIQUE - Séisme de : , du :

GEODE-CARAÏBE (UAG) - F. Leone

Enquête sur les effets, les comportements et la perception des personnes se trouvant dans un bâtiment au moment du séisme

1. Avez vous ressenti le tremblement de terre de ?
○ 1. Oui ○ 2. Non

2. Veuillez situer le bâtiment dans lequel vous vous trouviez au moment du séisme (commune et quartier) :

3. De quel type est le bâtiment que vous occupiez au moment du séisme ?
○ 1. Individuel sans étage ○ 2. Individuel à étages
○ 3. Immeuble ○ 4. Autre, précisez :

4. Veuillez préciser s'il s'agit :
☐ 1. De votre habitation ☐ 2. De votre lieu de travail
☐ 3. D'un lieu public, lequel : ☐ 4. D'un lieu privé
Vous pouvez cocher plusieurs cases (3 au maximum).

5. A quel étage vous trouviez-vous au moment des secousses ?
○ 1. Rez-de-Chaussée ○ 2. Etage supérieur: lequel?:.....
○ 3. Sous-sol

6. Dans quel site se trouve ce bâtiment ?
○ 1. Au sommet d'un morne
○ 2. Sur un versant (une pente)
○ 3. Au fond d'une ravine
○ 4. En plaine
○ 5. Autre :

7. Pouvez-vous estimer l'âge de ce bâtiment ?
○ 1. Moins de 5 ans ○ 2. De 5 à 10 ans
○ 3. De 10 à 30 ans ○ 4. De 30 à 50 ans
○ 5. Plus de 50 ans

8. Décrivez les effets du séisme autour de vous :
○ 1. Légères vibrations seulement
○ 2. Légers balancements des objets supendus
○ 3. Balancement des portes, des fenêtres
○ 4. Chutes d'objets légers
○ 5. Chutes de gros objets
○ 6. Déplacement des meubles
○ 7. Craquements de la construction
○ 8. Dégâts à la construction :
○ 9. Autres :

9. Durant combien de temps avez-vous ressenti les secousses ?
○ 1. Moins de 10 secondes ○ 2. De 10 à 30 secondes
○ 3. De 30 à 60 s ○ 4. d'1 à 2 mn
○ 5. plus de 2 mn

10. Ces secousses vous ont semblé :
○ 1. Faibles ○ 2. Modérées ○ 3. Fortes
○ 4. Très fortes

11. Avez-vous été effrayé ?
○ 1. Oui ○ 2. Non

12. Au bout de combien de temps avez-vous réalisé qu'il s'agissait d'un séisme ?
○ 1. Tout de suite
○ 2. Au bout de quelques instants
○ 3. Après la fin des secousses
○ 4. Plus tard, lorsqu'on me l'a dit

13. Qu'avez-vous fait au moment des secousses ?
☐ 1. Rien de spécial ☐ 2. Sorti
☐ 3. Protégé : comment ?: ☐ 4. Prié
☐ 5. Autre :
Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

14. Qu'avez-vous fait juste après les secousses ?
☐ 1. Rien de spécial ☐ 2. Sorti
☐ 3. Coupé le gaz ☐ 4. Coupé l'électricité
☐ 5. Téléphoné ☐ 6. Autre :
Vous pouvez cocher plusieurs cases.

15. Si vous êtes sorti du bâtiment, au bout de combien de temps y êtes vous retourné ?

16. Avez vous craint qu'un autre séisme se produise ?
○ 1. Oui ○ 2. Non

17. Vous sentez-vous de nouveau en sécurité maintenant ?
○ 1. Oui ○ 2. Non

18. Avez vous recherché immédiatement une information sur ce qui venait de se passer ?
○ 1. Oui ○ 2. Non

19. Si 'Oui', par quels moyens ?
☐ 1. En regardant la télé, quelle chaîne?:
☐ 2. En téléphonant, où?:
☐ 3. En écoutant la radio, quelle station ?:
☐ 4. En demandant à quelqu'un
☐ 5. Autrement, précisez:
Vous pouvez cocher plusieurs cases.

20. Si 'Oui', avez-vous obtenu l'information recherchée ?
○ 1. Oui ○ 2. Non

21. Si 'Oui', comment avez vous trouvé cette information ?
○ 1. Très satisfaisante ○ 2. Satisfaisante
○ 3. Peu satisfaisante ○ 4. Très peu satisfaisante

22. Selon vous, quelle est la cause du séisme ressenti ?
☐ 1. Tectonique ☐ 2. Volcanique ☐ 3. Thermique
☐ 4. Humaine ☐ 5. Divine ☐ 6. Autre :
Vous pouvez cocher plusieurs cases.

23. Pouvez-vous indiquer sa magnitude sur l'échelle de Richter ?
○ 1. Réponse juste ○ 2. Réponse fausse
○ 3. Ne sais pas

24. Pouvez-vous situer son épicentre (sa source) ?
○ 1. Réponse juste ○ 2. Réponse approximative
○ 3. Réponse fausse ○ 4. Ne sais pas

25. Combien de séismes similaires avez-vous ressenti dans le passé ?
○ 1. Aucun ○ 2. 1:date ?
○ 3. 2:date ? ○ 4. 3:date ?
○ 5. plus:date ? ○ 6. Je ne sais plus

26. Selon, vous quelle est la période de retour de séismes similaires en Martinique (en années) :

27. Selon vous, est-ce que la Martinique a déjà subi un séisme très destructeur dans le passé (avec de nombreuses victimes) ?
○ 1. Non ○ 2. Oui : A quelle époque ? :
○ 3. Je ne sais pas

28. Pensez vous que la Martinique puisse un jour subir un séisme très destructeur ?
○ 1. Oui ○ 2. Non ○ 3. Je n'en sais rien

29. Comment jugez-vous le travail des autorités en matière d'information préventive sur les séismes ?
○ 1. Très bon ○ 2. Moyen ○ 3. Médiocre ○ 4. Nul

30. Eventuellement, par quel(s) moyen(s) souhaiteriez vous être davantage préparé et informé pour affronter un futur séisme?
☐ 1. Emissions télévisées
☐ 2. Brochures d'information
☐ 3. Affichage public
☐ 4. Emissions radios
☐ 5. Conférences
☐ 6. Articles de presse
☐ 7. Stand d'information permanent
☐ 8. Site internet
☐ 9. Numéro vert (info téléphonique continue)
☐ 10. Exercices
☐ 11. pratiques(simulations)
☐ 12. Autre:
Vous pouvez cocher plusieurs cases (11 au maximum).

31. D'une manière générale quelles dispositions avez-vous pris à votre domicile pour affronter un séisme ?
☐ 1. Aucune
☐ 2. Construction parasismique
☐ 3. Fixation des meubles aux murs
☐ 4. Constitution de réserves d'eau et de nourriture
☐ 5. Eclairage de secours
☐ 6. Poste de radio avec piles de rechange
☐ 7. Plan de secours
☐ 8. Autre, précisez :
Vous pouvez cocher plusieurs cases (6 au maximum).

32. Depuis combien d'années vivez-vous en Martinique ?

33. Dans quelle tranche d'âge vous situez-vous ?
○ 1. Moins 25 ans ○ 2. 26 à 35 ans
○ 3. 36 à 45 ans ○ 4. 46 à 55 ans
○ 5. 56 à 65 ans ○ 6. 66 à 75 ans
○ 7. Plus de 75 ans

34. Quel est votre sexe ?
○ 1. Masculin ○ 2. Féminin

35. Quel est votre niveau d'étude ?
○ 1. Ecole primaire ○ 2. Collège
○ 3. Lycée ○ 4. 1er cycle ens. sup.
○ 5. 2ème cycle ens. sup ○ 6. 3ème cycle ens. sup.
○ 7. Autre :

ANNEXE 7

Questionnaire utilisé lors du retour d'expérience sur le cyclone Lenny aux Antilles (novembre 1999).

Date : **Enquêteur :** **N° :** _____

Enquête auprès des populations sinistrées par le cyclone Lenny (novembre 1999)

GUADELOUPE - COMMUNE : *LIEU DIT :*
HABITATION ou BATIMENT A USAGE PROFESSIONNEL :
TYPE DE PHENOMENE EN CAUSE (préciser houle, inondation, vent, autre) :

1. A quoi vous fait penser le mot "cyclone" ?

2. Quels sont les phénomènes associés au cyclone ?

3. Selon vous, et vis-à-vis des cyclones :
- ☐ la Guadeloupe est plus menacée que la Martinique
- ☐ la Guadeloupe est autant menacée que la Martinique
- ☐ la Guadeloupe est moins menacée que la Martinique
- ☐ ne sais pas

4. Pourquoi selon vous ?

5. Citez les mois de l'année où l'on a le plus de chances de subir un cyclone en Guadeloupe :
- ☐ janv ☐ fev ☐ mars
- ☐ avr ☐ mai ☐ juin
- ☐ juil ☐ août ☐ sept
- ☐ oct ☐ nov ☐ déc
- ☐ ne sais pas

Vous pouvez cocher plusieurs cases (12 au maximum).

6. Précisez les endroits de Guadeloupe les plus exposés aux effets des cyclones (1.vent, 2. inondations, 3. houle, 4.glissements de terrain):

7. En cas de cyclone, pensez vous que l'on puisse se protéger contre les effets du vent ?
☐ non ☐ ne sais pas ☐ oui, comment ?

8. Pensez vous que l'on puisse se protéger contre les effets des inondations ?
☐ non ☐ ne sais pas ☐ oui,comment?

9. Pensez vous que l'on puisse se protéger contre les effets de la houle ?
☐ non ☐ ne sais pas ☐ oui, comment ?

10. Pensez vous que l'on puisse se protéger contre les effets des glissements de terrain ?
☐ non ☐ ne sais pas ☐ oui : comment?

11. Estimez vous prendre des risques en habitant ici (précisez vis à vis de quel phénomène) ?
☐ oui ☐ ne sais pas ☐ non, pourquoi?

12. Combien y-at'il de phases d'alerte officielles face à un risque cyclonique ?
☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ plus ☐ ne sais pas

13. Précisez les consignes à suivre avant le passage d'un cyclone:

14. Pendant le passage d'un cyclone:

15. Après le passage d'un cyclone :

16. Ces consignes vous semblent-t'elles adaptées ?
☐ oui ☐ non, pourquoi ?

17. Avez-vous déjà vécu un cyclone ?
☐ oui ☐ non

18. Si oui, quand (nom et année) ?

19. D'une manière générale, comment jugez-vous le travail des autorités en matière de gestion du risque cyclonique ?
☐ excellent ☐ bon ☐ moyen ☐ médiocre ☐ nul

20. Selon vous, quelles sont les principales carences ?

21. Quels sont les principaux points forts (ce qui marche bien)?

22. Vous sentez vous sufisamment préparé et informé par les autorités pour affronter un futur cyclone ?
☐ oui ☐ non

23. Eventuellement, par quel(s) moyen(s) souhaiteriez vous être davantage préparé et informé ?

24. Selon vous, quelle est la personne la plus compétente pour parler de risque cyclonique dans votre commune ?
☐ personne ☐ ne sais pas ☐ son nom, sa fonction:

25. Selon vous, quel est l'organisme le plus compétent pour traîter le risque cyclonique en Guadeloupe ?
☐ aucun ☐ ne sais pas ☐ lequel :

26. Selon vous, est-ce que la Guadeloupe a déjà subi un cyclone très destructeur dans le passé (avec de nombreuses victimes) ?
☐ non ☐ ne sais pas ☐ oui, quand ? :

27. Pensez vous que la Guadeloupe puisse un jour subir un cyclone très destructeur ?
☐ oui ☐ non ☐ ne sais pas

28. Le cyclone Lenny de novembre 1999 vous-a-t'il surpris ?
☐ oui ☐ non

29. Avez-vous déjà vécu un phénomène (celui qui vous a affecté : houle, inondation, vent, autre) similaire dans le passé?
☐ non ☐ oui, quand ?

30. Estimez vous ce phénomène (celui qui vous a affecté : houle, inondation, vent, autre) exceptionnel?
☐ non ☐ ne sais pas ☐ oui, pourquoi ?

31. Selon vous quelle est la cause de ce phénomène (celui qui vous a affecté : houle, inondation, vent, autre) ?

32. Savez vous si des régions autres que la Guadeloupe ont été affectées ?
☐ oui ☐ non ☐ ne sais pas

33. Si oui, lesquelles ?

34. Avez vous été correctement averti de l'arrivée du cyclone Lenny ?
☐ oui ☐ non

35. Si oui, par qui et à quel moment ?

36. Avez vous recherché une information sur ce qui était en train de se passer ?
☐ oui ☐ non

37. Avez vous recherché une information sur ce qu'il fallait faire ?
☐ oui ☐ non

38. Si oui, par quel(s) moyen(s) ?
- ☐ en regardant la télé, quelle chaîne?
- ☐ en téléphonant, où?
- ☐ en écoutant la radio, quelle station ?
- ☐ en demandant à quelqu'un, qui ?
- ☐ autrement, précisez:

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

39. Si 'oui', avez vous trouvé cette information :
☐ très adaptée ☐ adaptée ☐ pas adaptée

40. Aviez-vous repéré dans la nature des signes pouvant annoncer le cyclone ?
☐ non ☐ oui, lesquels ?

41. Pouvez vous citer les moments forts de cette crise pour vous?

42. Précisez les principaux problèmes rencontrés au moment de la crise:

43. Quelles mesures de protection avez vous prises au moment de la crise ?

44. Vous êtes vous senti isolé ?
☐ oui ☐ non

45. Avez vous recherché une aide extérieure ?
☐ oui ☐ non

46. Si oui, de quelle nature ?
☐ coup de main ☐ matérielle ☐ morale
☐ information-conseil ☐ autre:
Vous pouvez cocher plusieurs cases.

47. Avez-vous trouvé cette aide ?
☐ oui ☐ non

48. Si oui, d'où est venu le soutien le plus important ?
☐ famille ☐ voisinage
☐ association : ☐ municipalité
☐ pompiers ☐ église :
☐ élus ☐ armée
☐ organisation caritative : ☐ autre:
Vous pouvez cocher plusieurs cases.

49. Si oui, comment avez vous trouvé ce soutien :
☐ très efficace ☐ efficace ☐ inefficace

50. Avez-vous évacué les lieux ?
☐ oui ☐ non

51. Si non, pourquoi?

52. Si oui, dans quelles conditions ?
☐ spontanée ☐ organisée et par qui :

53. Si oui, combien de temps ?

54. Si oui, pour aller où ?

55. Si oui, précisez la qualité de la prise en charge :
☐ excellente ☐ bonne ☐ moyenne ☐ médiocre ☐ nulle

56. Maintenant, résidez-vous au même endroit ?
☐ oui ☐ non

57. Si oui, quelles mesures avez-vous prises pour vous protéger contre : précisez houle, inondation, vent ?
☐ aucune ☐ type de mesure :

58. Si oui, souhaitez vous déménager ?
☐ oui ☐ non

59. Si oui, sous quelles conditions ?

60. Si non, pourquoi ?

61. Si vous avez déménagé, regrettez vous l'endroit précédent ?
☐ oui ☐ non

62. Si oui, pourquoi ?

63. Si non, pourquoi ?

64. Aujourd'hui, avez vous des attentes particulières suite à cet évènement ?
☐ oui ☐ non

65. Si oui, lesquelles ?

66. Après cette crise avez vous eu des aides ?
☐ oui ☐ non

67. Si oui, de quelle nature et de quelle provenance ?
☐ alimentaire :
☐ matérielle :
☐ financière sous forme d'indemnisations:
☐ financière sous forme de prêts:
☐ foncière :
☐ juridique :
☐ psychologique :
☐ autre :
Vous pouvez cocher plusieurs cases.

68. Si oui, comment les avez vous trouvées ?
☐ suffisantes ☐ moyennement suffisantes ☐ pas suffisantes

69. Aujourd'hui, est-ce que pour vous l'évènement Lenny est une histoire terminée ?
☐ oui ☐ non : pourquoi?

70. Est-ce que cet évènement vous a appris quelquechose ?
☐ non ☐ oui : quoi ?

71. Etes vous le propriétaire du bâtiment affecté ?
☐ oui ☐ non

72. Depuis quand occupez vous ce lieu ?

73. Depuis combien d'années vivez-vous en Guadeloupe ?

74. Votre âge :
☐ moins 25 ans ☐ 26 à 35 ans ☐ 36 à 45 ans
☐ 46 à 55 ans ☐ 56 à 65 ans ☐ 66 à 75 ans
☐ Plus de 75 ans

75. Votre sexe :
☐ masculin ☐ féminin

76. Votre profession:

77. Nature du bâtiment :
☐ maçonnerie ☐ bois ☐ les deux ☐ autre :

78. Age du bâtiment :
☐ moins de 5 ans ☐ entre 6 et 10 ans
☐ entre 11 et 20 ans ☐ entre 21 et 30 ans
☐ entre 31 et 40 ans ☐ entre 41 et 50 ans
☐ plus de 50 ans

79. Distance approximative par rapport au rivage (en m):

80. Niveau d'endommagement (préciser le phénomène en cause : houle, inondation, vent, autre) :
☐ dégâts mobiliers ☐ dégâts structurels légers
☐ dégâts structurels lourds ☐ dommages corporels
Vous pouvez cocher plusieurs cases (3 au maximum).

81. Montant global (en FF) des dommages (en précisant si directs et/ou indirects):

82. Autres préjudices (corporels, perte d'emploi, ect.):

83. Les propriétaires sont responsables de la protection de leur maison contre les cyclones éventuels
☐ pas du tout d'accord ☐ pas d'accord ☐ plutôt d'accord
☐ tout à fait d'accord

84. Les autorités publiques font ce qu'elles peuvent pour résoudre les problèmes liés aux cyclones
☐ pas du tout d'accord ☐ pas d'accord ☐ plutôt d'accord
☐ tout à fait d'accord

85. Il existe des techniques permettant de résoudre les problèmes liés aux cyclones
☐ pas du tout d'accord ☐ pas d'accord ☐ plutôt d'accord
☐ tout à fait d'accord

86. Chacun est libre de choisir de vivre où il veut, sans tenir compte des risques auxquels il s'expose
☐ pas du tout d'accord ☐ pas d'accord ☐ plutôt d'accord
☐ tout à fait d'accord

87. Les maires font ce qu'ils peuvent pour remédier aux problèmes des cyclones, indépendamment de la pression des habitants
☐ pas du tout d'accord ☐ pas d'accord ☐ plutôt d'accord
☐ tout à fait d'accord

88. Les autorités locales devraient interdire les nouvelles constructions dans les zones à risques
☐ pas du tout d'accord ☐ pas d'accord ☐ plutôt d'accord
☐ tout à fait d'accord

89. L'Etat est responsable de la protection de ma maison contre de futurs cyclones
☐ pas du tout d'accord ☐ pas d'accord ☐ plutôt d'accord
☐ tout à fait d'accord

90. J'accepterais de payer plus de taxes si cela pouvait aider à résoudre le problème posé par les cyclones
☐ pas du tout d'accord ☐ pas d'accord ☐ plutôt d'accord
☐ tout à fait d'accord

91. Je pense que le problème des cyclones sera bientôt résolu dans ma région
☐ pas du tout d'accord ☐ pas d'accord ☐ plutôt d'accord
☐ tout à fait d'accord

92. Le promoteur a le droit de construire sur des terres qu'il possède, c'est à l'acheteur d'être informé des risques éventuels
☐ pas du tout d'accord ☐ pas d'accord ☐ plutôt d'accord
☐ tout à fait d'accord

93. Les assurances remboursent vite et bien les dégâts liés aux cyclones
☐ pas du tout d'accord ☐ pas d'accord ☐ plutôt d'accord
☐ tout à fait d'accord

94. En comparaison avec mes autres problèmes, les cyclones ne font pas partie de mes préoccupations principales
☐ pas du tout d'accord ☐ pas d'accord ☐ plutôt d'accord
☐ tout à fait d'accord

ANNEXE 8

Questionnaire d'analyse des représentations du risque volcanique utilisé en Guadeloupe.

Date : Enquêteur : Code :

ENQUETE "POPULATION" SUR LA PERCEPTION ET LA CONNAISSANCE DES RISQUES VOLCANIQUES EN GUADELOUPE

Réalisée par l'Université de Montpellier en collaboration avec l'Université Antilles-Guyane

Profil

1. Votre commune et quartier de résidence ?

2. Qui répond au questionnaire ?
☐ 1. Le père ☐ 2. La mère
☐ 3. Autre :.....

3. Votre âge ?

4. Votre profession ?

5. Votre niveau de scolarisation ?
☐ 1. Pas de scolarité ☐ 2. Primaire ☐ 3. Collège
☐ 4. Lycée ☐ 5. Supérieur

6. Depuis combien de temps vivez-vous en Guadeloupe ?

Risques Naturels en Guadeloupe

7. Selon vous, quels sont les risques naturels qui menacent le plus gravement la Guadeloupe ?

8. Personnellement, quel(s) phénomène(s) craignez-vous le plus ?

Eruptions passées de la Soufrière

9. Savez-vous si la Soufrière a déjà provoqué des éruptions dans le passé ?
☐ 1. Oui - Combien ? ..... - Quand ? .....
☐ 2. Non
☐ 3. Je ne sais pas

10. Votre commune a-t-elle déjà été affectée par une de ces éruptions ?
☐ 1. Oui, et ce fut très grave
☐ 2. Oui, mais ce ne fut pas très grave
☐ 3. Non
☐ 4. Je ne sais pas

11. Avez-vous vécu l'éruption de 1976 ?
☐ 1. Oui ☐ 2. Non

12. Aviez-vous évacué votre domicile ?
☐ 1. Oui ☐ 2. Non

13. Si oui, comment ?
☐ 1. Spontanément sans qu'on me le demande
☐ 2. Sur décision des autorités

14. Si oui, où avez-vous trouvé refuge ?

15. Pour vous, quels ont été les moments forts de cette crise ?

16. Cet événement vous-a t'il appris quelque chose ?
☐ 1. Non ☐ 2. Oui

17. Si oui, quoi ?

Future éruption de la Soufrière

18. Pensez-vous que la Soufrière puisse entrer de nouveau en éruption un jour ?
☐ 1. Oui ☐ 2. Non ☐ 3. Je ne sais pas

19. Si oui, dans combien de temps ?

20. Selon vous, à quoi sera due cette future éruption ?

21. Connaissez-vous des signes de la nature (précurseurs) qui permettront d'annoncer une future éruption ?

22. En cas d'éruption future, donnez la liste des différents phénomènes susceptibles de se manisfester ?

Parmi ces phénomènes susceptibles de se manifester:

23. Quel sera le plus dangereux pour les personnes?

24. Quel sera le plus dangereux pour les biens (infrastructures)?

25. Quel est celui qui aura le plus de chance de se produire?

26. Quel est celui qui aura le moins de chance de se produire?

27. Dans quel(s) secteur(s) à la surface de la Soufrière ces phénomènes prendront-ils naissance?

28. Une fois en éruption, combien de temps la Soufrière peut-elle rester en activité ?
☐ 1. Quelques minutes ☐ 2. Plusieurs heures
☐ 3. Plusieurs jours ☐ 4. Plusieurs semaines
☐ 5. Plusieurs mois ☐ 6. Plusieurs années
☐ 7. Je ne sais pas

29. A partir du moment où la Soufrière se réveille, cochez ce qui vous paraît le plus juste :
☐ 1. Il y aura forcément une grande éruption à un moment donné - Selon vous, au bout de combien de temps?
☐ 2. Il n'y aura pas forcément une grande éruption et le volcan pourra s'endormir de nouveau

30. En cas de future éruption, pensez-vous que votre maison puisse subir des dommages ?
☐ 1. Oui ☐ 2. Non ☐ 3. Je ne sais pas

31. Si oui, par quoi ?

32. Quelle est selon vous la commune de la Guadeloupe qui vous paraît la plus sûre s'il devait y avoir une future éruption de la Soufrière ?

33. D'après vous, existe-t-il des moyens de se protéger d'une éruption volcanique en cours ?
☐ 1. Oui ☐ 2. Non ☐ 3. Je ne sais pas

34. Si oui, lesquels :

35. Si on vous demandait d'évacuer parce que la Soufrière menace, accepteriez-vous de le faire ?
☐ 1. Oui, avant même qu'on me le demande
☐ 2. Oui, sans conditions dès qu'on me demande
☐ 3. Oui mais sous conditions - Lesquelles ?
.....
☐ 4. Non, je refuserai - Pourquoi?.....

36. Si oui, où iriez-vous ?
☐ 1. Là où on me le dit
☐ 2. Dans la famille - Quelle commune ?
.....
☐ 3. Hors de Guadeloupe

37. En cas d'évacuation, combien de temps accepteriez-vous de vivre loin de chez vous ?
☐ 1. Un ou deux jours
☐ 2. Une semaine
☐ 3. Un mois
☐ 4. Tout le temps nécessaire
☐ 5. Ne sais pas

Autres volcans

38. En dehors de la Soufrière, pensez-vous qu'il existe d'autres volcans dangereux pour la Guadeloupe ?
☐ 1. Oui
Lesquels?.....
.....
☐ 2. Non
☐ 3. Je sais pas

39. Suivez-vous l'évolution de l'éruption du volcan de Montserrat ?
☐ 1. Oui ☐ 2. Non

40. Savez-vous quand a demarré cette éruption ?
☐ 1. Oui - Année :.....
☐ 2. Je ne sais pas

41. Savez-vous si cette éruption est terminée ?
☐ 1. Oui ☐ 2. Non ☐ 3. Je ne sais pas

42. Vous-êtes vous senti directement menacé par cette éruption ?

☐ 1. Oui - A quel moment ?
.....
.....

☐ 2. Non

43. Vis-à-vis du risque volcanique en général, pensez-vous que :

☐ 1. La Guadeloupe est autant menacée que la Martinique

☐ 2. La Guadeloupe est plus menacée que la Martinique

☐ 3. La Guadeloupe est moins menacée que la Martinique

☐ 4. Je ne sais pas

Surveillance et Prévision

44. Savez-vous si la Soufrière est actuellement surveillée ?

☐ 1. Oui - Par quel organisme ?..... ☐ 2. Non

☐ 3. Je ne sais pas

45. D'après vous, les volcanologues peuvent-ils aujourd'hui prévoir quand se produira la prochaine éruption de la Soufrière ?

☐ 1. Oui ☐ 2. Non ☐ 3. Je ne sais pas

46. Si oui, combien de temps à l'avance ?

47. Pensez-vous que les scientifiques puissent prévoir le déroulement d'une éruption ?

☐ 1. Oui ☐ 2. Non ☐ 3. Je ne sais pas

48. En cas de réveil de la Soufrière, quelle serait selon vous la personne la mieux placée pour s'adresser à la population ?

Information

49. Vous arrive-t-il de discuter en famille des dangers que pourrait présenter la Soufrière ?

☐ 1. Souvent ☐ 2. Quelques fois ☐ 3. Rarement

☐ 4. Jamais

50. Pour quels types de risques souhaiteriez-vous être davantage informé ?

☐ 1. Tremblements de terre

☐ 2. Inondations

☐ 3. Eruptions volcaniques

☐ 4. Raz de marée

☐ 5. Cyclones

☐ 6. Glissements de terrain

☐ 7. Autres : .....

51. Pensez-vous que les autorités vous cachent des choses au sujet du risque volcanique en Guadeloupe ?

☐ 1. Non ☐ 2. Oui ☐ 3. Je ne sais pas

52. Si vous pensez que oui, précisez pourquoi ?

53. Au sujet du développement du sud de la Guadeloupe, pensez-vous que :

☐ 1. Ce n'est pas une bonne chose à cause du risque volcanique

☐ 2. C'est une bonne chose même si le volcan peut poser des problèmes

☐ 3. Autre avis sur le sujet :
.....

54. Selon vous, par quel(s) moyen(s) peut on réduire le risque volcanique en Guadeloupe ?

55. D'une manière générale et en guise de conclusion, que vous inspire ce volcan, ou autrement dit, que symbolise-t'il pour vous ?

Espaces menacés

56. Veuillez griser, rayer ou colorier la partie de la Guadeloupe que vous considérez comme la plus menacée en cas d'éruption future de la Soufrière

ANNEXE 9

Proposition de règlement applicable dans le cadre du PPR Volcan de la Martinique (Leone & Lesales, 2002).

PROJET DE RÈGLEMENT – PPR VOLCAN (Martinique)

Sommaire

Chap. I. Préambule

Art. I.1 Prescription
Art. I.2 Champ d'application
Art. I.3 Objet du règlement
Art. I.4 Effets du plan de prévention des risques

Chap. II. Réglementation des zones en matière de construction, d'urbanisme et d'exploitation

Art. II.1 Les zones rouges
Art. II.2 Les zones jaunes
Art. II.3 Les zones bleues et blanches

Chap. III. Réglementation des zones en matière de prévention, de protection et de sauvegarde

Art. III.1 Mesures recommandées avant une éruption volcanique
Art. III.2 Mesures recommandées pendant une éruption volcanique
Art. III.3 Mesures recommandées après une éruption volcanique

CHAPITRE I : Préambule

Article I.1 : Prescription

En application de l'article n°2 du décret 95-1089 du 5 octobre 1995, le Préfet de la Région Martinique a prescrit par arrêté du …….. l'établissement d'un plan de prévention des risques naturels pour la Région Martinique.
Il a par ce même arrêté, chargé la Direction Départementale de l'Equipement de la Martinique d'instruire le dossier.

Article I.2 : Champ d'application

Le présent règlement s'applique sur l'ensemble du territoire de la Région Martinique.

Il détermine les mesures à mettre en œuvre pour prévenir les risques liés aux manifestations éruptives de la montagne Pelée.

Conformément à l'article 40.1 de la loi 95.101 du 2 février 1995 et aux procédures d'évaluation des aléas volcaniques retenus pour l'élaboration du plan de prévention des risques volcaniques, le territoire de la Région Martinique a été divisé en quatre zones.

- Une **zone rouge** exposée à des risques majeurs;
- Une **zone jaune** exposée à des risques forts ;
- Une **zone bleue** exposée à des risques moyens ;
- Une zone blanche exposée à des risques faibles.

Article I.3 : Objet du règlement

Le présent règlement précise les mesures d'interdiction et les prescriptions applicables dans chacune des zones décrites précédemment en vertu des alinéas 1 et 2 de l'article 40-1 de la loi du 22 juillet 1987.
Il concerne les constructions et aménagements futurs ainsi que ceux qui existent.

Il mentionne les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde mentionnées à l'alinéa 3 de l'article 40-1 de la loi du 22 juillet 1987 et à mettre en œuvre par les collectivités publiques dans le cadre de leurs compétences, ainsi que celles qui peuvent incomber aux particuliers.

Le règlement indique celles de ces mesures dont l'application est recommandée ou obligatoire et le délai fixé pour leur mise en œuvre.

Article I.4 : Effets du plan de prévention des risques

Le Plan de Prévention des Risques approuvé par le Préfet vaut servitude d'utilité publique au titre de l'article 40-4 de la loi du 22 juillet 1987. Il doit donc être annexé au Plan d'Occupation des Sols en application des articles L 126-1 et R 123-24-4 du code l'Urbanisme, par l'autorité responsable de la réalisation du POS.

Le non respect des dispositions du Plan de Prévention des Risques approuvé est sanctionné pénalement selon les dispositions de l'article L 480-4 du Code de l'Urbanisme.

CHAPITRE II – Réglementation des zones en matière de construction, d'urbanisme et d'exploitation

Article II.1 : Les zones rouges sont inconstructibles

Les **zones rouges** sont estimées très exposées aux aléas volcaniques les plus forts, avec des probabilités d'occurrence maximales en fonction des scénarii établis.
Il s'agit de zones soumises aux aléas volcaniques de niveau majeur suivants :

- coulées pyroclastiques types H.A.R. (type Mérapi) ;
- intrusions de lave ;
- lahars ;
- mouvements de terrain de grande ampleur.

Y sont notamment interdits au titre des règles d'urbanisme :

- Toutes constructions nouvelles liées à quelque activité que ce soit, à usage d'habitation ou d'annexe ainsi que celles destinées à un usage commercial, artisanal, industriel ou agricole.

Compte tenu de l'absence de risque qualifié d'immédiat, et des ressources que peut générer l'exploitation concertée de ces zones, y sont néanmoins autorisés les projets suivants :

- Les installations ou aménagements soumis à déclaration d'utilité publique ;
- Les travaux d'entretien, de réhabilitation et de gestion d'infrastructures publiques (routes, sentiers, ouvrages et aménagements hydrauliques) des biens et des activités diverses implantés antérieurement à la publication du présent arrêté.
- Les captages d'eau.
- Les plantations.
- L'exploitation de carrières.

Article II.2 : Les zones jaunes sont constructibles, sous réserve de recommandations particulières

Les **zones jaunes** sont estimées soumises aux aléas volcaniques de niveaux majeur, forts ou moyens suivants :

- retombées aériennes de niveaux d'aléa majeur et fort ;
- coulées pyroclastiques de type L.A.R. de niveaux d'aléa majeur et fort ;
- émanations de gaz de niveau d'aléa majeur ;
- lahars de niveaux d'aléa majeur, fort et moyen ;
- tsunamis de niveau d'aléa majeur.

Le développement reste autorisé. Y sont fortement recommandées les règles de construction, d'urbanisme ou d'exploitation suivantes :

a. Pour les zones soumises aux retombées aériennes :
- Renforcer la structure et le design des toits de façon à ce que ceux-ci puissent supporter l'accumulation des cendres et lapilli.
- Améliorer la résistance des bâtiments aux incendies.

b. Pour les zones soumises aux coulées pyroclastiques :
- Améliorer la résistance des bâtiments aux incendies.
- Limiter/ proscrire l'implantation d'infrastructures et d'activités dites sensibles, présentant un enjeu régional (bâtiments de classe D)

c. Pour les zones soumises aux émanations de gaz :
- Utiliser des matériaux résistants à la corrosion, notamment pour la toiture et les façades.

d. Pour les zones soumises aux lahars :
- Prévoir un calibrage adapté des ponts aux passages des thalwegs exposés.
- Prévoir la protection des biens et des activités exposés aux phénomènes d'érosion.
- Limiter/ proscrire l'implantation humaine et notamment d'infrastructures et d'activités dites sensibles, présentant un enjeu régional (bâtiments de classe D)

e. Pour les zones soumises aux tsunamis :
- Mêmes recommandations que pour l'aléa houle cyclonique.
- Limiter/ proscrire l'implantation humaine (habitations) et notamment d'infrastructures et d'activités dites sensibles, présentant un enjeu régional (bâtiments de classe D)

Article II.3 : Les zones bleues et blanches sont constructibles sans prescriptions particulières

Les **zones bleues et les zones blanches** sont estimées exposées aux aléas volcaniques de niveaux forts, moyens et faibles suivants :

- retombées aériennes de niveaux d'aléa moyen et faible ;
- coulées pyroclastiques de niveau d'aléa moyen ;
- émanations de gaz de niveau d'aléa moyen ;
- mouvements de terrain de grande ampleur de niveau d'aléa moyen ;
- tsunamis de niveau d'aléa fort et moyen.

Elles sont constructibles sans prescriptions particulières. S'y appliquent seulement des mesures de prévention, de protection et de sauvegarde à prendre avant, pendant ou après une éruption volcanique (**voir chapitre suivant**) :

CHAPITRE III – Réglementation des zones en matière de prévention, de protection et de sauvegarde

Article III.1 : Mesures recommandées avant une éruption volcanique

a. Sur tout le territoire :
- Améliorer les réseaux de communication.
- Développer et améliorer les possibilités d'évacuation par voie maritime.
- Améliorer et entretenir les infrastructures d'accueil prévues par le Plan de Secours Spécialisé (PSS) Volcan.
- Réaliser régulièrement des exercices d'évacuation et de gestion des situations d'urgence et tester les infrastructures d'accueil.
- Développer et maintenir des programmes permanents d'éducation et d'information sur les risques volcaniques dans les aspects pratiques d'une crise volcanique.

b. En zone rouge et en zone jaune :
- Améliorer et maintenir le réseau routier, en supprimant notamment les zones de rétrécissements importants.
- Définir des itinéraires d'évacuation fonctionnels et prévoir une signalétique adaptée.
- Prévoir au niveau des Mairies un stock suffisant de masques de protection des voies respiratoires contre les effets de retombées de cendres.
- Planifier l'évacuation du bétail.

c. En zone bleue et en zone blanche :
- Définir des zones d'accueil provisoire et permanent en prévision d'une évacuation.
- Définir de nouvelles zones d'exploitation de la ressource en eau potable.

Article III.2 : Mesures recommandées pendant une crise volcanique

a. Sur tout le territoire :
- Protéger les prises d'eau et améliorer les procédures de contrôle et de gestion de la qualité de l'eau.
- Prévenir le stockage et l'utilisation des eaux pluviales dans des citernes notamment.
- Instituer des mesures préventives pour la maintenance des véhicules, de toute machinerie, des filtres, des interrupteurs, des ordinateurs et autres équipements électromagnétiques vulnérables aux poussières volcaniques.

b. En zone rouge :
- Vider complètement les bâtiments exposés.

c. En zone jaune :
- Evacuer, lorsque cela est possible, tout matériel de stockage de combustible, particulier (bouteilles de gaz…) ou collectif de façon à prévenir l'extension d'incendies secondaires.

d. En zone bleue et en zone blanche :
- Maintenir un programme de déblayage/ nettoyage des routes en fonction des retombées aériennes.
- Développer une politique de gestion du trafic routier.
- Assurer le bon entretien des infrastructures d'accueil.
- Augmenter la périodicité des contrôles et de la maintenance des systèmes électromagnétiques.

Article III.3 : Mesures recommandées après une éruption volcanique

a. En zone rouge :
- Développer un programme de « revégétalisation » des versants instables.
- Aménager les chenaux d'écoulement des lahars secondaires.
- Mettre en place des dispositifs d'alerte, de fermeture des ponts et de réglementation de l'accès aux zones urbanisées exposées en cas de lahar secondaire.

b. En zone Jaune :
- Dans des limites raisonnables, définir des programmes de réhabilitation des zones endommagées (sols agricoles).
- Protéger les prises d'eau et mettre en place de procédures de gestion de la qualité de l'eau.

Article III.4 : Mesures obligatoires avant une éruption volcanique à réaliser dans un délais de 3 ans :

a. En zone rouge et en zone jaune :
- Mise en place par les communes concernées d'une campagne d'information et de sensibilisation annuelle sur le risque volcanique chaque 8 mai ou 30 août avec dans la mesure du possible des simulations d'évacuations.

F. Leone & T. Lesales, 2002

ANNEXE 10

Synthèse et pondération de l'état des représentations collectives (population) des risques naturels à la Martinique (séismes, volcanisme, cyclones)

Contribution au diagnostic de vulnérabilité humaine (Leone, inédit).

Synthèse de l'état des représentations collectives (population) des risques naturels à la Martinique (séismes, volcanisme, cyclones) - Contribution au diagnostic de vulnérabilité humaine

	Enquêtes			Principaux facteurs analysés et résultats				
Phénomène	**Echantillon**	**Date et lieu**	**Mode opératoire**	**Facteurs**	**Principales questions posées (critères)**	**Classement des résultats significatifs (indicateurs)**	**NRCR**	**IRCR**
Multi-risques	129 personnes	mai 2001, Ajoupa-Bouillon, Basse-Pointe, Macouba, Grand-Rivière	Questionnaire aux parents via élèves et entretiens directs	**Représentation générale des risques**	* Quels sont les risques naturels qui vous semblent les plus graves à la Martinique ?	1. séismes (88%), 2. cyclones (85%), 3. éruptions volcaniques (83%)	1	1,25
					* Pensez-vous que votre maison peut être, gravement menacée par : (liste de phénomènes à cocher)	1. séismes (74%), 2. éruptions (61%), 3. cyclones (60%)	1	
					* Personnellement que craignez-vous le plus (phénomènes) ?	1. séismes (88%), 2. éruptions (84%), 3. cyclones (82%)	1	
					* Quels sont les événements suivants qui pourraient se produire dans moins de 10 ans ?	1. cyclone (76%), 2. séisme (71%), 3. glissement de terrain (40%)	2	
						IRCR :	**1,25**	
Risque sismique	224 personnes à l'intérieur de bâtiments	juin 1999, Martinique	Entretiens directs, téléphone, dépôt après le séisme	**Capacité de détection du phénomène**	Au bout de combien de temps avez-vous réalisé qu'il s'agissait d'un séisme ?	1. après quelques secondes (48,2%), 2. immédiatement (47,8%)	1	1,5
					Durant combien de temps avez-vous ressenti les secousses ?	1. ne sais pas (35,3%), 2. 10 à 30 sec. (24,1%), 3. 5 à 10 sec (16,1%)	2	
				Connaissance du phénomène	Pouvez-vous indiquer sa magnitude sur l'échelle de Richter ?	1. entre 5 et 6 (71,4%), 2. ne sais pas (25%), 3. inférieure à 5 (1,8%)	1	1,7
					Pouvez-vous situer son épicentre (sa source) ?	1. ne sais pas (42,4%), 2. réponse approximative (33%) , 3. mauvaise réponse (12,5%)	3	
					Avez vous craint qu'un autre séisme survienne ? (connaissance des répliques)	1. oui (61,6%), 2. non (36,2%), 3. ne sais pas (2,2%)	1	
				Application des consignes	* Qu'avez-vous fait au moment des secousses ?	1. réactions inadaptées (75,5%), 2. réactions adaptées (19,6%)	3	3
					* Qu'avez-vous fait juste après les secousses ?	1. réactions inadaptées (63,6%), 2. réactions adaptées (26,6%)	3	
					D'une manière générale avez-vous pris des mesures pour affronter un séisme dans votre habitation ?	1. non (70,1%), 2. oui (21,9%)	3	
				Capacité d'initiative dans la recherche d'informations et de protections	Avez vous recherché immédiatement une information sur ce qui venait de se passer ?	1. oui (69,2%), 2. non (28,1%)	1	1
				Sentiment de sécurité	Vous sentez-vous de nouveau en sécurité maintenant ?	1. oui (47,8%), 2. non (46,4%)	2	2,5
					D'une manière générale, vous sentez-vous suffisamment préparé et informé pour affronter un séisme plus fort ?	1. non (60,7%), 2. oui (29,5%), 3. ne sais pas (9,8%)	3	
				Qualité de la mémoire collective	Selon vous, est-ce que la Martinique a déjà subi un séisme très destructeur dans le passé (avec de nombreuses victimes) ?	1. oui (48%), 2. non (40%), 3. ne sais pas (12%)	2	2,5
					* Combien de séismes similaires avez-vous ressenti dans le passé ? (dates ?)	15 années inventés ; 8 années citées sur 22 concernées	3	
				Persistance de croyances	Persistance de croyances sur les causes, les responsabilités, les effets, les solutions	pas quantifiées mais persistantes chez certaines personnes âgées et pratiquantes	2	2
						IRCR :	**2,14**	

* questions à réponses multiples

Echelle de vulnérabilité humaine basée sur le niveau de représentation collective des risques (NRCR) :	1	Faible
	2	Modérée
	3	Forte
Indice de Représentation Collective des Risques (IRCR) somme des NRCR/nombre de critères retenus	**IRCR =**	

	Enquêtes			Principaux facteurs analysés et résultats				
Phénomène	**Echantillon**	**Date et lieu**	**Mode opératoire**	**Facteurs**	**Principales questions posées (critères)**	**Classement des résultats significatifs (indicateurs)**	**NRCR**	**IRCR**
Risque volcanique	129 personnes	mai 2001, Ajoupa-Bouillon, Basse-Pointe, Macouba, Grand-Rivière	Questionnaire aux parents via élèves et entretiens directs	**Représentation du phénomène**	* D'après vous, à quel endroit, à la surface de la Montagne Pelée, les phénomènes volcaniques prendraient-ils naissance au cours d'une éventuelle éruption?	1. cratère ou sommet (54%), 2. ne sais pas (50%), sur les flancs (6%)	2	**1,86**
					A partir du moment où la Montagne Pelée se réveille, quand y aura-t'il une grande éruption ?	1. pas tout de suite (67%), 2. tout de suite (17%), 3. ne sais pas (16%)	1	
					Selon vous, combien de temps la Montagne Pelée peut-elle rester en activité à partir du moment où elle s'est réveillée ?	1. ne sais pas (27%), 2. plusieurs jours (16%), 3. plusieurs mois (16%)	3	
					En dehors da la Montagne Pelée, pensez-vous qu'il existe d'autres volcans dangereux pour la Martinique ?	1. non (68%), 2. oui (24%), 3. ne sais pas (8%)	1	
					* Quels sont les phénomènes qui, selon vous, pourraient se manifester lors d'une éruption de la Montagne Pelée ?	1.coulées de lave (64%), 2. retombées de cendres (40%), 3. fumerolles (40%), 4. séismes (32%), 5. blocs et bombes (22%)	3	
					Quel est celui qui a le plus de chances de se produire ?	1. ne sais pas (52%), 2. lave (11%), 3. séisme (6%), 4. cendre (5%)	3	
				Représentation du risque (effets et espaces)	Parmi les phénomènes que vous venez d'indiquer, quel est le plus dangereux pour les personnes ?	1. ne sais pas (26%), 2. lave (16%), 3. gaz (12%), 4. nuées ardentes (11%)	3	**2,5**
					Parmi les phénomènes que vous venez d'indiquer, quel est le plus dangereux pour les biens (maisons, routes, etc.)?	1. ne sais pas (30%), 2. lave (24%), 3. séismes (19%), 4. projections (5%)	2	
					* Parmi les régions indiquées ci-dessous, quelles seraient à votre avis les trois régions habitées les plus menacées si la Montagne Pelée entrait en éruption?	1. Saint-Pierre (84%), 2. Morne-Rouge (64%), 3. Prêcheur (46%)	2	
	103 personnes				Pourriez-vous colorier la partie de la Martinique que vous considérez comme la plus menacée en cas d'éruption de la Montagne Pelée ?	bon gradient nord-sud mais des distorsions apparaissent par rapport au zonage officiel des aléas. Sous estimation de la menace côté NE	3	
	129 personnes			**Connaissance des dispositifs de prévention et de protection**	Pensez-vous que la Montagne Pelée est actuellement surveillée?	1. oui (87%), 2. ne sais pas (6%), 3. non (2%)	1	**1,7**
					D'après-vous, les volcanologues peuvent-ils aujourd'hui prévoir quand se produira la prochaine éruption de la Montagne Pelée ?	1. oui (39%), 2. non (36%), 3. ne sais pas (23%)	2	
					D'après vous, existe-t-il des moyens de se protéger d'une éruption volcanique ?	1. oui (37%), 2. non (29%), 3. ne sais pas (29%)	2	
				Capacité d'initiative dans la recherche d'information	Vous arrive-t-il de discuter en famille des dangers que pourrait présenter la Montagne Pelée ?	1. non-réponse (40%), 2. Oui, mais rarement (26%), 3. oui, quelquefois (21%)	3	**3**
				Adaptation des comportements potentiels	Si on vous demandait d'évacuer parce que la Montagne Pelée menace, accepteriez-vous (différentes modalités) ?	1. oui, avant qu'on me le demande (50%), 2. Oui, dès qu'on me le demande (36%), 3. Oui mais sous conditions (7%)	3	**2**
					Si on vous demandait de partir de chez vous parce que la Montagne Pelée menace, combien de temps pensez-vous, que vous accepteriez de vivre loin de chez vous?	1. tout le temps nécessaire (67%), 2. ne sais pas (18%)	1	
				Qualité de la mémoire	Votre commune a-t-elle déjà été affectée par une éruption de la Montagne Pelée dans le passé ?	1. oui, mais pas grave (36%), 2. Non (21%), 3. ne sais pas (19%), 4. Oui, et ce fut très grave (16%)	2	**2**
							IRCR :	**2,18**

* questions à réponses multiples

Echelle de vulnérabilité humaine basée sur le niveau de représentation collective des risques (NRCR) :	1	Faible
	2	Modérée
	3	Forte

Indice de Représentation Collective des Risques (IRCR) IRCR = somme des NRCR/nombre de critères retenus

	Enquêtes			Principaux facteurs analysés et résultats				
Phénomène	**Echantillon**	**Date et lieu**	**Mode opératoire**	**Facteurs**	**Principales questions posées (critères)**	**Classement des résultats significatifs (indicateurs)**	**NRCR**	**IRCR**
Risque cyclonique	100 personnes sinistrées par la houle	février 2001, littoral caraïbe	Entretiens directs après le cyclone	**Capacité de détection du phénomène**	Aviez-vous repéré dans la nature des signes pouvant annoncer le cyclone ?	1. non (70,8%), 2. oui (29,2%)	3	3
				Représentation du phénomène	* Selon vous quelle est la cause de cette houle ?	1. vent (26%), 2. cyclone ou ouragan (15,6%), 3. éruption volcanique (14,3%), 4. Dieu (11,7%)	2	2,5
					* Citez les mois de l'année où l'on a le plus de chances de subir un cyclone :	1. septembre (28,6%), 2. octobre (22,5%), 3. août (16,8%), 4. novembre (13,4%)	1	
					* Quels sont les phénomènes associés au cyclone ?	1. vent (46%), 2. pluie (34%), 3. houle et vagues (16,8%), 4. inondation (3,6%)	2	
				Représentation du risque (effets et espaces)	Pensez vous que l'île puisse un jour subir un cyclone très destructeur ?	1. oui (38,7%), 2. ne sais pas (34,4%), 3. non (26,9%)	2	1,5
					Selon vous, laquelle des deux îles (Martinique et Guadeloupe) est la plus menacée par des cyclones ?	1. la Guadeloupe (42,4%), 2. autant l'une que l'autre (35,4%), 3. ne sais pas (18,2%)	1	
					* Précisez les endroits de l'île les plus exposés aux effets des cyclones (1.vent, 2. inondations, 3. houle, 4.glissements de terrain):	1. toute l'île (10%), 2. les côtes (4%), 3. le Nord (3%)	2	
					Estimez vous prendre des risques en habitant ici (précisez vis à vis de quel phénomène) ?	1. oui (57,6%), 2. ne sais pas (21,7%), 3. non (20,7%)	1	
				Connaissance des dispositifs de prévention et de protection	En cas de cyclone, pensez vous que l'on puisse se protéger contre les effets du vent ?	1. non (67%), 2. oui (21,6%), 3. ne sais pas (11,3%)	3	1,64
					En cas de cyclone, pensez vous que l'on puisse se protéger contre les effets de la houle ?	1. non (70,4%), 2. oui (20,4%), 3. ne sais pas (9,2%)	1	
					En cas de cyclone, pensez vous que l'on puisse se protéger contre les effets des inondations ?	1. non (78,4%), 2. oui (17,5%), 3. ne sais pas (4,1 %)	2	
					En cas de cyclone, pensez vous que l'on puisse se protéger contre les effets des glissements ?	1. non (67,5%), 2. ne sais pas (17,5%), 3. oui (15,5%)	2	
					Combien y-a t'il de phases d'alerte officielles face à un risque cyclonique ?	1. 3 (74,7%), 2. ne sais pas (15,2%), 3. 2 (5,1%)	1	
					* Précisez les consignes à suivre avant le passage d'un cyclone :	1. stocker de l'eau et des vivres, 2. se protéger	1	
					* Précisez les consignes à suivre pendant le passage d'un cyclone :	1. rester chez soi	1	
					* Précisez les consignes à suivre après le passage d'un cyclone :	1. attendre les secours, 2. ne pas sortir, 3. aider	1	
					* Quelles mesures de protection avez vous prises au moment de la crise ?	1. aucune (15%), 2. fermeture des portes (5%)	3	
					Selon vous, quelle est la personne la plus compétente pour parler de risque cyclonique dans votre commune ?	1. le maire (75%), 2. les conseillers municipaux (17,9%), 3. le préfet (7,1%)	2	
					Selon vous, quel est l'organisme le plus compétent pour traiter le risque cyclonique sur l'île ?	1. météo-France (24,3%), 2. Préfecture (21,6%), 3. la Mairie (16,2%)	1	
				Confiance dans les autorités	D'une manière générale, comment jugez-vous le travail des autorités en matière de gestion du risque cyclonique ?	1. bon (47%), 2. moyen (39%), 3. excellent (6%)	2	2
				Capacité d'initiative dans la recherche d'informations et de protections	Le houle de novembre 1999 vous a t'elle surpris ?	1. oui (84,8%), 2. non (15,2%)	2	2,7
					Avez vous recherché une information sur ce qui était en train de se passer et sur ce qu'il fallait faire ?	1. non (84,9%), 2.oui (15,1%)	3	
					Si vous vivez au même endroit, avez-vous pris des mesures pour vous protéger (depuis la crise) ?	1. non (91,4%), 2. oui (8,6%)	3	
				Qualité de la mémoire	Selon vous, est-ce que l'île a déjà subi un cyclone très destructeur dans le passé (avec de nombreuses victimes) ?	1. oui (38,7%), 2. ne sais pas (34,4%), 3. non (26,9%)	2	2
				Persistance de croyances	Persistance de croyances sur les causes, les responsabilités, les effets, les solutions	quelques croyances sur les causes surnaturelles des cyclones (divines et mystérieuses)	2	2
					* questions à réponses multiples	**IRCR :**	**1,84**	

Echelle de vulnérabilité humaine basée sur le niveau de représentation collective des risques (NRCR) :	1	Faible
	2	Modérée
	3	Forte

Indice de Représentation Collective des Risques (IRCR) **IRCR = somme des NRCR/nombre de critères retenus**

ANNEXE 11

Exemples de scénarios d'endommagement et de pertes induites par des aléas naturels.

Exemples de scénarios d'endommagement et de pertes induites par des aléas naturels

Zone géographique concernée	Références	Principaux éléments exposés retenus[1]	Quantification des dommages potentiels en pertes économiques directes ou indirectes[2]	Représentations cartographiques des résultats[3]
Séismes				
San Francisco - USA	Cochrane, 1974	Bâtiments	Directes et indirectes	?
San Francisco - USA	Steinbrugge, 1981	Bâtiments	?	?
San Francisco - USA	RMS, 1995a	Bâtiments – Personnes	Directes et indirectes	?
Salt Lake City - USA	Rogers & Algermissen, 1976	Bâtiments	Directes et indirectes	?
Chine	Chen et al., 1982 et 2001	PIB	Directes et indirectes	Oui
Los Angeles - USA	Steinbrugge et al., 1981	Bâtiments	Non	?
Los Angeles - USA	RMS, 1995b	Bâtiments – Personnes	Directes et indirectes	?
Quito – Equateur	Fernandez et al., 1994 ; Chatelain J.L. et al.,1994	Bâtiments - Réseaux physiques	Directes	Oui
Amérique centrale	Chen et al., 2002	PIB	Directes et indirectes	Oui
Monde	Chen et al., 1995	PIB	Directes et indirectes	Oui
Catania - Italie	Faccioli et al., 1999	Bâtiments	Non	Oui
Portland - USA	Wang et al., 1991	Réseau physiques (eau potable, eux usées)	?	?
Turquie	Bommer et al., 2002	Bâtiments	Directes	Oui
Memphis - USA	Shinozuka et al., 1997 ; Chang et al. Nd ; Chang et al. 1996	Réseaux physiques (électricité, eau, gaz)	Directes et indirectes	Oui
Tokyo - Japon	RMS, 1995c	Bâtiments – Personnes	Directes et indirectes	Non
Préfecture de Shisuoka - Japon	Kuribayashi.et al., 1982	Personnes – Bâtiments - Infrastructures diverses – Réseaux physiques	Directes et idirectes	Non
Région de Lambesc - France	Bastet et al., 1985	Personnes – Bâtiments – Infrastructures diverses	Directes et indirectes	Non
Victoria - USA	Foster & Carey, 1976	Bâtiments	Directes	?
Californie - USA	Pate, 1980	Bâtiments	Directes	Oui
Thessaloniki - Grèce	Kappos et al., 1998	Bâtiments	Directes	Non
Catalonia - Espagne	Roca et al., nd	Bâtiments – Personnes	Directes	Oui
Pereira - Colombie	Jaramillo & Campos Garcia, nd	Bâtiments	Directes	Non
Toscane - Italie	SERGISAI Working Group, 1998	Bâtiments – Hôpitaux	Non	Oui
Barcelona - Espagne	SERGISAI Working Group, 1998	Bâtiments	Non	Oui
Fort-de-France - France	BRGM/Gemitis ; Monge et al.,1999 ; Martin et al., 1993, 1994, 1996, 1997	Bâtiments	Non	Non
Pointe-à-Pitre - France	BRGM/Gemitis ; Martin et al., 1993, 1994, 1996, 1997	Bâtiments	Non	Oui
Nice - France	BRGM/Gemitis ; Lutoff, 2000	Bâtiments - Réseaux physiques - Système urbain	Non	Oui
Addis Ababa - Ethiopie	(ISDR/Radius)	Bâtiments + ?	?	?
Antofagasta - Chili	(ISDR/Radius)	Bâtiments + ?	?	?
Bandung - Indonésie	(ISDR/Radius)	Bâtiments + ?	?	?
Guayaquil - Equateur	(ISDR/Radius)	Bâtiments + ?	?	?
Izmir - Turquie	(ISDR/Radius)	Bâtiments + ?	?	?
Skopje - Ex-Rép. Yougoslave	(ISDR/Radius)	Bâtiments + ?	?	?
Tashkent - Ouzbékistan	(ISDR/Radius)	Bâtiments + ?	?	?
Tijuana - Mexique	(ISDR/Radius)	Bâtiments + ?	?	?
Zigong - Chine	(ISDR/Radius)	Bâtiments + ?	?	?
Région d'Irkoutsk - Russie	Amendola et al., 2000	Bâtiments	Directes et indirectes	Oui
Vallée de la Vésubie - France	Durville & Meneroud, 1987	Réseau routier	Oui	Oui
Basel - Suisse	Fäh et al., 2001	Bâtiments	Non	Oui
Provinces de Gilan et Zanjan - Iran	Tavakoli & Tavakoli, 1993	Bâtiments résidentiels	Non	NOn
Barcelone - Espagne	Torres-Vera & Canas, 2003	Conduites souterraines (réseaux physiques)	Non	Non
Edremit - Turquie	Musson, 2000	Bâtiments	Non	Non
Los Angeles	Cho et al., 1998	Réseaux physiques de transport	Economiques Directes et indirectes	Oui
Mid West - USA	Cochrane, 1997	?	?	?
San Francisco	Moore et al.,	Réseau physique autoroutier	Directes	Oui
Wellington - New Zealand	Spence et al., 1998	Bâtiments – Personnes	?	?

Exemples de scénarios d'endommagement et de pertes induites par des aléas naturels

Eruptions volcaniques				
Furnas - Sao Miguel - Açores	Pomonis et al., 1999	Bâtiments	Non	Oui
Vésuve – Italie (retombées aériennes)	Barberi et al., 1990	Bâtiments	?	?
Vésuve – Italie (retombées aériennes)	Pareschi et al., 2000	Bâtiments	Non	?
Champs Phlégréens – Italie (coulées pyroclastiques)	Alberico et al., 2002	Bâtiments	Non	Non
Santa Maria - Guatemala	Green & Rose, nd	Personnes – Réseaux physiques – Surfaces naturelles et agricoles	Directes	Oui
Yogyakarta – Central java – Indonésie (lahars)	Lavigne, 1999a	Personnes – Bâtiments – Equipements et réseau routier - Cultures	Directes	Non
Martinique – Antilles - France	Leone, 2004	Bâtiments	Non	Oui
Martinique – Antilles - France	Stieltjes & Mirgon, 1998	Réseaux physiques (aériens et souterrains)	Non	Oui
Ile de Tenerife – Canaries – Espagne (coulées de lave)	Gomez-Fernandez, 2000	Infrastructures diverses	Non	Oui
Vésuve – Italie (coulées de lave)	Lirer & Vitelli, 1998	Bâtiments - Personnes	Non	Oui
Mouvements de terrain				
Trièves – France (glissements)	Leone, 1996	Bâtiments – Réseau physique routier et ferroviaire – Personnes	Directes et indirectes	Oui
Zhaotong – Yunnan – Chine (coulées de débris)	Liu & Lei, sous presse	Bâtiments – PIB - Ressources naturelles - Population	Non	Non
Nord d'Amsterdam – Pays Bas (affaissements)	Hulsbergern & Carree, 1987	Bâtiments	Non	Non
Aigueblanche – France (chutes de blocs)	Asté et al., 1993	Bâtiments – Personnes – Réseau physique routier – Infrastructures diverses	Non	Oui
Cartago- Costa Rica (coulée de boue/lahar)	Mora,1992	Personnes – Infrastructures diverses – Réseaux physiques	Directes et indirectes	Oui
Corvara (Tyrol) – Italie (glissements)	Panizza et al., 2002	Infrastructures diverses – Bâtiments	Non	Oui
Taounate – Maroc (glissements)	Fares, 1994	Bâtiments ?	Non	Oui
Hong-Kong	Finlay, 1996	Bâtiments - Personnes	?	?
Cincinnati – Ohio – USA (glissements)	Bernknopf et al., 1988	Bâtiments résidentiels	Directes	Oui
Séchilienne – France (glissement)	Asté et al., 1994	Bâtiments – Réseaux – Surfaces naturelles	Non	Oui
Séchilienne – France (glissement)	Asté, 2006	Bâtiments	Oui	Oui
Vents forts				
Puerto-Rico - USA	Khanduri & Morrow, 2003	Bâtiments divers	Directes et indirectes	Non
North Queensland - Australie	Stewart, 2003	Bâtiments résidentiels	Directes	Non
Grêle				
Sidney - Australie	Leigh & Kuhnel, 2001	Véhicules	?	?
Eustatisme				
Delta du Nil (Alexandria, Rosetta, Port-Saïd) - Egypte	El-Raey, 1997	Infrastructures diverses – Milieu naturel	Directes et indirectes	Non
Marée de tempête				
Mackay - Littoral du Queensland - Australie	Granger & Smith, 1995	Bâtiments résidentiels	Directes	?
Multi-aléas				
Amami Islands - Japon	Adrianto & Matsuda, 2002	PIB	Directes et indirectes	Non
Changement climatique				
Monde	Tol, 2002	GDP - Population	Directes et indirectes	Non

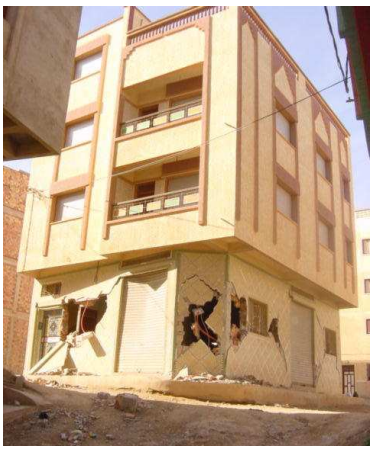
(1) Eléments exposés physiques (exception avec le PIB) auxquels s'applique l'endommagement
(2) Pertes économiques directes : coût de remplacement ou de réparation ; pertes économiques indirectes : pertes de production
(3) Cartographie des pertes relatives, des pertes économiques ou de l'endommagement/dysfonctionnement (vulnérabilité)

ANNEXE 12

Illustration des principaux facteurs de vulnérabilité structurelle du bâti révélés par le Séisme d'Al Hoceima (Maroc, 24 février 2004).

Séisme d'Al Hoceima – Maroc – 24 février 2004

Illustration des principaux facteurs de vulnérabilité structurelle du bâti

Facteurs de vulnérabilité	**Illustration** (photos F. Leone & J.C. Cornet	**Facteurs de vulnérabilité**	**Illustration** (photos F. Leone & J.C. Cornet)
Armatures en acier doux Espacement des armatures transversales trop important et fermeture sans crochet Béton de mauvaise composition		Pas de liaison avec le pignon	
Fragilité de certains matériaux (pavés de verre)		Maçonnerie de pisé	
Toitures surchargées: •Solivage •Support en roseau •Plastique •Argile		Faux aplomb	
Planchers hourdis		Joint entre bâtiment de largeur insuffisante	
Rez de chaussée sans cloisonnement Commerces ou garages avec grandes ouvertures sur une façade Murs du dernier niveau sans terrasse		Pas de liaisons entre les murs Dalle de terrasse en béton armé (ajout de masse)	

ANNEXE 13

Principaux effets associés aux différents aléas volcaniques et devant être considérés dans une perspective de construction de matrices d'endommagement volcaniques (Leone, inédit).

Effets possibles dus aux retombées de cendres

- Par enfouissement, colmatage, corrosion, accumulation, abrasion, conduction, absorption, dissolution et réaction chimique, magnétisme
- Distance d'effet : Moy : 20-30 km
  Max : 800 + km
- Vitesse : Moy : < 15 m/s
  Max : ~ 30 m/s

Epaisseurs inférieures à 1 mm :

- Déclenchement possible de décharges électriques (éclairs)

- Irritation des yeux et des poumons
- Fermeture des aéroports suite aux dommages potentiels sur les avions
- Dommages mineurs aux véhicules, habitations et équipements suite aux effets abrasifs des cendres
- Contamination possible des réserves d'eau en particulier des citernes d'eau de pluie (acidification, turbidité)
- Réduction de la visibilité
- Perturbation du champ magnétique (particules magnétiques) et donc des communications radios (interférences) en plus des effets d'absorption

Epaisseurs comprises entre 1 et 5 mm :

Amplification des effets précédents plus :

- Endommagement possible de certaines cultures
- Effets sur le cheptel dus au manque de nourriture, à l'usure des dents et à la contamination possible de l'alimentation en eau
- Dégâts mineurs aux habitations si la cendre pénètre à l'intérieur en souillant les sols, blocage des systèmes d'air conditionné, etc.
- Court circuits, départs d'incendies et coupures électriques possibles et si la cendre est humide donc conductive ; les systèmes de basse tension étant plus vulnérables que ceux à haute tension.
- L'alimentation en eau peut être coupée ou réduite par des coupures électriques et donc des systèmes de pompage ainsi que par l'encrassement des systèmes de filtration
- Pénurie d'eau potable en cas de surconsommation pour les opérations de nettoyage
- Obstruction des réseaux d'évacuation des eaux usées en particulier si les chaussées ne sont pas nettoyées
- Endommagement des équipements électriques et des mécanismes divers

Epaisseurs comprises entre 5 mm et 10 cm :

Amplification des effets précédents plus :

- Déclenchement fort possible de lahars (coulées de boue) en cas d'apports d'eau d'origines diverses : précipitations, fonte de neige, fonte glaciaire, vidange de lac

- Enfouissement des pâturages et des plantes basses. Certains arbres peuvent perdre leurs feuilles.
- La plupart des prairies sont hors d'usage au delà de 5 cm de cendres

- Importantes opérations de nettoyage nécessaires en zones urbaines
- Affaiblissement des toitures et effondrements possibles des moins résistantes dès 10 cm de cendres en particulier humide.
- Ralentissement et arrêt possible du trafic routier du fait d'une chaussée glissante, de l'encrassement des filtres à air, d'une visibilité réduite
- Arrêt possible du transport ferroviaire du fait des pannes électriques aux systèmes de signalisation si la cendre devient humide.
- Fermeture générale des aéroports
- Contamination généralisée des réserves d'eau douce

Epaisseurs comprises entre 10 et 30 cm :

Amplification des effets précédents, plus :

- Effondrement des toitures non dégagées de leurs cendres. A noter que les toitures planes et de grande envergure (supérieures à 5m) sont plus vulnérables et que celles de pente inférieure à 25° peuvent retenir jusqu'à 15 cm de cendre humide sans qu'elle ne glisse (Pinatubo, 1991). La charge de 15 à 20 cm de cendre saturée représente approximativement 200 kg/m^2
- Endommagement sévère des arbres par défoliation et cassures des branches
- Endommagement généralisé du réseau électrique par chutes de branches, surchauffe et étirement des lignes sous le poids des cendres
- Comblement des réseaux d'irrigation

Epaisseurs supérieures à 30 cm :

Amplification des effets précédents, plus :

- Destruction généralisée de la végétation et totale au delà de 200 cm
- Mort ou stress complet du cheptel et des autres animaux
- Mort de la faune aquatique des lacs et rivières
- Effondrement généralisé des toitures
- Ruptures possibles par surcharge des lignes électriques et téléphoniques
- Routes rendues inutilisables

Effets possibles dus aux retombées balistiques (blocs, bombes, lapilli)

- Par impact, combustion, ensevelissement
- Distance d'effet : Moy : < 2 km
  Max : 5 + km
- Température : < 1000 °C
- Vitesse : Moy : 50-100 m/s
  Max : 100 + m/s

- Déclenchement d'incendies (matériaux incandescents)

- Effondrement et perforation des toitures
- Ensevelissement ou obstruction des infrastructures
- Bris de glace
- Mort et blessures graves

Effets possibles dus aux coulées et intrusions de lave

➢ Par combustion, arrachement, ensevelissement, pression
❖ Distance d'effet : Moy : 1-4 km pour les coulées, 0.1-1 km pour les intrusions
Max : 100 km pour les coulées
❖ Température : 750 - 1500 ℃
❖ Vitesse : Moy : < 1 m/s
Max : < 30 m/s

➢ Déclenchement d'incendies et d'explosions

- Destruction totale des infrastructures humaines et de la végétation
- Rupture des réseaux
- Bouleversements topographiques
- Brûlures graves

Effets dus aux coulées pyroclastiques

➢ Par onde de choc, combustion, impact de projectiles, arrachement, abrasion, transport, ensevelissement
➢ Distance d'effet : Moy : < 10 km
Max : 50-100 km
➢ Température : < 900 ℃
➢ Vitesse : Moy : 20-30 m/s
Max : < 200 m/s

➢ Déclenchement d'un effet de souffle
➢ Déclenchement possible de tsunamis (raz de marée)
➢ Déclenchement possible de décharges électriques (éclairs)
➢ Déclenchement possible de lahars en entrant en contact avec des cours d'eau ou par remobilisation des dépôts en présence d'eau
➢ Déclenchement d'incendies

- Destruction quasi totale des infrastructures humaines et de la végétation
- Rupture des réseaux
- Bouleversements topographiques par comblement et perturbation du réseau hydrographique
- Obstruction possible de cours d'eau et formation de lacs
- Mort et blessures très graves

Effets dus aux émanations de gaz et pluies acides

➢ Par corrosion, réaction chimique (dissolution, précipitation, oxydo-réduction)
❖ Distance d'effet : Moy : 20-30 km
Max : 2000 + km
❖ Vitesse : Moy : < 15 m/s
Max : ~ 30 m/s

❖ **Ammoniac (NH_3)** – incolore, odeur très piquante
- Irritation de la peau, des yeux et des muqueuses respiratoires, gonflement des paupières, conjonctivites, vomissements.

❖ **Dioxyde de carbone (CO_2)** – incolore, inodore
- Symptômes précédents l'asphyxie : maux de tête, vertiges, insuffisances respiratoires, faiblesse musculaire, somnolence et bourdonnements dans les oreilles. Asphyxie.

❖ **Monoxyde de Carbone (CO)** – incolore, inodore
- En fonction de sa concentration dans le sang (210 fois plus d'affinité avec l'hémoglobine que l'oxygène) : insuffisances respiratoires et légers maux de tête (20-30%) - maux de tête sérieux , confusions mentales et vertiges (30-50%) – affaiblissement de la vision et de l'ouie, atonie.

❖ **Fluorine (F_2)** – coloré jaune pâle
- Conjonctivites, irritation de la peau, dégénération des tissus osseux, tâches sur les dents.

❖ **Acide chlorhydrique (HCl)** – Incolore, corrosif
- Irritation des yeux et des muqueuses respiratoires, irritation de la gorge après une exposition courte avec des concentrations supérieures à > 35 ppm, Oedèmes pulmonaires et spasmes du larynx en cas de concentration > 100 ppm.

❖ **Acide fluorhydrique (HF)** – incolore, corrosif
- Extrêmement irritant et corrosif pour la peau et les muqueuses. L'inhalation des vapeurs peut causer des ulcères de la partie supérieure de la trachée. Des concentrations à 50-250 ppm sont dangereuses même en cas de courte exposition. Graves brûlures de la peau lentes à guérir. Les tissus subcutanés peuvent être touchés et une gangrène des zones touchées peut s'en suivre.

❖ **Hydrogène sulfuré (H_2S)** – incolore, inflammable, odeur forte (œuf pourri)
- Irritation et asphyxie en fonction de sa concentration : irritation des yeux pour 20-150 ppm. Irritation des voies respiratoires en cas de concentration légèrement supérieure et même œdème pulmonaire pour un temps d'exposition long. Une exposition de 30 mn à 500 ppm provoque des maux de tête, des vertiges, de l'excitation, une démarche titubante, des diarrhées suivies parfois par des bronchites ou des bronchopneumonies. Le système respiratoire se retrouve paralysé en cas de très forte absorption.

❖ **Dioxyde de soufre (SO_2)** – incolore, odeur piquante
- Inflammation et irritation des tissus conjonctifs. Des concentrations de 6-12 ppm provoquent une irritation immédiate du nez et de la gorge – 20 ppm ou plus provoquent une irritation des yeux – 10 000 ppm provoquent une irritation de la peau humide en quelques minutes. Affecte principalement les bronches et les voies respiratoires supérieures.

❖ **Acide sulfurique (H_2SO_4)** – incolore, liquide huileux brun jaunâtre, corrosif
- Brûlures sévères avec destruction rapide des tissus, inflammation des voies respiratoires supérieures, dermatites.

❖ **Pluies acides :**

- Difficultés respiratoires, irritations, brûlures, perte de cheveux, asphyxie
- Contamination des eaux

- Acidification des eaux (le pH des eaux de pluie peut passer à 4.0-4.5 au contact de certains gaz)
- Vieillissement prématuré des structures en particulier métalliques

Effets dus aux lahars

➢ Par abrasion, érosion, impact d'éléments charriés, arrachement, transport, ensevelissement, colmatage, pression
❖ Distance d'effet : Moy : ~ 10 km
Max : 300 + km
❖ Température : 0 à < 100 °C
❖ Vitesse : Moy : 3-10 m/s
Max : 30 + m/s

➢ Déclenchement possible de tsunamis (raz de marée)

- Endommagement fort des infrastructures humaines et de la végétation, en particulier destruction des ponts
- Rupture des réseaux
- Modifications topographiques des chenaux d'écoulement par comblement ou érosion
- Mort ou blessures graves

Effets dus aux avalanches de débris (mouvements de terrain de grande ampleur)

➢ Par effet de souffle, impact d'éléments charriés, arrachement, transport, ensevelissement
❖ Distance d'effet : Moy : 5-10 km
Max : > 100 km
❖ Température : 0-200 °C
❖ Vitesse : Moy : 20 m/s
Max : 100 + m/s

➢ Déclenchement d'un effet de souffle
➢ Déclenchement possible de tsunamis (raz de marée)

- Destruction totale des infrastructures humaines et de la végétation
- Rupture des réseaux
- Bouleversements topographiques
- Mort

Effets dus aux tsunamis

➢ Par submersion, impact de projectiles, érosion, arrachement, transport
❖ Distance d'effet : Moy : < 10 km
Max : 500-600 + km
❖ Vitesse : Moy : 2-3 m/s
Max : < 10 m/s

❖ Hauteur des vagues : Moy : 4-10 m
Max : 50 + m

- Endommagement fort des infrastructures humaines (notamment portuaires) et de la végétation littorales
- Rupture des réseaux
- Perturbations topographiques
- Pollution des réserves d'eau douce par salinisation
- Mort ou blessures graves à très graves

Effets dus aux secousses sismiques

➢ Par vibrations du sol
❖ Distance d'effet : Moy : < 20 km
Max : 50 + km
❖ Vitesse des ondes : Moy : < 5500 m/s

➢ Déclenchement possible de mouvements de terrains (glissements, chutes de blocs, éboulements, écroulements, affaissements, effondrements)

- Endommagement modéré des infrastructures humaines
- Rupture des réservoirs et des réseaux
- Mort ou blessures par effondrement des infrastructures

Effets dus aux décharges électriques (éclairs)

➢ Par surtension, combustion
❖ Distance d'effet : Moy : < 10 km
Max : 120 + km
❖ Température : au dessus du seuil de fusion
❖ Vitesse : 12 X 10^5 m/s

➢ Déclenchement d'incendies

- Brouillage des communications radios (interférences)
- Endommagement des installations et appareillages électriques
- Mort par électrocutions, blessures par brûlures

Effets dus aux ondes de choc

➢ Par surpression (effet de souffle)
❖ Distance d'effet : Moy : 10-15 km
Max : 120 + km
❖ Vitesse : Moy : > 300 m/s
Max : > 500 m/s

- Bris de glace, de portes et de fenêtres

- Endommagement fort des infrastructures humaines faisant obstacle et des arbres
- Mort et blessures diverses

Effets dus aux déformations du sol

➢ Par déplacements à dominante verticale
❖ Distance d'effet : Moy : < 10 km
Max : < 20 km
❖ Vitesse : Moy : 10^{-5} m/s

- Endommagement modéré des infrastructures humaines (bâtiments, réseaux de transport)

ANNEXE 14

Matrice d'endommagement globale « mouvements de terrain » (modifié d'après Leone, 1996).

Matrice d'endommagement globale "mouvements de terrain" (modifié d'après Leone, 1996)

PHENOMENES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN	PROCESSUS			ELEMENTS EXPOSES																				
	NATURE		M	BATIS				RESEAUX								SURFA. NATUR.			SOUS-ELEMENTS			PERSONNES		
				B1	B2	B3	B4	R1	R2	C	L1	L2	L3	VF	Ca	T	CE	PE	OA	OV	M,V	Pr	Pvf	Pt
	DEPLACEMENTS	DL	VL1	0,3	0,2	0,1		0,1	0,05	0,4	0,05	0,1	0,01	0,3	0,1	0			0	0	0	0		
			VL2	0,4	0,3	0,2		0,4	0,3	0,6	0,3	0,2	0,1	0,5	0,3	0,3			0	0	0	0		
			VL3	0,6	0,5	0,4	0,3	0,5	0,4	0,8	0,5	0,4	0,2	0,7	0,7	0,4			0	I	0	I-II		
			VL4	1	0,9	0,8	0,7	0,8		1	0,7	0,8	0,5	0,8	0,9	0,7			I	I	I	II-III		
			VL5	1				1		1	1		0,8	1	1	0,9			II	II	II	IV-V		III-IV
			CD1	I-II				I-II		II	I			II	II	0			0	0	0	I-II		
			CD2	III-IV				II-III		II-III	I-II			III	II-III	II			I	I	I-II	II-III		
			CD3	V				II-IV		III	II			IV	III	III			II	II	II	IV-V		III-IV
			PSR1	II		I																		
			PSR2	III		II																		
			PSR3	IV-V																				
			PSR4	V																				
		DV	DH1	0,3	0,2	0,1	0,05	0,3		0,4	0,1		0,05	0,3	0,2	0,3			0	0	0	0		
			DH2	0,6	0,5	0,4	0,3	0,4		0,6	0,2		0,1	0,6	0,4	0,6			0	0	0	0		
			DH3	0,7	0,6	0,5	0,4	0,8		0,8	0,5	0,4	0,3	0,8	0,8	0,8			I	I	I-II	III-IV		
			DH4	1	0,9			1		1	1		0,8	1	1	1			II	II	II	IV-V		
			VV1	0,1		0,05		0		0	0			0	0	0			0	0	0	0		
			VV2	0,2		0,1		0,3	0,2	0,5	0,01	0,05	0	0,3	0,2	0,05			0	0	0	0		
			VV3	0,3		0,2		0,5	0,4	0,6	0,1	0,2	0,1	0,4	0,3	0,1			0	0	0	0		
			VV4	0,4		0,3		0,6	0,5	0,7	0,3	0,6	0,2	0,5	0,4	0,5			0	0	0	0		
			VV5	0,6	0,5		0,4	0,8	0,7	0,8	0,6	0,8	0,5	0,6	0,6	0,7			0	I	I	0		
			VV6	0,9	0,8			0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,6	0,8	0,8	0,8			I	II	I-II	I-II-III		
			VV7	1				1		1	1			1	1	1			II	II	II	IV-V		
			MDU1	0,2	0,05		0,01																	
			MDU2	0,4	0,2	0,1	0,05																	
			MDU3	0,5	0,4	0,2	0,1																	
			MDU4	0,6	0,5	0,3	0,2																	
	PRESSIONS	PL	SC1	I-II-III																				
			SC2	III-IV																				
			SC3	V																				
		IM	ECv1	0,1		0,05		0,05			0		0	0	0				0	0	0	I-II		III
			ECv2	0,6	0,5	0,4	0,3	0,1			0,5		0,2	0,3	0,2				II	I	I-II	IV-V		V
			ECv3	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5			0,8		0,6	0,7	0,7				II	II	I-II	V		
			ECv4	1		0,9	0,8	0,8			1		0,9	1	0,8				II	II	II	V		
		ES	D1	V		IV					II		I-II						II	II	II	IV-V		V
			D2	IV-III		III-II					II-I		I						I	I	I-II	III-IV		IV
			D3	II		II-I					0-I		0						0	0	II	II-III		III
	ACCUMULATIONS	AC	H1	0,05			0,01	0,3			0		0	0,1	0,1	0,1	0	0	0	I	0	I-II		
			H2	0,1			0,05	0,5			0,2		0,1	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3	II	II	I	II-III-IV		
			H3	1			0,5	0,7			0,8		0,8	0,7	0,4	0,8	0,5	0,7	II	II	II	V		
			H4	1				1			1		1	1	1	1	1	1	II	II	II	V		
	ABLATIONS	AB	PA1	0,2	0,1	0,05		0,1		0,4	0,3	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1				I				
			PA2	1	0,8	0,6		0,4		0,5	0,4	0,5	0,3	0,4	0,6	0,3				II				
			PA3	1				0,8		0,6	0,8		0,7	0,6	0,8	0,8				II				
			PA4	1				1		1	1			1	1	1				II				

Légende de la matrice d'endommagement globale "mouvements de terrain"

MODES ET NIVEAUX D'ENDOMMAGEMENT (se reporter à l'échelle d'intensité des dommages)

en chiffres arabes : taux d'endommagement (valeurs comprises entre 0 et 1)
en chiffres romains : intensité des dommages

NATURE DES PROCESSUS

DL : déplacements à composante latérale (horizontale) dominante
DV : déplacements à composante verticale dominante
PL : poussées latérales continues
IM : effets d'impact
ES : effets de souffle
AC : accumulations
AB : ablations

CRITERES DE MAGNITUDE M (se reporter aux échelles de magnitude)

V : vitesse des déplacements (avec VL pour latéraux et VV pour verticaux)
CD : importance du champ des déformations de surface
PSR : profondeur de la surface de rupture de la masse en mouvement
DH : amplitude des déplacements verticaux instantanés
MDU : mouvement différentiel unitaire au contact de la structure exposée
ECv : énergie cinétique correspondant à un volume en mouvement donné
SC : géométrie de la surface de contact entre masse en mouvement et structure exposée (avec SF : surface du front de la masse en mouvement, SE : surface exposée de la structure)
D : distance entre élément exposé et source de la masse génératrice de l'effet de souffle (supposé apparaître pour EC > 1 MJ et se propager au delà de 100 m)
H : hauteur des accumulations
PA: profondeur d'ablation du sol

NATURE DES ELEMENTS EXPOSES

BATIS :
B1 : constructions vétustes ou de qualité médiocre, sans fondations et sans liaisons structurelles, le plus souvent construites hors normes traditionnelles (granges, appentis, certaines résidences secondaires). Cette catégorie peut être étendue aux constructions du type suivant lorsque celles-ci ont fait l'objet de dégradations structurelles non consolidées.
B2 : constructions traditionnelles, en maçonnerie, ou préfabriquées individuelles légères, sans ossature armée. Généralement des habitations ou des immeubles collectifs anciens.
B3 : constructions de type habitat individuel de bonne qualité, réalisées en matériaux traditionnels, en béton ou en composants préfabriqués et pourvues d'une ossature armée.
B4 : constructions de type habitat collectif d'au moins trois niveaux, de bonne qualité, réalisées en matériaux traditionnels, en béton ou en composants préfabriqués et pourvues d'une ossature armée.

RESEAUX :
R1 : routes de viabilité médiocre (1 voie à deux voies étroites)
R2 : routes de bonne à très bonne viabilité (2 voies larges à 4 voies)
C : conduites souterraines
L1 : lignes traditionnelles (sur poteaux simples) aériennes
L2 : lignes traditionnelles souterraines
L3 : lignes aériennes montées sur armatures renforcées (haute tension)
VF : voies ferrées traditionnelles
Ca : canaux aériens

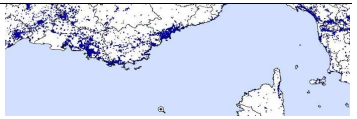
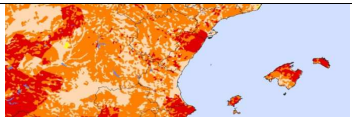
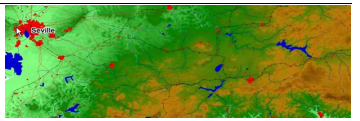
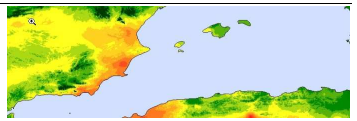
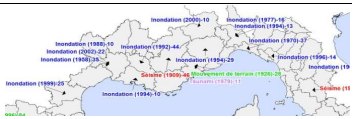
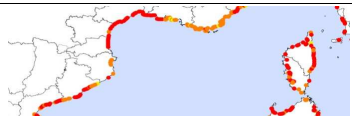
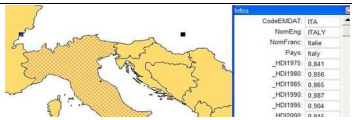
SURFACES NATURELLES :
T : terrains naturels et sols associés (foncier)
CE : cours d'eau naturels
PE : plans d'eau naturels ou artificiels

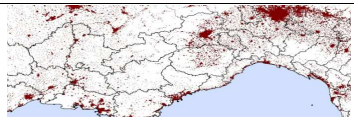
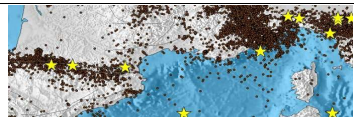
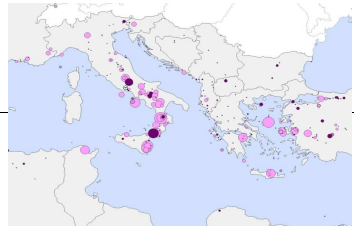
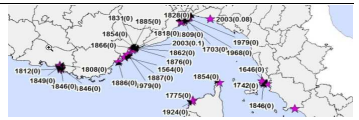
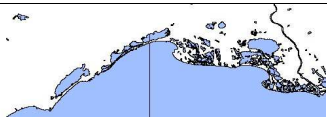
SOUS-ELEMENTS :
OA : occupations animales sauvages (faune) ou d'élevage (cheptel vif)
OV : occupations végétales naturelles (flore) ou cultivées (cultures)
M,V : biens mobiliers et véhicules

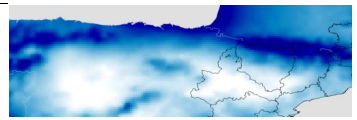
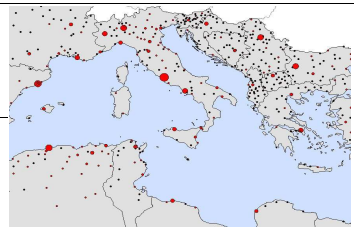
PERSONNES :
Pr : personnes situées sur le réseau routier
Pvf : personnes situées sur le réseau ferroviaire
Pt : personnes à l'air libre situées sur terrains naturels

ANNEXE 15

Illustration et description des principales sources d'information géographique externes alimentant le projet SIG RINAMED (dir. F. Leone).

Nature de l'information principale	Unité spatiale de référence (géocode)	Format d'origine	Source (organisme producteur, projet, base de données)	Date des données	Code source	Organisme fournisseur	Adresse Internet (données ou fournisseur)	Conditions d'accés	Extrait du SIG RINAMED
Etat de l'occupation du sol (zones artificialisées, forêts, etc.)	Parcelle	SIG vectoriel	CORINE (coordinate information on the environment) Land Cover	1999 & 2000	CLC, 1999 ou 2000 / AEE	Agence Européenne de l'Environnement, Denmark - Institut Français de l'environnement, France - Centro Nacional de Information Geografica, Espana - Instituto do Ambiente, Portugal - Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici, Italia	http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice/ - http://www.ifen.fr - http://www.cnig.es/ - http://www.iambiente.pt/ - http:/www.clc2000.sinanet.apat.it	libre mais avec déclaration, distribution assurée par chaque pays concerné	 Territoires artificialisés (zone surbanisées)
Niveau d'érosion des sols déclarée et potentielle	Parcelle	SIG vectoriel	CORINE (coordinate information on the environment) Soil Erosion Risk project	1990	CSERP, 1990 / AEE	Agence Européenne de l'Environnement, Denmark	http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice/	libre	 Susceptibilité à l'érosion des sols
Objets topographiques (réseaux, villes, hydrographie, trait de côte)	Parcelle, point, segment	SIG vectoriel	Digital Chart of the World Data Server	1998	DCWDS, 1998 / PSU	The Pennsylvania State University Libraries, USA	http://www.maproom.psu.edu/dcw/	libre	 Fond topographique
Indice d'aridité	Pixel	SIG GRID	Desertification Information System for the Mediterranean	1990	DISMED, 1990 / AEE	Agence Européenne de l'Environnement, Denmark	http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice/	libre	 Aridité
Témoignages de catastrophes naturelles (pertes humaine set coûts directs)	Pays (NUTS1) mais localités signalées	Tabulaire non géoréférencé	Emergency Events Database	2004	EMDAT, 2004 / CRED	Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Université Catholique de Louvain (UCL), Brussels, Belgium	http://www.em-dat.net/	libre	 Victimes de catatstrophes naturelles
Niveau d'érosion déclarée ou potentielle du trait de côte, faciès géomorphologiques	Segment littoral (ligne)	SIG vectoriel	EUROSION Project	2002	EUROSION, 2002 / AEE	Agence Européenne de l'Environnement, Denmark	http://dataservice.eea.europa.eu/dataservice/ & http://www.eurosion.org/	libre	 Susceptibilité à l'érosion littorale
Divers macro-indicateurs socio-économiques et démographiques	Pays (NUTS1), région (NUTS2), département (NUTS3)	Tabulaire	Office statistique des communautés européennes	2005	EUROSTAT, 2005 / UE	Union Européenne, Luxembourg	http://europa.eu.int/comm/eurostat	libre	 Macro-indicateurs socio-économiques
Niveau d'aléa sismique régional (PGA)	Point	Tabulaire géoréférencé	Global Seismic Hazard Assessment Program	1999	GSHAP, 1999 / SSS	Swiss Seismological Service, Suisse	http://www.seismo.ethz.ch/GSHAP/	libre	Aléa sismique et sismicité historique

Activité volcanique depuis l'Holocène (nom du volcan, période, nature)	Volcan (point)	Tabulaire et géoréférencé	Global Volcanism Program	1999	GVP, 1999 / SI	Smithsonian Institution, USA	http://www.volcano.si.edu	libre	 Volcans actifs
Population (nombre d'habitants)	Pixel (1 km²)	SIG GRID	LandScanTM Global Population Database	2004	LandScan, 2004 / ORNL	Oak Ridge National Laboratory, USA	http://www.ornl.gov/sci/landscan/	libre mais avec déclaration	 Densité de population
Activité sismique (magnitude, date, profondeur)	Epicentre (point)	Tabulaire géoréférencé	National Earthquake Information Center	2004	NEIC, 2004 / USGS	United States Geological Suvey, USA	http://neic.usgs.gov/neis/epic/	libre	 Epicentes sismiques
Témoignages de séismes meurtriers (morts)	Epicentre (point)	Tabulaire et géoréférencé	National Geophysical Data Center (séismes)	2004	NGDC, 2004 / NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration, USA	http://www.ngdc.noaa.gov	libre	
	Epicentre (point)	Tabulaire géoréférencé	National Earthquake Information Center	2004	NEIC, 2004 / USGS	United States Geological Suvey, USA	http://neic.usgs.gov/neis/epic/	libre	 Victimes de séismes historiques
	Pays (NUTS1), région (NUTS2), département (NUTS3)	Tabulaire non géoréférencé	Emergency Events Database	2004	EMDAT, 2004 / CRED	Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, Université Catholique de Louvain (UCL), Brussels, Belgium	http://www.em-dat.net/	libre	
Témoignages de tsunamis (run-up et source)	Zone d'effet (point)	Tabulaire et géoréférencé	National Geophysical Data Center (tsunami)	2004	NGDC, 2004 / NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration, USA	http://www.ngdc.noaa.gov	libre	 Témoignages de tsunamis (Run up)
Données altimétriques (MNT)	Pixel (pas de 90 m)	SIG GRID	Shuttle Radar Topography Mission	2000	SRTM, 2000 / USGS	United States Geological Suvey, USA	http://srtm.usgs.gov/	libre	 Relief terrestre (MNT)
Traits de côte et de lac	Segments	SIG vectoriel	Water Bodies Data	2000	SWDB, 2000 / USGS	United States Geological Survey, USA	http://srtm.usgs.gov/	libre	 Victimes de séismes historiques

Variables climatiques (températures, précipitations, jours pluvieux, vitesses du vent)	Point	Tabulaire et géoréférencé	Ten Minute Climatology database	2002	TMC, 2002 / CRU	Climatic Research Unit, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, United Kingdom	http://www.cru.uea.ac.uk/	libre	 Précipitations moyennes annuelles
Population urbaine	Point	Tabulaire géoréférencée	Géopolis		GEOPOLIS / FME	François Moriconi-Ebrard	http://www.geo.univ-avignon.fr	libre	 Villes de plus de 20 000 habitants
	Point	Tabulaire non géoréférencée	City populations		CITY POPULATIONS / TB	Thomas Brinkhoff	www.citypopulations.de	libre	

ANNEXE 16

Liste complète des indicateurs de risques naturels et anthropiques développés sur l'Arc latin au niveau de découpage territorial NUTS3 (Leone & Pagneux, 2007).

LISTE DES INDICATEURS

Indicateurs de risques naturels et anthropiques - Arc latin

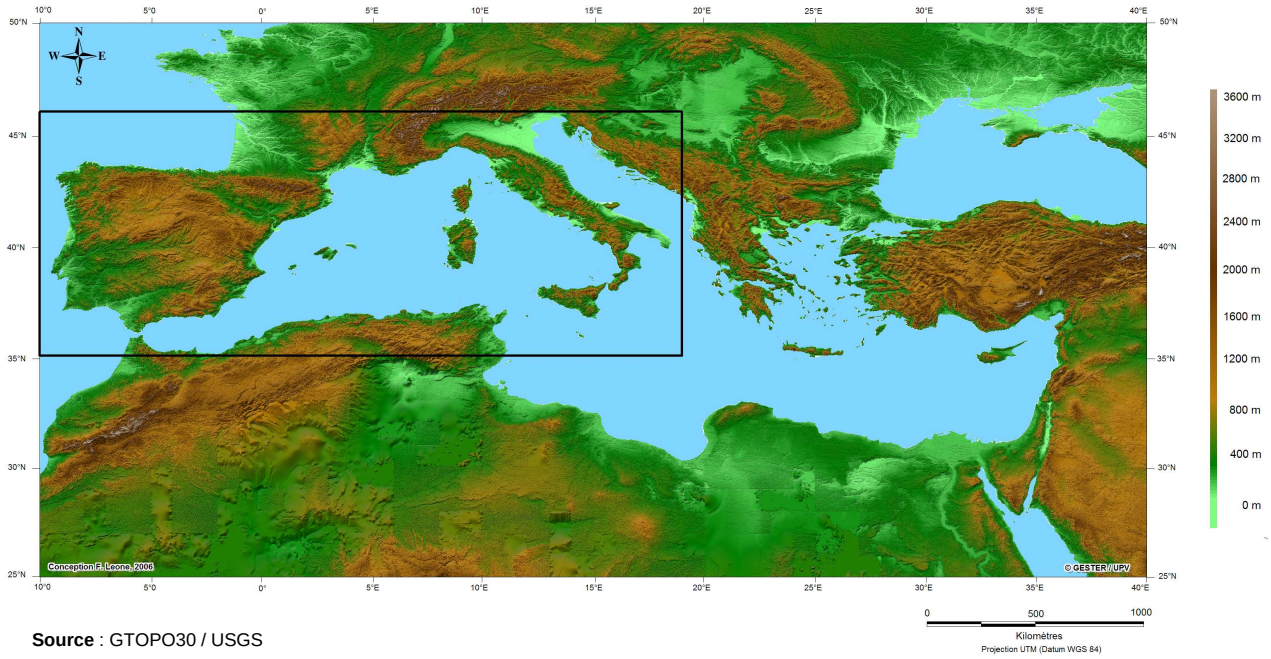
Noms des tables et des champs (indicateurs)	Définition	Unité	Code source des données
MULTIRISQUES_1_AL : INDICATEURS MULTIRISQUES 1 : AU MOINS 1 ALEA NATUREL MOYEN A FORT PARMI 5			
SURF_1_ALEA	Territoire exposé au moins à un aléa naturel moyen à fort parmi 5	km²	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_SURF_1_ALEA	Part du territoire exposé au moins à un aléa naturel moyen à fort parmi 5	%	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
POP_1_ALEA	Population exposée au moins à un aléa naturel moyen à fort parmi 5	Nombre d'habitants	LandScan, 2004 / ORNL & DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_POP_1_ALEA	Part de la population exposée au moins à un aléa naturel moyen à fort parmi 5	%	LandScan, 2004 / ORNL & DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
ZU_1_ALEA	Zones artificialisées en 2000 exposées au moins à un aléa naturel moyen à fort parmi 5	km²	CLC, 2000 / AEE & DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_ZU_1_ALEA	Part des zones artificialisées en 2000 exposées au moins à un aléa naturel moyen à fort parmi 5	%	CLC, 2000 / AEE & DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
ROUTE_1_ALEA	Routes principales exposées au moins à un aléa naturel moyen à fort parmi 5	km	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_ROUTE_1_ALEA	Part des routes principales exposées au moins à un aléa naturel moyen à fort parmi 5	%	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
EV_SUP_10_MORTS	Evènements (inondation, volcanisme, sismicité, tsunamis, mouvements de terrain) ayant entraîné au moins 10 morts entre 1900 et 2004	Nombre	SIG RINAMED, 2006 / GESTER & EMDAT, 2004 / CRED
MORTS_CAT_NAT	Morts dus aux inondations, volcanisme, sismicité, tsunamis, mouvements de terrain entre 1900 et 2004 (évènements de plus de 10 morts)	Nombre	SIG RINAMED, 2006 / GESTER & EMDAT, 2004 / CRED
MULTIRISQUES_2_AL : INDICATEURS MULTIRISQUES 2 : AU MOINS 2 ALEAS NATURELS MOYENS A FORTS SIMULTANES PARMI 5			
SURF_2_ALEAS	Territoire exposé simultanément au moins à 2 aléas naturels moyens à forts parmi 5	km²	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_SURF_2_ALEAS	Part du territoire exposé simultanément au moins à 2 aléas naturels moyens à forts parmi 5	%	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
POP_2_ALEAS	Population exposée simultanément au moins à 2 aléas naturels moyens à forts parmi 5	Nombre d'habitants	LandScan, 2004 / ORNL & DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_POP_2_ALEAS	Part de la population exposée simultanément au moins à 2 aléas naturels moyens à forts parmi 5	%	LandScan, 2004 / ORNL & DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
ZU_2_ALEAS	Zones artificialisées en 2000 exposées simultanément au moins à 2 aléas naturels moyens à forts parmi 5	km²	CLC, 2000 / AEE & DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_ZU_2_ALEAS	Part des zones artificialisées en 2000 exposées simultanément au moins à 2 aléas naturels moyens à forts parmi 5	%	CLC, 2000 / AEE & DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
ROUTE_2_ALEAS	Routes principales exposées simultanément au moins à 2 aléas naturels moyens à forts parmi 5	km	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_ROUTE_2_ALEAS	Part des routes principales exposées simultanément au moins à 2 aléas naturels moyens à forts parmi 5	%	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
MULTIRISQUES_3_AL : INDICATEURS MULTIRISQUES 3 : AU MOINS 3 ALEAS NATURELS MOYENS A FORTS SIMULTANES PARMI 5			
SURF_3_ALEAS	Territoire exposé simultanément au moins à 3 aléas naturels moyens à forts parmi 5	km²	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_SURF_3_ALEAS	Part du territoire exposé simultanément au moins à 3 aléas naturels moyens à forts parmi 5	%	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
POP_3_ALEAS	Population exposée simultanément au moins à 3 aléas naturels moyens à forts parmi 5	Nombre d'habitants	LandScan, 2004 / ORNL & DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_POP_3_ALEAS	Part de la population exposée simultanément au moins à 3 aléas naturels moyens à forts parmi 5	%	LandScan, 2004 / ORNL & DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
ZU_3_ALEAS	Zones artificialisées en 2000 exposées simultanément au moins à 3 aléas naturels moyens à forts parmi 5	km²	CLC, 2000 / AEE & DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_ZU_3_ALEAS	Part des zones artificialisées en 2000 exposées simultanément au moins à 3 aléas naturels moyens à forts parmi 5	%	CLC, 2000 / AEE & DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
ROUTE_3_ALEAS	Routes principales exposées simultanément au moins à 3 aléas naturels moyens à forts parmi 5	km	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_ROUTE_3_ALEAS	Part des routes principales exposées simultanément au moins à 3 aléas naturels moyens à forts parmi 5	%	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
MULTIRISQUES_4_AL : INDICATEURS MULTIRISQUES 4 : AU MOINS 4 ALEAS NATURELS MOYENS A FORTS SIMULTANES PARMI 5			
SURF_4_ALEAS	Territoire exposé simultanément au moins à 4 aléas naturels moyens à forts parmi 5	km²	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_SURF_4_ALEAS	Part du territoire exposé simultanément au moins à 4 aléas naturels moyens à forts parmi 5	%	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
POP_4_ALEAS	Population exposée simultanément au moins à 4 aléas naturels moyens à forts parmi 5	Nombre d'habitants	LandScan, 2004 / ORNL & DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_POP_4_ALEAS	Part de la population exposée simultanément au moins à 4 aléas naturels moyens à forts parmi 5	%	LandScan, 2004 / ORNL & DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
ZU_4_ALEAS	Zones artificialisées en 2000 exposées simultanément au moins à 4 aléas naturels moyens à forts parmi 5	km²	CLC, 2000 / AEE & DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_ZU_4_ALEAS	Part des zones artificialisées en 2000 exposées simultanément au moins à 4 aléas naturels moyens à forts parmi 5	%	CLC, 2000 / AEE & DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
ROUTE_4_ALEAS	Routes principales exposées simultanément au moins à 4 aléas naturels moyens à forts parmi 5	km	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_ROUTE_4_ALEAS	Part des routes principales exposées simultanément au moins à 4 aléas naturels moyens à forts parmi 5	%	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS & GVP, 1999 / SI & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
RISQUE_SISMIQUE_AL : INDICATEURS DE RISQUE SISMIQUE			
SURF_SISMICITE	Territoire exposé à un aléa sismique moyen à fort	km²	GSHAP, 1999 / SSS
P_SURF_SISMICITE	Part du territoire exposé à un aléa sismique moyen à fort	%	GSHAP, 1999 / SSS
POP_SISMICITE	Population exposée à un aléa sismique moyen à fort	Nombre d'habitants	LandScan, 2004 / ORNL & GSHAP, 1999 / SSS
P_POP_SISMICITE	Part de la population exposée à un aléa sismique moyen à fort	%	LandScan, 2004 / ORNL & GSHAP, 1999 / SSS
D_POP_SISMICITE	Densité de population en zones d'aléa sismique moyen à fort	Nombre d'habitants / km²	LandScan, 2004 / ORNL & GSHAP, 1999 / SSS
ZU_SISMICITE	Zones artificialisées en 2000 exposées à un aléa sismique moyen à fort	km²	CLC, 2000 / AEE & GSHAP, 1999 / SSS
P_ZU_SISMICITE	Part des zones artificialisées en 2000 exposées à un aléa sismique moyen à fort	%	CLC, 2000 / AEE & GSHAP, 1999 / SSS
ROUTE_SISMICITE	Routes principales exposées à un aléa sismique moyen à fort	km	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS
P_ROUTE_SISMICITE	Part des routes principales exposées à un aléa sismique moyen à fort	%	DCWDS, 1998 / PSU & GSHAP, 1999 / SSS
EVT_MORTS_HISTO_SISMICITE	Epicentres sismiques auquels sont associés au moins 10 morts entre l'an 614 et 2004	Nombre	SIG RINAMED, 2006 / GESTER & NGDC, 2004 / NOAA
MORTS_HISTO_SISMICITE	Morts associés aux épicentres sismiques ayant entraîné au moins 10 morts entre l'an 614 et 2004	Nombre	SIG RINAMED, 2006 / GESTER & NGDC, 2004 / NOAA
MORTS_POST1900_SISMICITE	Morts dus à des séismes entre 1900 et 2004 (évènements de plus de 10 morts)	Nombre	SIG RINAMED, 2006 / GESTER & EMDAT, 2004 / CRED
EVT_M_SUP3_POST_1960_SISMICITE	Séismes de magnitude supérieure ou égale à 3 entre 1960 et 2004	Nombre	NEIC, 2004 / USGS
RISQUE_TSUNAMI_AL : INDICATEURS DE RISQUE TSUNAMI			
SURF_TSUNAMI	Territoire exposé à un aléa tsunami moyen à fort	km²	SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS
P_SURF_TSUNAMI	Part du territoire exposé à un aléa tsunami moyen à fort	%	SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS
POP_TSUNAMI	Population exposée à un aléa tsunami moyen à fort	Nombre d'habitants	LandScan, 2004 / ORNL & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS
P_POP_TSUNAMI	Part de la population exposée à un aléa tsunami moyen à fort	%	LandScan, 2004 / ORNL & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS
D_POP_TSUNAMI	Densité de population en zones d'aléa tsunami moyen à fort	Nombre d'habitants / km²	LandScan, 2004 / ORNL & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS
ZU_TSUNAMI	Zones artificialisées en 2000 exposées à un aléa tsunami moyen à fort	km²	CLC, 2000 / AEE & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS
P_ZU_TSUNAMI	Part des zones artificialisées en 2000 exposées à un aléa tsunami moyen à fort	%	CLC, 2000 / AEE & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS
ROUTE_TSUNAMI	Routes principales exposées à un aléa tsunami moyen à fort	km	DCWDS, 1998 / PSU & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS
P_ROUTE_TSUNAMI	Part des routes principales exposées à un aléa tsunami moyen à fort	%	DCWDS, 1998 / PSU & SRTM, 2000 / USGS & SWDB, 2000 / USGS
EVT_TSUNAMI	Témoignages de tsunami ayant frappé les côtes entre l'an - 216 et 2003	Nombre	SIG RINAMED, 2006 / GESTER & NGDC, 2004 / NOAA
MORTS_TSUNAMI	Morts dus à des tsunami entre 1900 et 2004 (évènements de plus de 10 morts)	Nombre	SIG RINAMED, 2006 / GESTER & EMDAT, 2004 / CRED

RISQUE_INONDATION_AL : INDICATEURS DE RISQUE INONDATION			
SURF_INONDATION	Territoire exposé à un aléa inondation	km²	DCWDS, 1998 / PSU
P_SURF_INONDATION	Part du territoire exposé à un aléa inondation	%	DCWDS, 1998 / PSU
POP_INONDATION	Population exposée à un aléa inondation	Nombre d'habitants	LandScan, 2004 / ORNL & DCWDS, 1998 / PSU
P_POP_INONDATION	Part de la population exposée à un aléa inondation	%	LandScan, 2004 / ORNL & DCWDS, 1998 / PSU
D_POP_INONDATION	Densité de population en zones d'aléa inondation	Nombre d'habitants / km²	LandScan, 2004 / ORNL & DCWDS, 1998 / PSU
ZU_INONDATION	Zones artificialisées en 2000 exposées à un aléa inondation	km²	CLC, 2000 / AEE & DCWDS, 1998 / PSU
P_ZU_INONDATION	Part des zones artificialisées en 2000 exposées à un aléa inondation	%	CLC, 2000 / AEE & DCWDS, 1998 / PSU
ROUTE_INONDATION	Routes principales exposées à un aléa inondation	km	DCWDS, 1998 / PSU
P_ROUTE_INONDATION	Part des routes principales exposées à un aléa inondation	%	DCWDS, 1998 / PSU
EVT_INONDATION	Inondations ayant entraîné au moins 10 morts entre 1900 et 2004	Nombre	SIG RINAMED, 2006 / GESTER & EMDAT, 2004 / CRED
MORTS_INONDATION	Morts dus à des inondations entre 1900 et 2004 (évènements de plus de 10 morts)	Nombre	SIG RINAMED, 2006 / GESTER & EMDAT, 2004 / CRED
RISQUE_VOLCANIQUE_AL : INDICATEURS DE RISQUE VOLCANIQUE			
SURF_VOLCAN	Territoire exposé à un aléa volcanique moyen à fort	km²	GVP, 1999 / SI
P_SURF_VOLCAN	Part du territoire exposé à un aléa volcanique moyen à fort	%	GVP, 1999 / SI
POP_VOLCAN	Population exposée à un aléa volcanique moyen à fort	Nombre d'habitants	LandScan, 2004 / ORNL & GVP, 1999 / SI
P_POP_VOLCAN	Part de la population exposée à un aléa volcanique moyen à fort	%	LandScan, 2004 / ORNL & GVP, 1999 / SI
D_POP_VOLCAN	Densité de population en zones d'aléa volcanique moyen à fort	Nombre d'habitants / km²	LandScan, 2004 / ORNL & GVP, 1999 / SI
ZU_VOLCAN	Zones artificialisées en 2000 exposées à un aléa volcanique moyen à fort	km²	CLC, 2000 / AEE & GVP, 1999 / SI
P_ZU_VOLCAN	Part des zones artificialisées en 2000 exposées à un aléa volcanique moyen à fort	%	CLC, 2000 / AEE & GVP, 1999 / SI
ROUTE_VOLCAN	Routes principales exposées à un aléa volcanique moyen à fort	km	DCWDS, 1998 / PSU & GVP, 1999 / SI
P_ROUTE_VOLCAN	Part des routes principales exposées à un aléa volcanique moyen à fort	%	DCWDS, 1998 / PSU & GVP, 1999 / SI
NB_VOLCAN	Volcans actifs au cours de la période historique	Nombre	GVP, 1999 / SI
MORTS_VOLCAN	Morts dus à des éruptions volcaniques entre 1900 et 2004 (évènements de plus de 10 morts)	Nombre	SIG RINAMED, 2006 / GESTER & EMDAT, 2004 / CRED
RISQUE_MVT_VERSANT_AL : INDICATEURS DE RISQUE MOUVEMENTS DE VERSANTS			
SURF_MVT	Territoire exposé à un aléa mouvements de versant moyen à fort	km²	SRTM, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_SURF_MVT	Part du territoire exposé à un aléa mouvements de versant moyen à fort	%	SRTM, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
POP_MVT	Population exposée à un aléa mouvements de versant moyen à fort	Nombre d'habitants	LandScan, 2004 / ORNL & SRTM, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_POP_MVT	Part de la population exposée à un aléa mouvements de versant moyen à fort	%	LandScan, 2004 / ORNL & SRTM, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
D_POP_MVT	Densité de population en zones d'aléa mouvements de versant moyen à fort	Nombre d'habitants / km²	LandScan, 2004 / ORNL & SRTM, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
ZU_MVT	Zones artificialisées en 2000 exposées à un aléa mouvements de versant moyen à fort	km²	CLC, 2000 / AEE & SRTM, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_ZU_MVT	Part des zones artificialisées en 2000 exposées à un aléa mouvements de versant moyen à fort	%	CLC, 2000 / AEE & SRTM, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
ROUTE_MVT	Routes principales exposées à un aléa mouvements de versant moyen à fort	km	DCWDS, 1998 / PSU & SRTM, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
P_ROUTE_MVT	Part des routes principales exposées à un aléa mouvements de versant moyen à fort	%	DCWDS, 1998 / PSU & SRTM, 2000 / USGS & TMC, 2002 / CRU
EVT_MVT	Mouvements de versant ayant entraîné au moins 10 morts entre 1900 et 2004	Nombre	SIG RINAMED, 2006 / GESTER & EMDAT, 2004 / CRED
MORTS_MVT	Morts dus à des mouvements de versant entre 1900 et 2004 (évènements de plus de 10 morts)	Nombre	SIG RINAMED, 2006 / GESTER & EMDAT, 2004 / CRED
RISQUE_EROSION_LITTORALE_AL : INDICATEURS DE RISQUE EROSION LITTORALE			
LONG_EROSION	Littoral exposé à un aléa érosion moyen à fort	km	EUROSION, 2002 / AEE
P_EROSION	Part du littoral exposé à un aléa érosion moyen à fort	%	EUROSION, 2002 / AEE
RISQUE_EROSION_SOL_AL : INDICATEURS DE RISQUE EROSION DES SOLS			
SURF_EROSION	Territoire exposé à un aléa érosion des sols fort	km²	CSERP, 1990 / AEE
P_SURF_EROSION	Part du territoire exposé à un aléa érosion des sols fort	%	CSERP, 1990 / AEE
RISQUE_ARIDITE_AL : INDICATEURS DE RISQUE ARIDITE			
SURF_ARIDIDITE	Territoire exposé à un aléa aridité moyen à fort	km²	DISMED, 1990 / AEE
P_SURF_ARIDITE	Part du territoire exposé à un aléa aridité moyen à fort	%	DISMED, 1990 / AEE
POP_ARIDITE	Population exposée à un aléa aridité moyen à fort	Nombre d'habitants	LandScan, 2004 / ORNL & DISMED, 1990 / AEE
P_POP_ARIDITE	Part de la population exposée à un aléa aridité moyen à fort	%	LandScan, 2004 / ORNL & DISMED, 1990 / AEE
D_POP_ARIDITE	Densité de population en zones d'aléa aridité moyen à fort	Nombre d'habitants / km²	LandScan, 2004 / ORNL & DISMED, 1990 / AEE
ZU_ARIDITE	Zones artificialisées en 2000 exposées à un aléa aridité moyen à fort	km²	CLC, 2000 / AEE & DISMED, 1990 / AEE
P_ZU_ARIDITE	Part des zones artificialisées en 2000 exposées à un aléa aridité moyen à fort	%	CLC, 2000 / AEE & DISMED, 1990 / AEE
RISQUE_NUCLEAIRE_AL : INDICATEURS DE RISQUE NUCLEAIRE (RADIOACTIVITE)			
SURF_NUCLEAIRE	Territoire exposé à un aléa nucléaire moyen à fort	km²	IAEA, 1999 / UNEP
P_SURF_NUCLEAIRE	Part du territoire exposé à un aléa nucléaire moyen à fort	%	IAEA, 1999 / UNEP
POP_NUCLEAIRE	Population exposée à un aléa nucléaire moyen à fort	Nombre d'habitants	LandScan, 2004 / ORNL & IAEA, 1999 / UNEP
P_POP_NUCLEAIRE	Part de la population exposée à un aléa nucléaire moyen à fort	%	LandScan, 2004 / ORNL & IAEA, 1999 / UNEP
D_POP_NUCLEAIRE	Densité de population en zones d'aléa nucléaire moyen à fort	Nombre d'habitants / km²	LandScan, 2004 / ORNL & IAEA, 1999 / UNEP
ZU_NUCLEAIRE	Zones artificialisées en 2000 exposées à un aléa nucléaire moyen à fort	km²	CLC, 2000 / AEE & IAEA, 1999 / UNEP
P_ZU_NUCLEAIRE	Part des zones artificialisées en 2000 exposées à un aléa nucléaire moyen à fort	%	CLC, 2000 / AEE & IAEA, 1999 / UNEP
NB_REACTEURS	Réacteurs nucléaires	Nombre	IAEA, 1999 / UNEP
RISQUE_POLLUTION_ATMO_INDUS_AL : INDICATEURS DE RISQUE POLLUTION ATMOSPHERIQUE INDUSTRIELLE			
SURF_INDUSTRIEL	Territoire exposé à un aléa pollution atmosphérique d'origine industrielle	km²	EPER, 2001 / AEE
P_SURF_INDUSTRIEL	Part du territoire exposé à un aléa pollution atmosphérique d'origine industrielle	%	EPER, 2001 / AEE
POP_INDUSTRIEL	Population exposée à un aléa pollution atmosphérique d'origine industrielle	Nombre d'habitants	LandScan, 2004 / ORNL & EPER, 2001 / AEE
P_POP_INDUSTRIEL	Part de la population exposée à un aléa pollution atmosphérique d'origine industrielle	%	LandScan, 2004 / ORNL & EPER, 2001 / AEE
D_POP_INDUSTRIEL	Densité de population en zones d'aléa pollution atmosphérique d'origine industrielle	Nombre d'habitants / km²	LandScan, 2004 / ORNL & EPER, 2001 / AEE
ZU_INDUSTRIEL	Zones artificialisées en 2000 exposées à un aléa pollution atmosphérique d'origine industrielle	km²	CLC, 2000 / AEE & EPER, 2001 / AEE
P_ZU_INDUSTRIEL	Part des zones artificialisées en 2000 exposées à un aléa pollution atmosphérique d'origine industrielle	%	CLC, 2000 / AEE & EPER, 2001 / AEE
NB_INDUSTRIEL	Sources d'émissions aériennes polluantes en 2001	Nombre	EPER, 2001 / AEE
EMISSIONS_CO	Emissions polluantes en monoxyde de carbone (CO) d'origine industrielle	Tonnes / an	EPER, 2001 / AEE
EMISSIONS_CO2	Emissions polluantes en dioxyde de carbone (CO2) d'origine industrielle	Tonnes / an	EPER, 2001 / AEE
EMISSIONS_CH4	Emissions polluantes en méthane (CH4) d'origine industrielle	Tonnes / an	EPER, 2001 / AEE

ANNEXE 17

Quelques productions cartographiques issues du Système d'Information Géographique sur les Risques naturels en Méditerranée (SIG RINAMED) (dir. F. Leone).

Le relief terrestre (MNT)

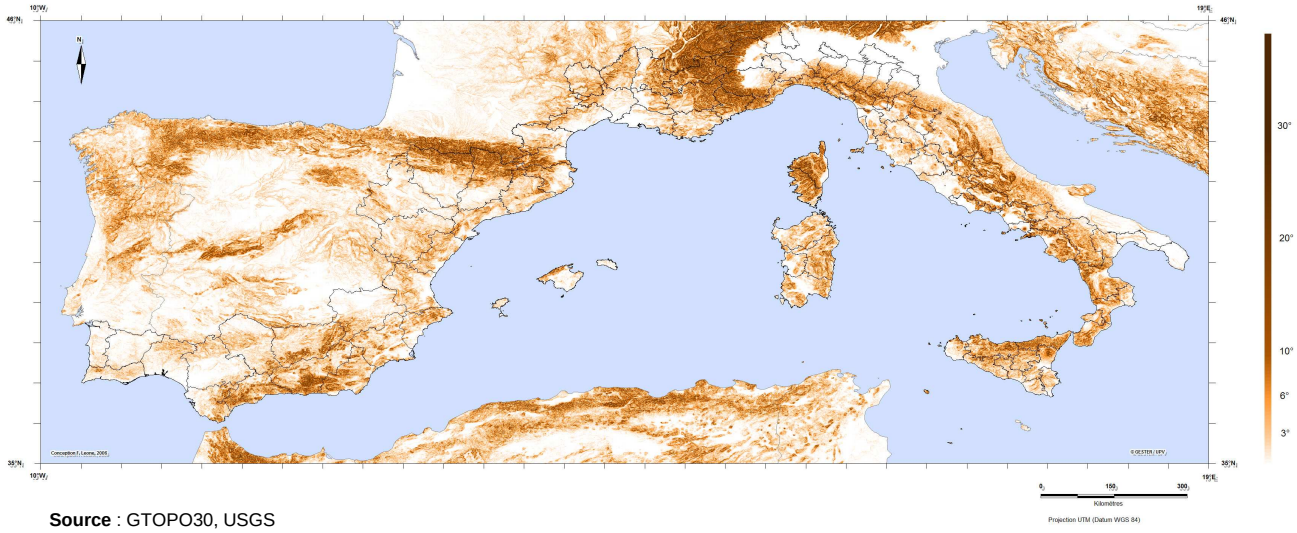


Source : GTOPO30 / USGS

Le relief terrestre de l'Arc latin (MNT)

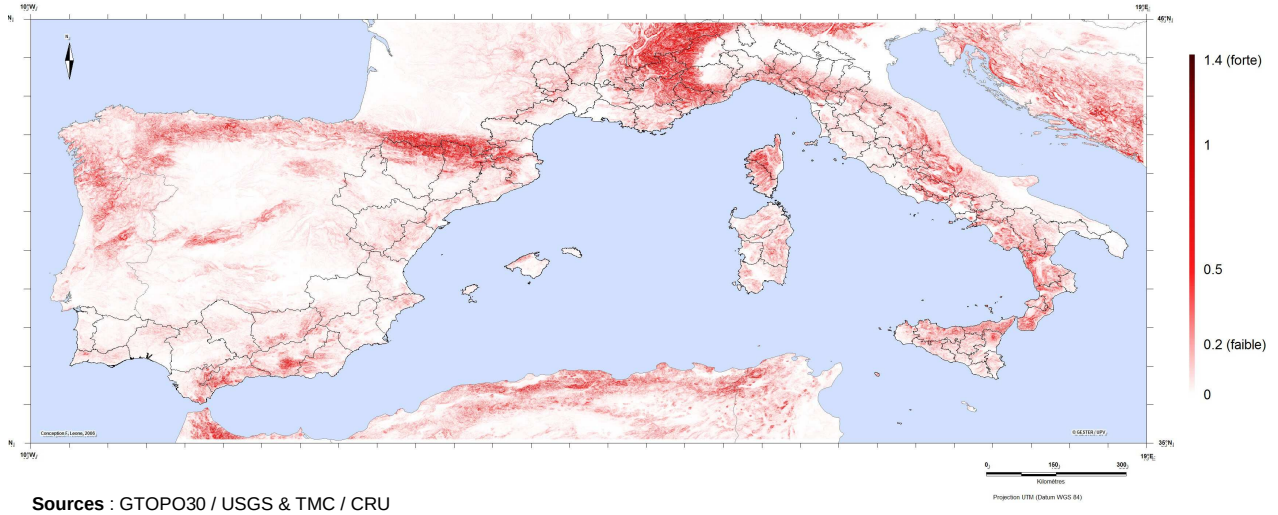
Source : GTOPO30 / USGS

Les pentes de l'Arc latin



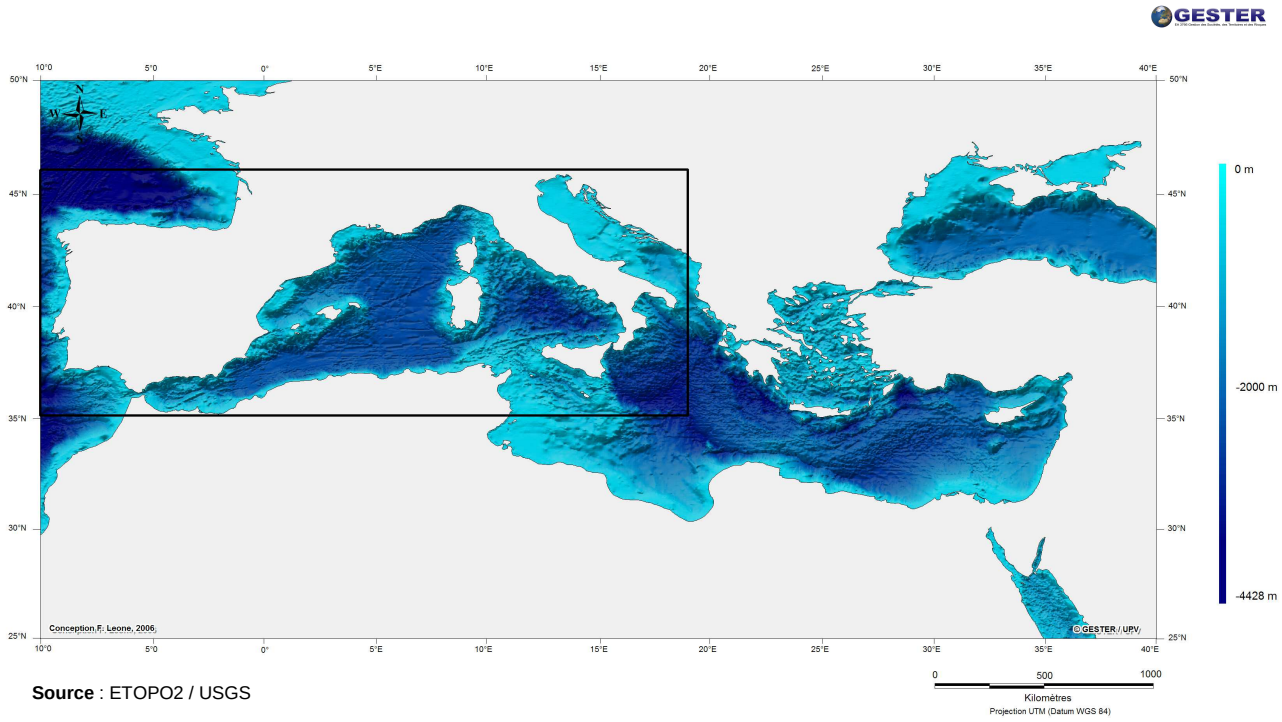
Source : GTOPO30, USGS

La susceptibilité aux mouvements de versants (Arc latin)



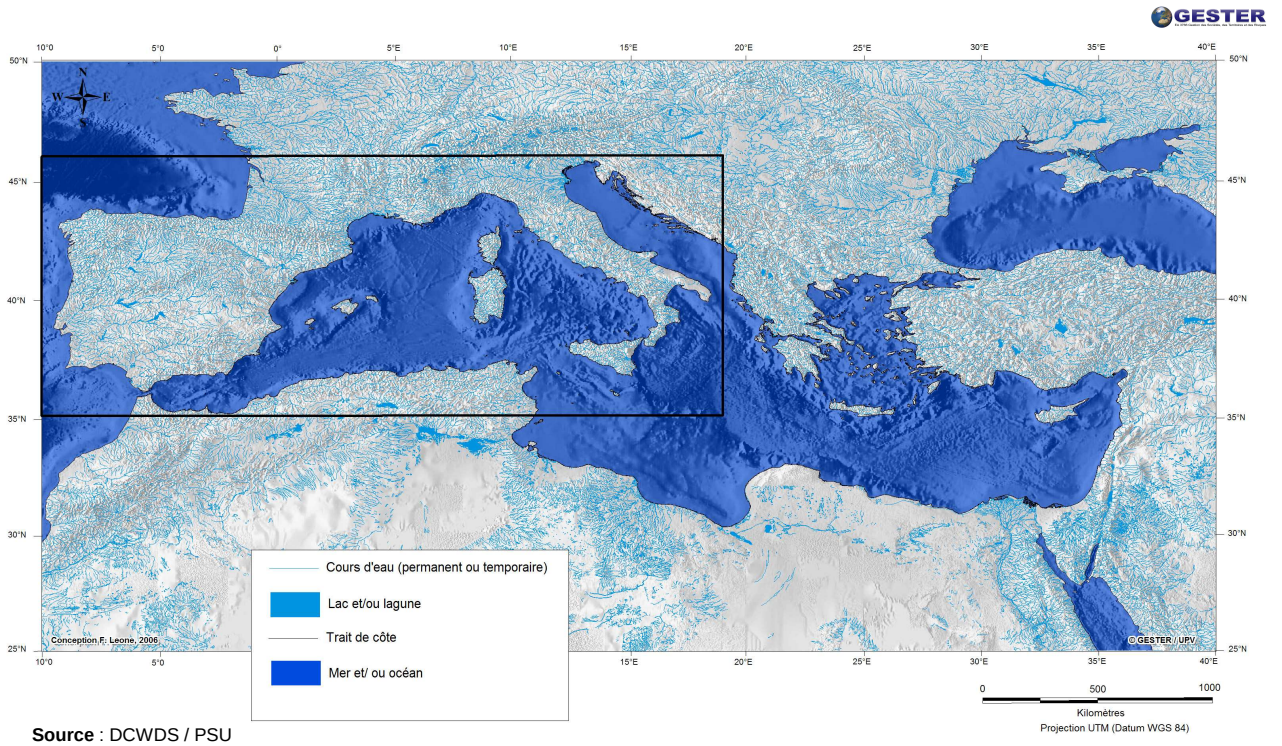
Sources : GTOPO30 / USGS & TMC / CRU

Le relief sous-marin (MNT)



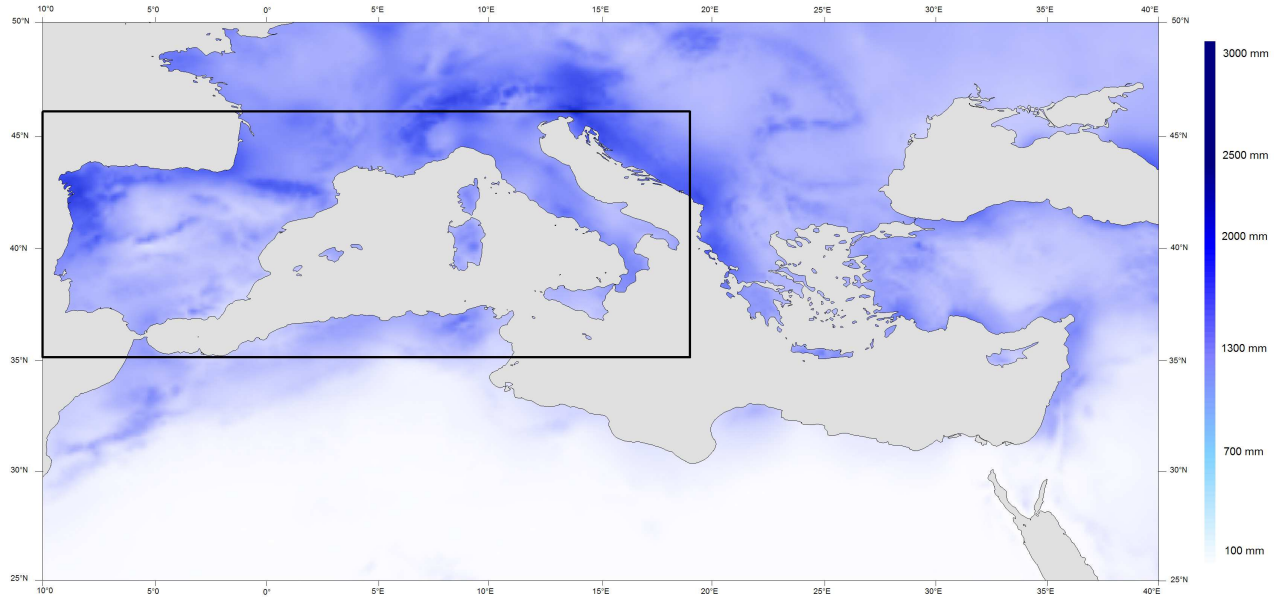
Source : ETOPO2 / USGS

Le réseau hydrographique



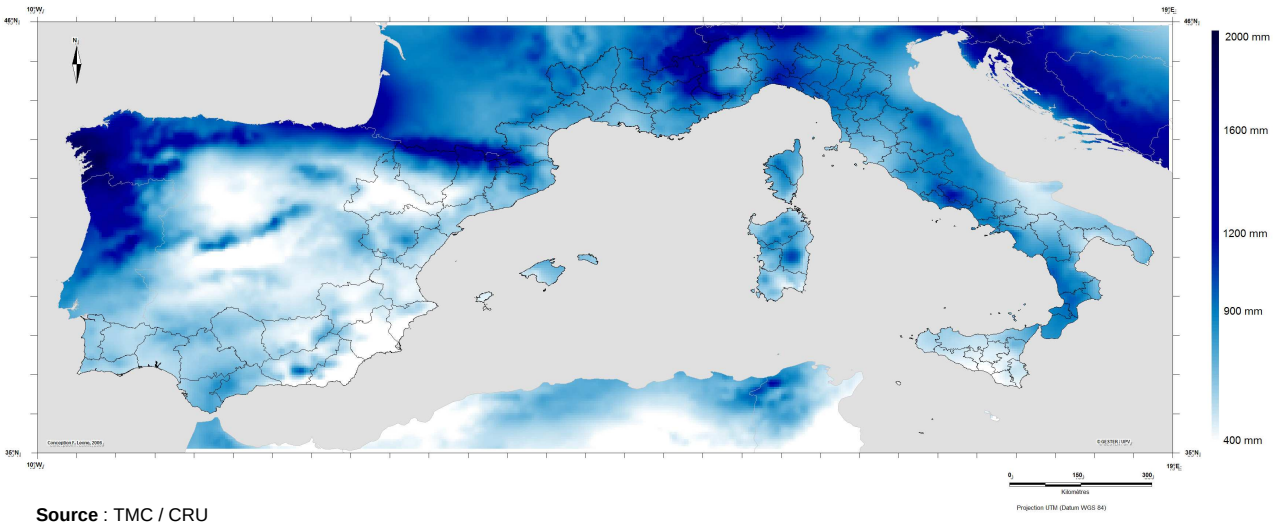
Source : DCWDS / PSU

Les précipitations moyennes annuelles (1961-1990)



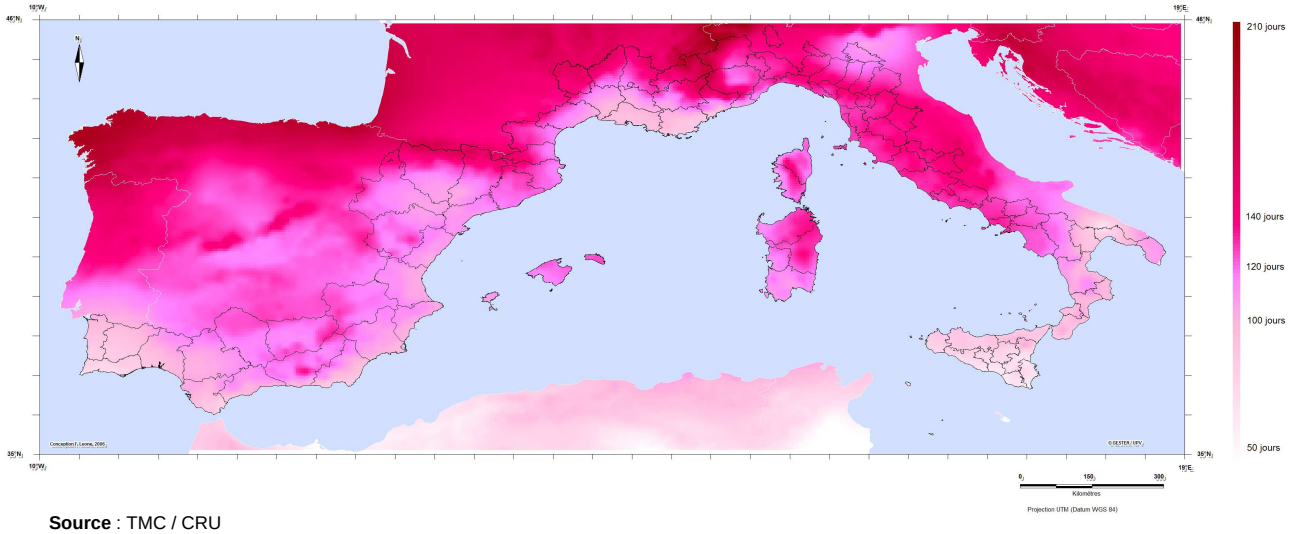
Source : TMC / CRU

Les précipitations moyennes annuelles (1961-1990) de l'Arc latin



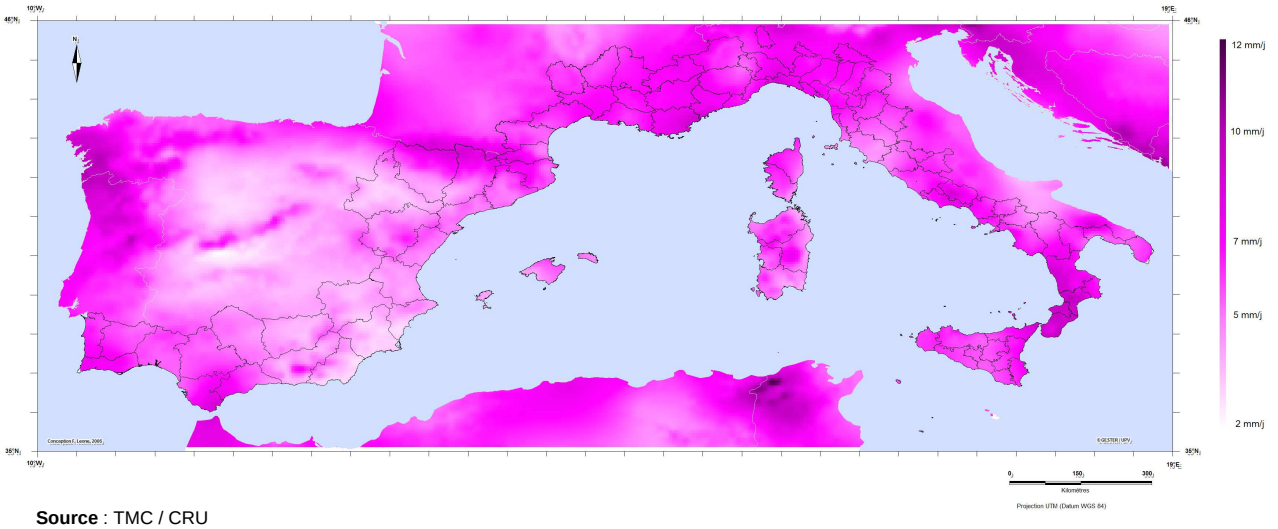
Source : TMC / CRU

La fréquence moyenne annuelle des pluies (plus de 10 mm) (1961-90)



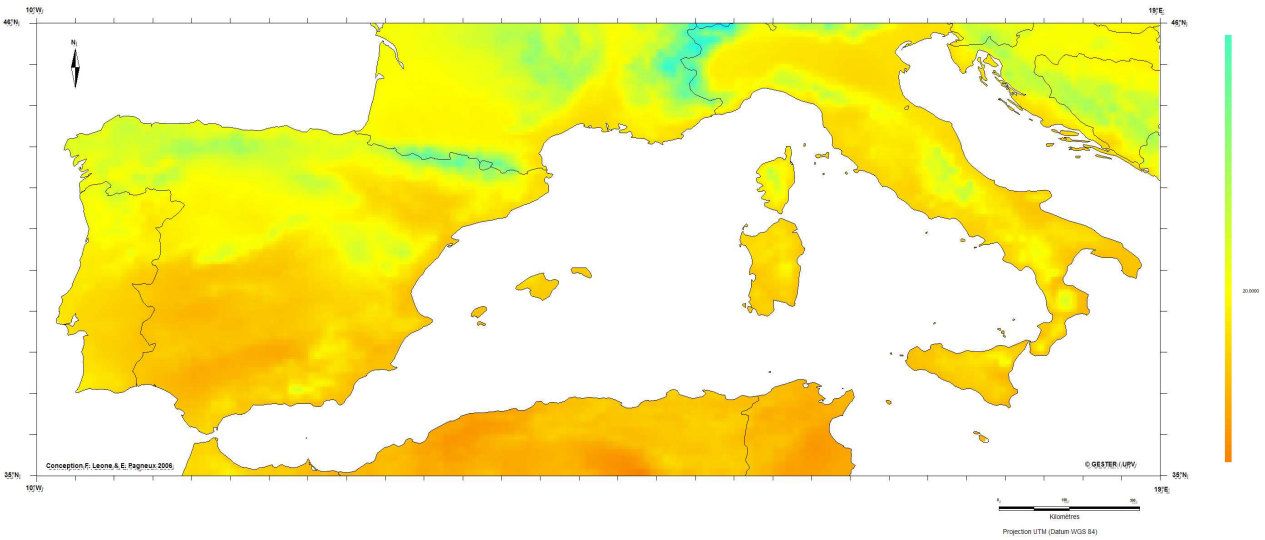
Source : TMC / CRU

Les intensités pluviométriques moyennes annuelles (1961-1990)



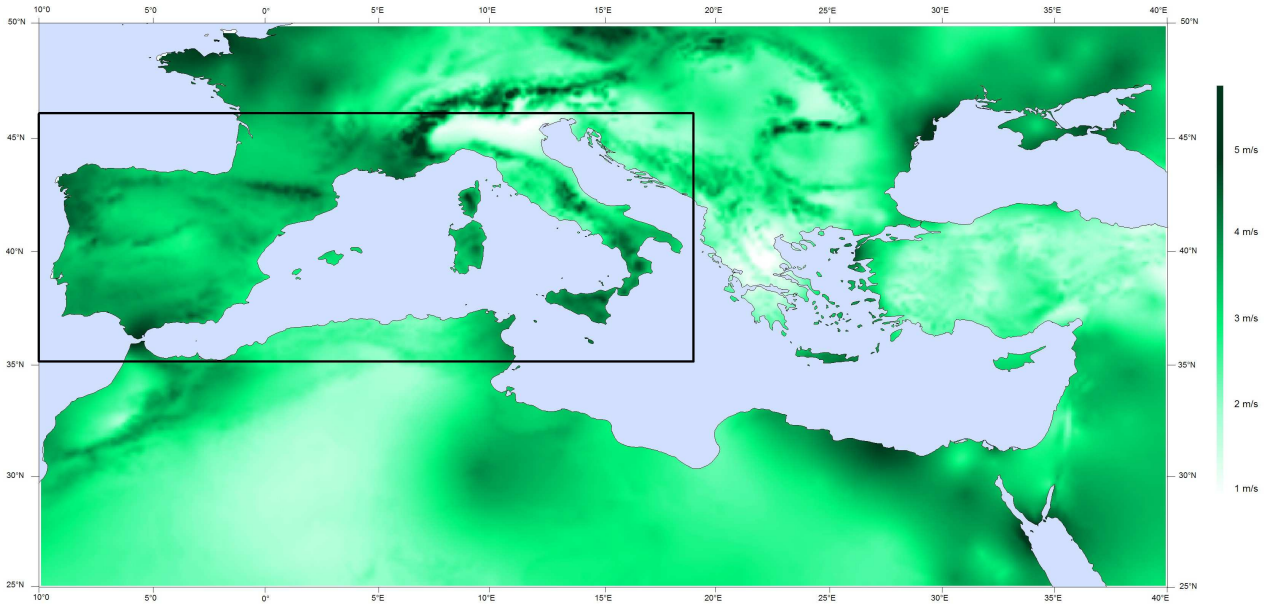
Source : TMC / CRU

Les températures moyennes de janvier (1961-1990)



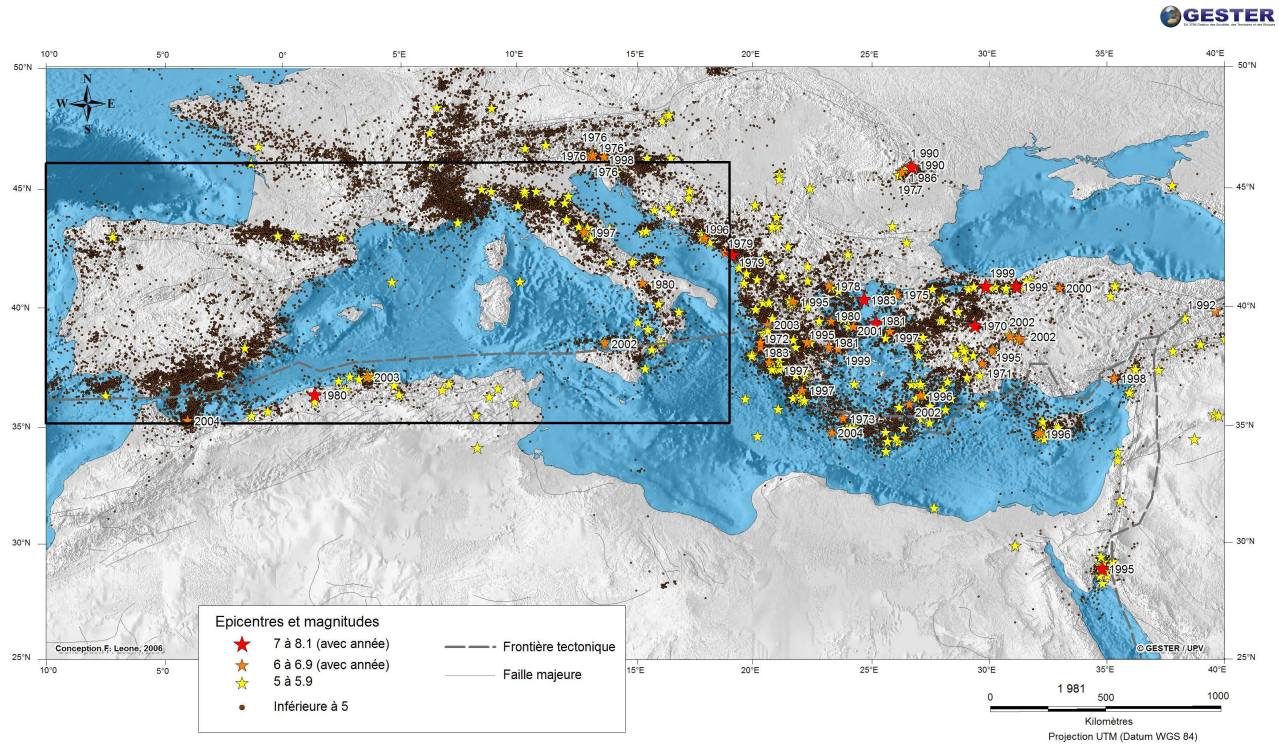
Source : TMC / CRU

La vitesse moyenne annuelle des vents



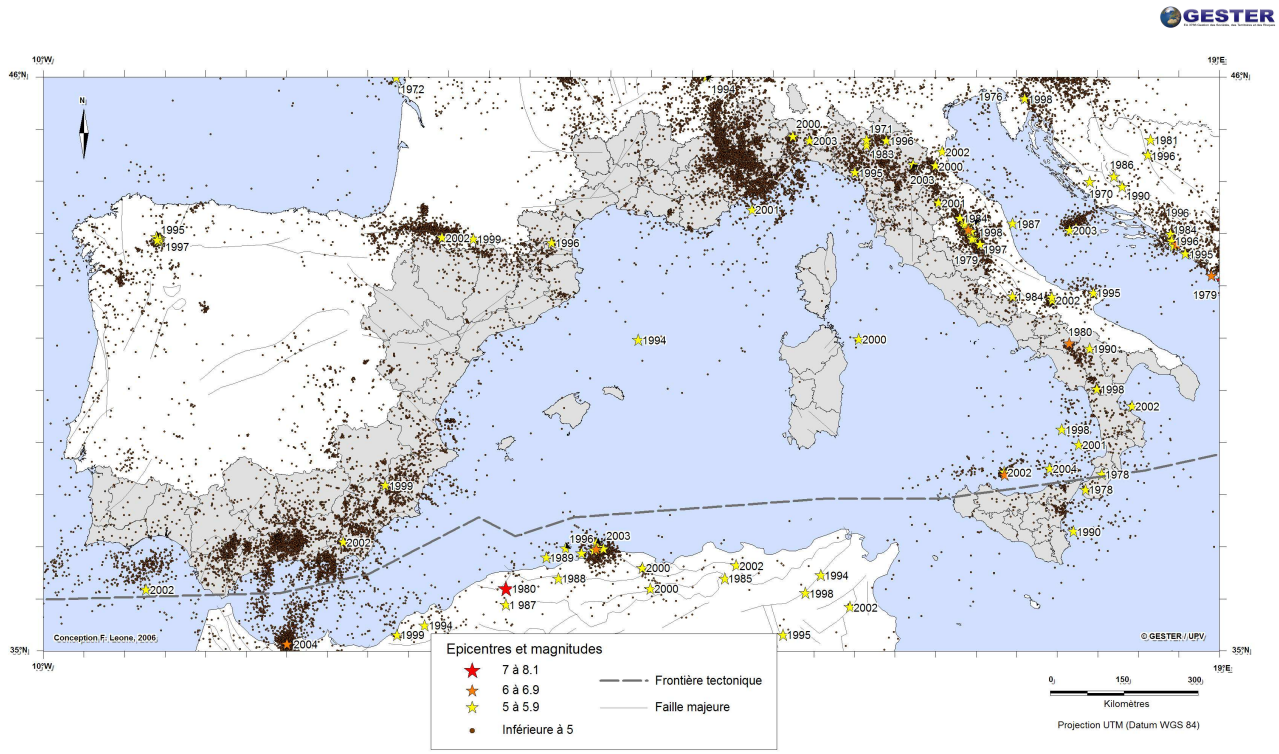
Source : TMC / CRU

L'activité sismique entre 1970 et 2004



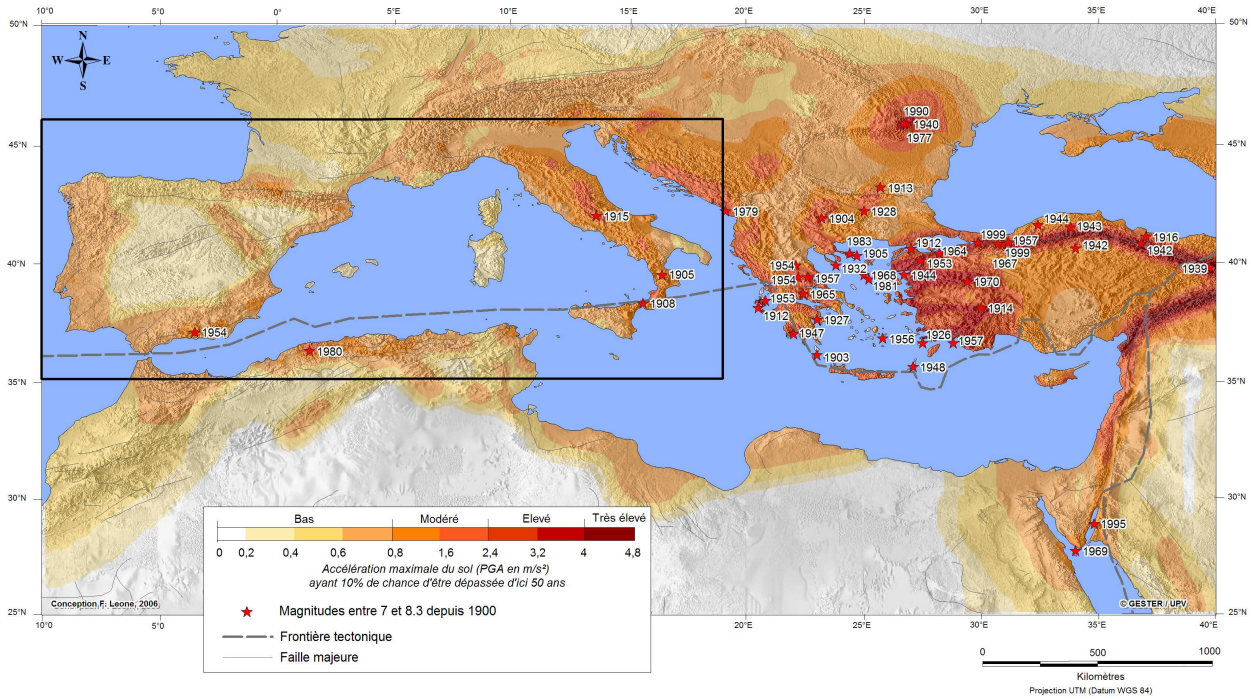
Sources : NEIC / USGS & NGDC / NOAA & SIG RINAMED / GESTER

L'activité sismique entre 1970 et 2004 de l'Arc latin



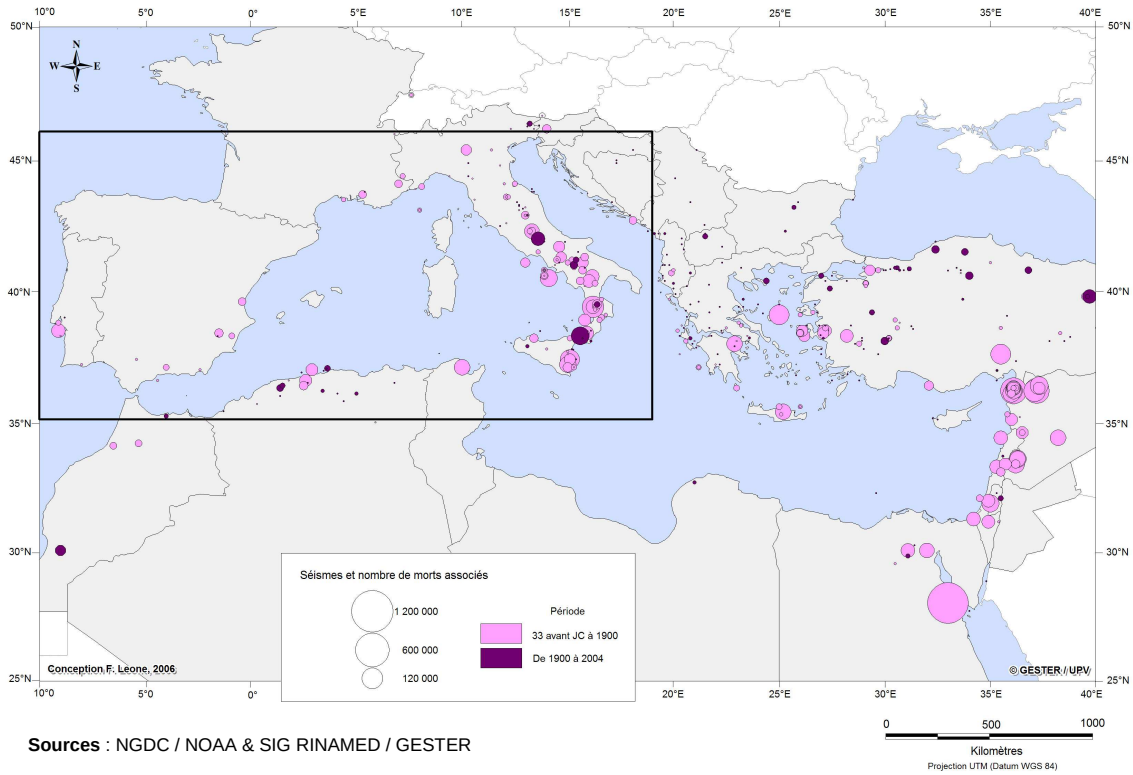
Sources : NEIC / USGS & NGDC / NOAA & SIG RINAMED / GESTER

L'aléa sismique



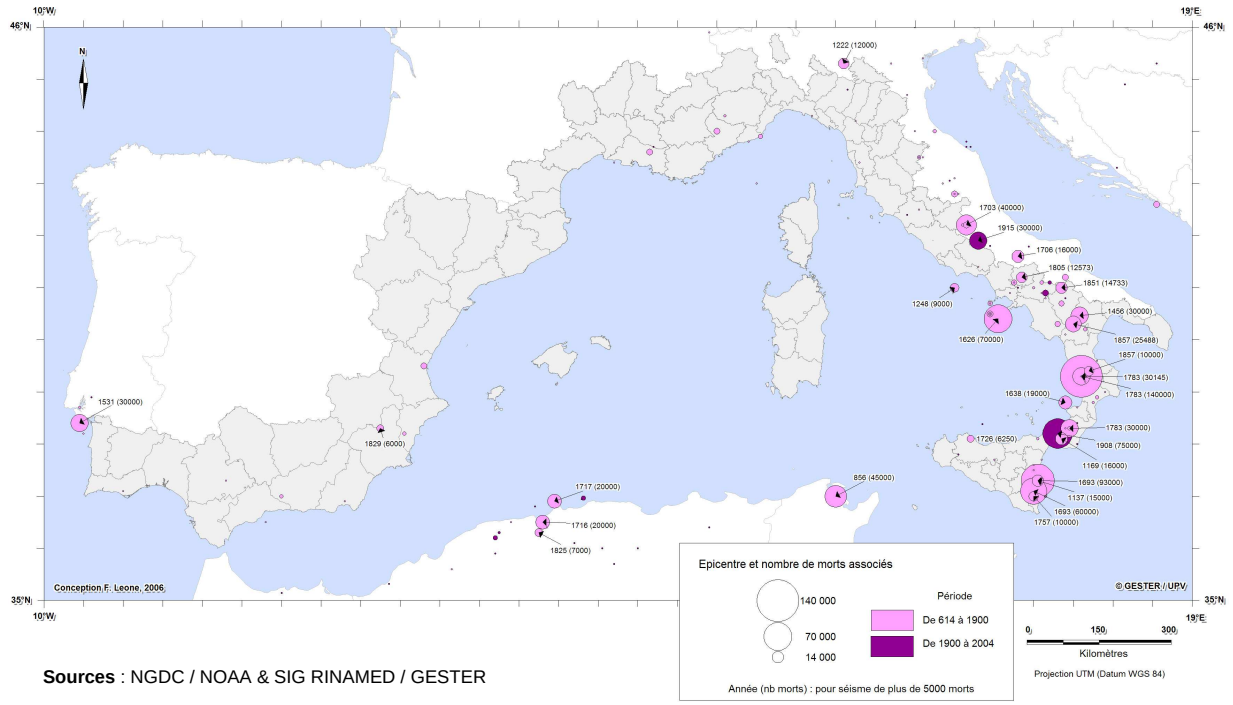
Source : GSHAP / SSS

Les victimes de tremblements de terre depuis 33 avant J.C.



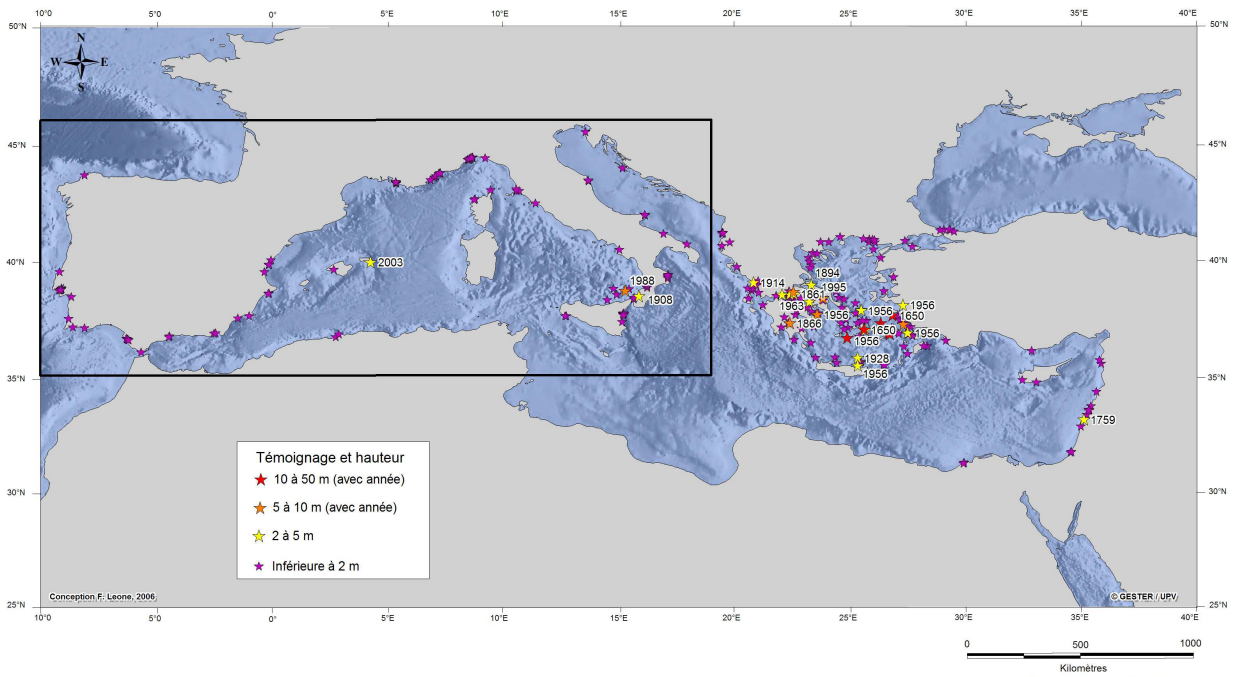
Sources : NGDC / NOAA & SIG RINAMED / GESTER

Les victimes de tremblements de terre depuis l'an 614 (Arc latin)



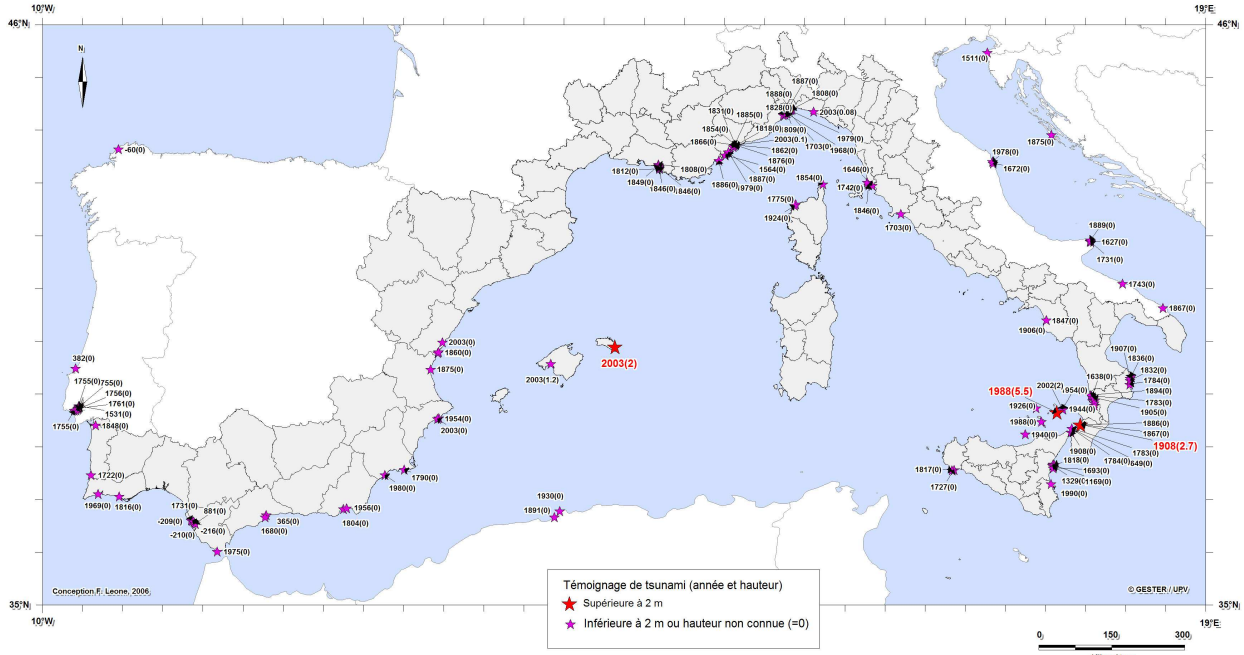
Sources : NGDC / NOAA & SIG RINAMED / GESTER

Les témoignages de tsunami depuis 1410 avant J.C. (effets sur la côte)



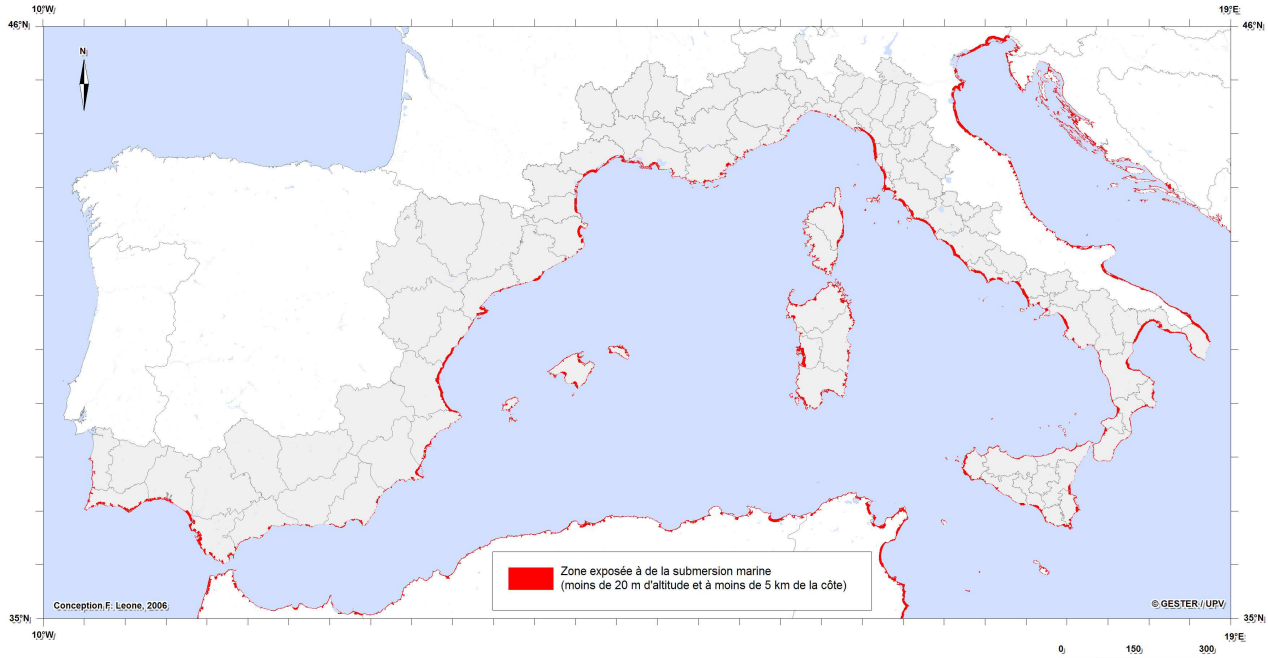
Sources : NGDC / NOAA & SIG RINAMED / GESTER

Les témoignages de tsunami depuis 216 avant J.C. (effets) (Arc latin)



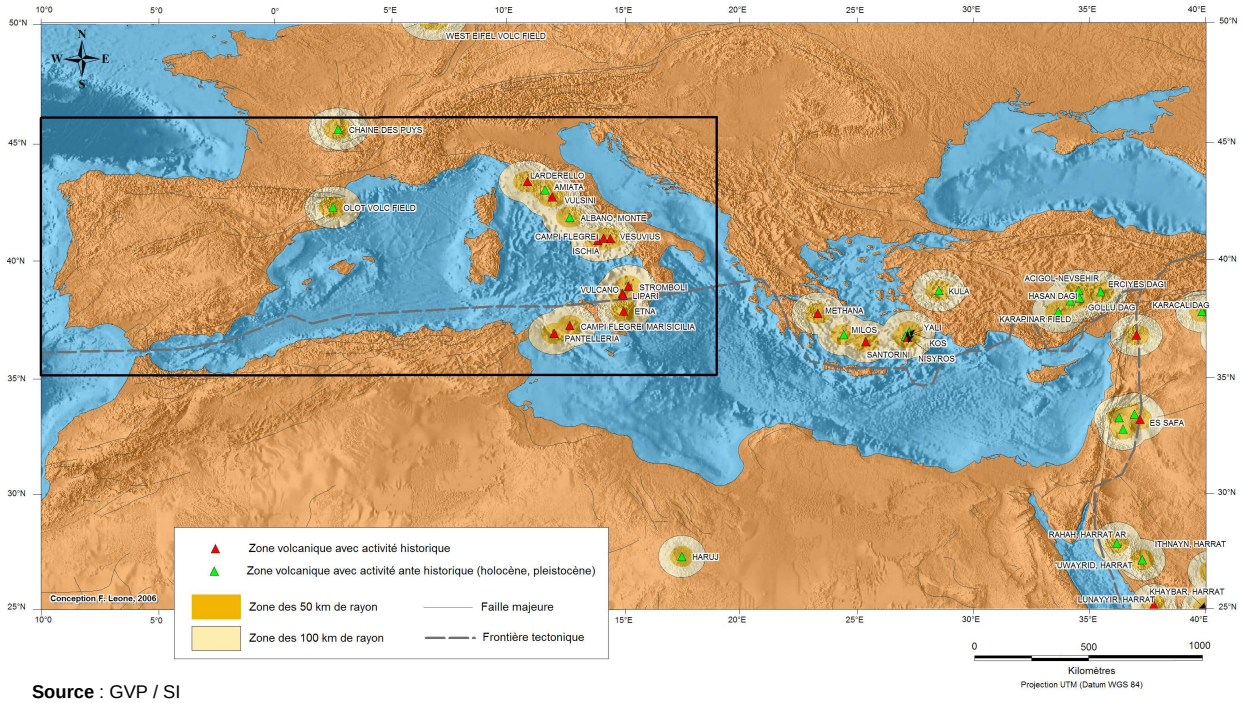
Sources : NGDC / NOAA & SIG RINAMED / GESTER

Les zones exposées à un aléa tsunami (Arc latin)



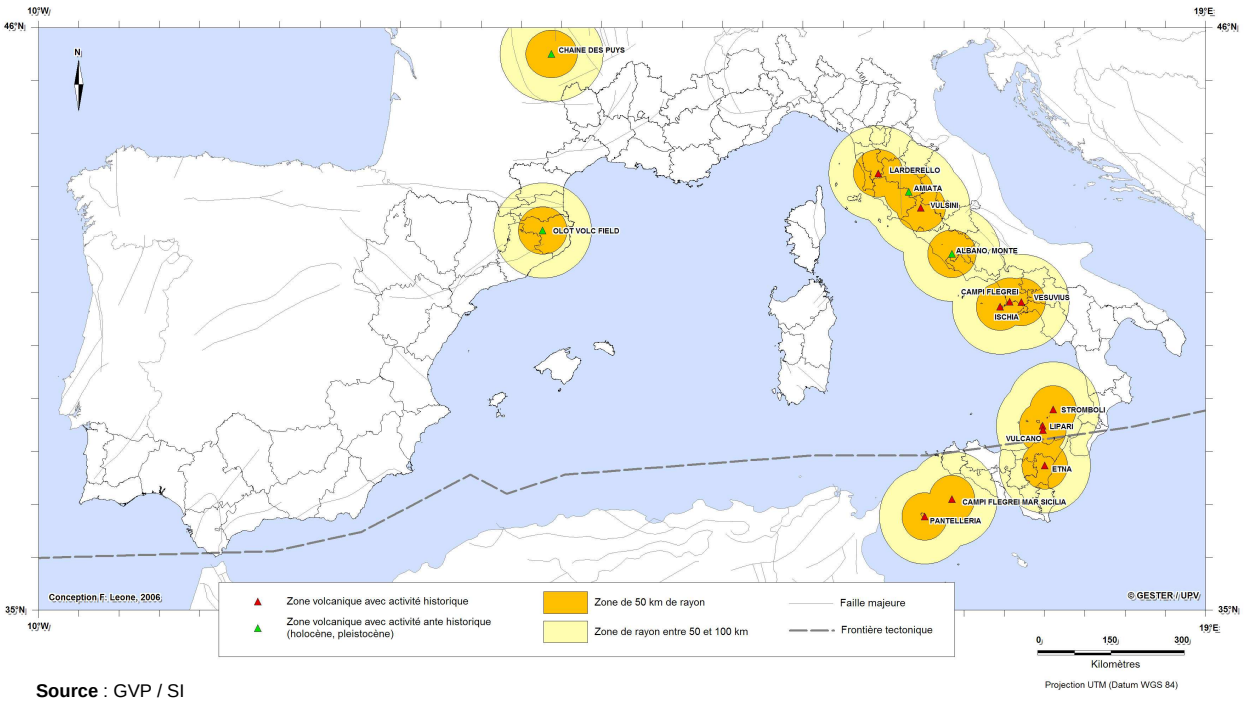
Sources : SRTM / USGS & SWDB / USGS

Les volcans actifs



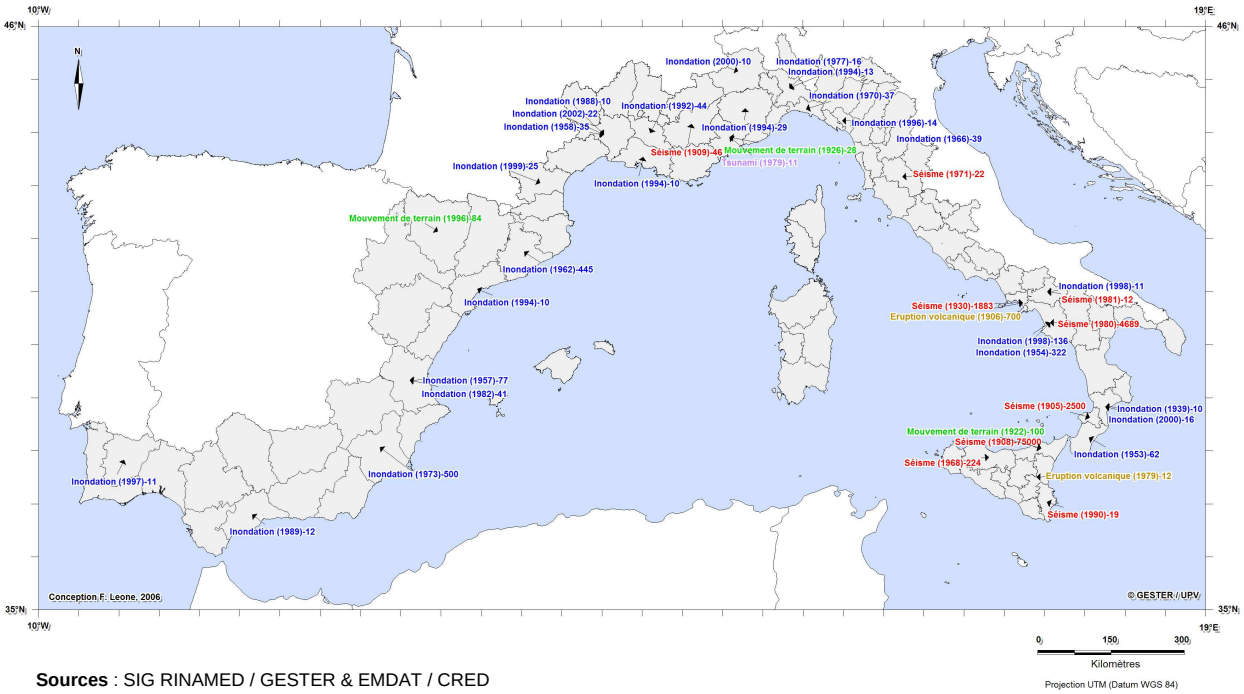
Source : GVP / SI

Les volcans actifs de l'Arc latin



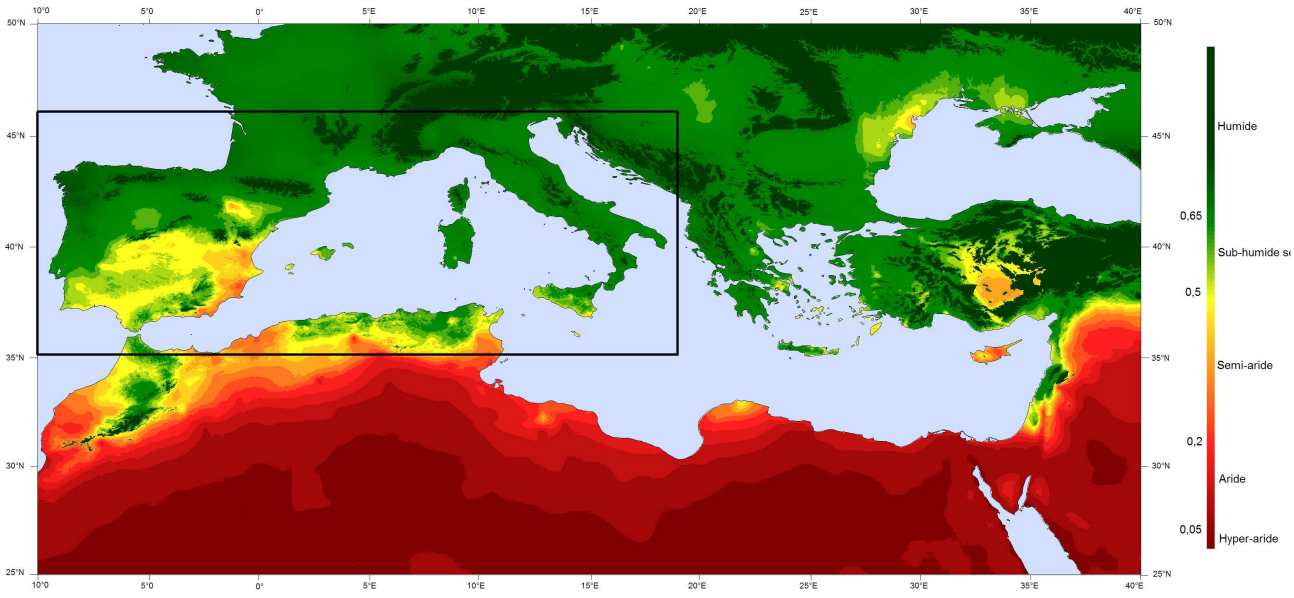
Source : GVP / SI

Les catastrophes naturelles de plus de 10 morts depuis 1900 dans l'Arc latin



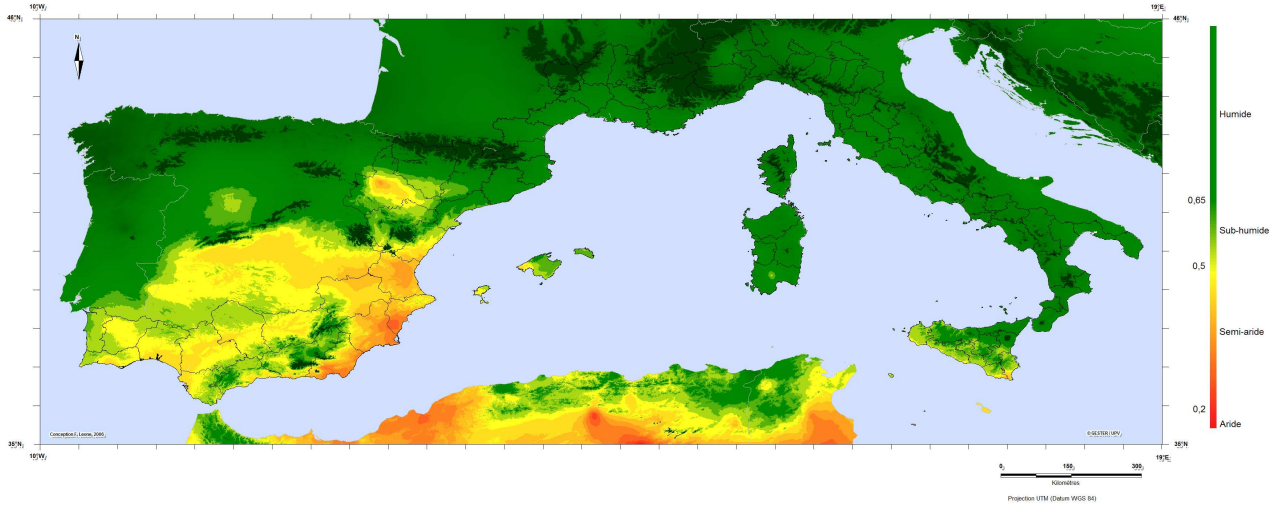
Sources : SIG RINAMED / GESTER & EMDAT / CRED

La sensibilité à l'aridité



Source : DISMED / AEE

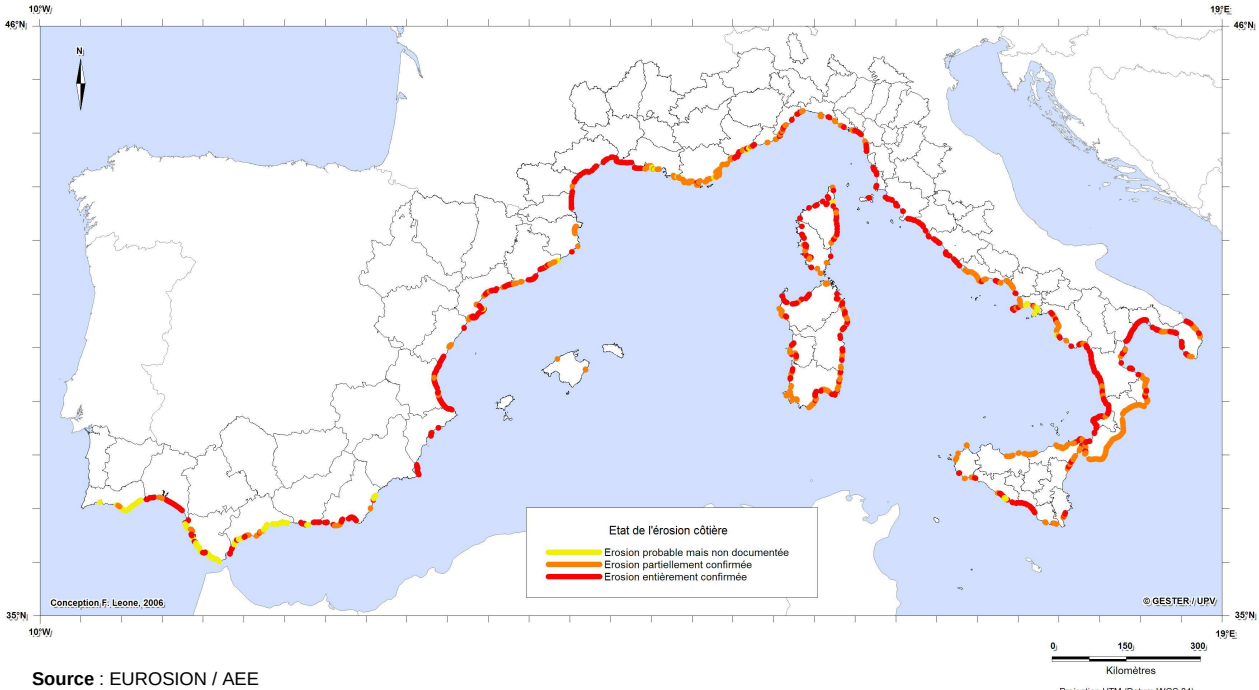
La sensibilité à l'aridité de l'Arc latin



Source : DISMED / AEE

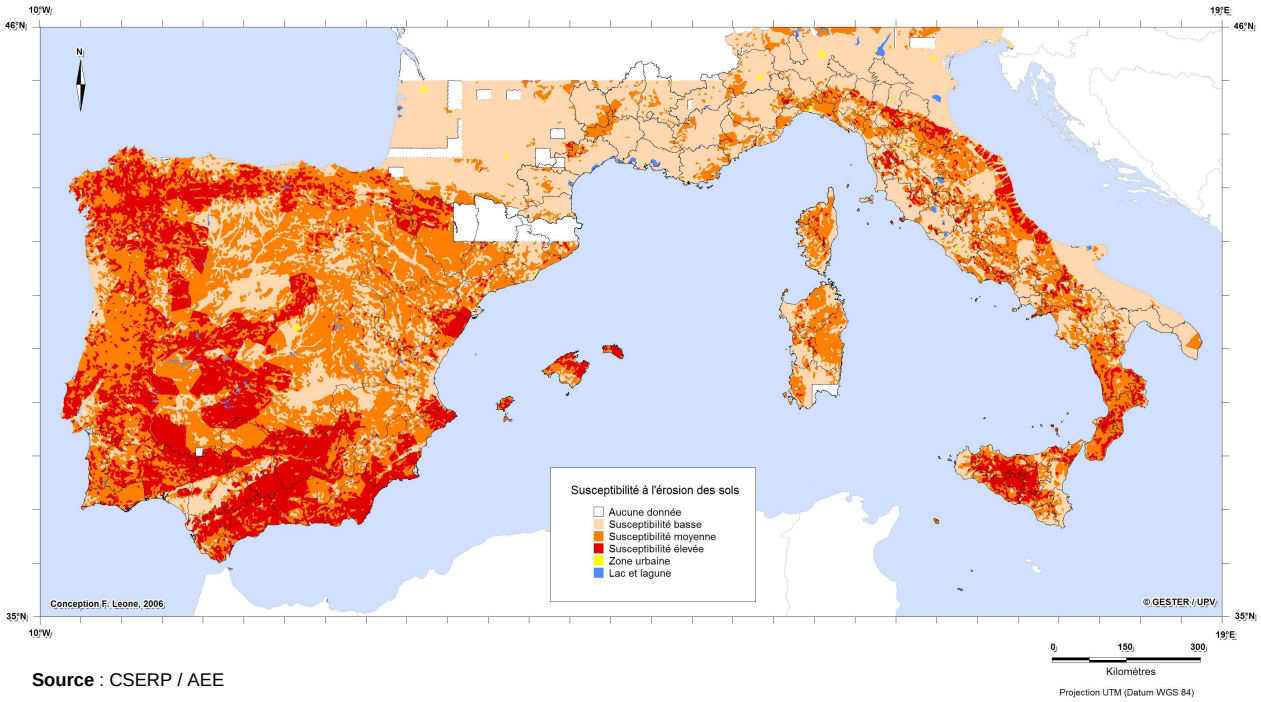
F. Leone, 2007 (UPV / GESTER)

L'érosion des côtes de l'Arc latin



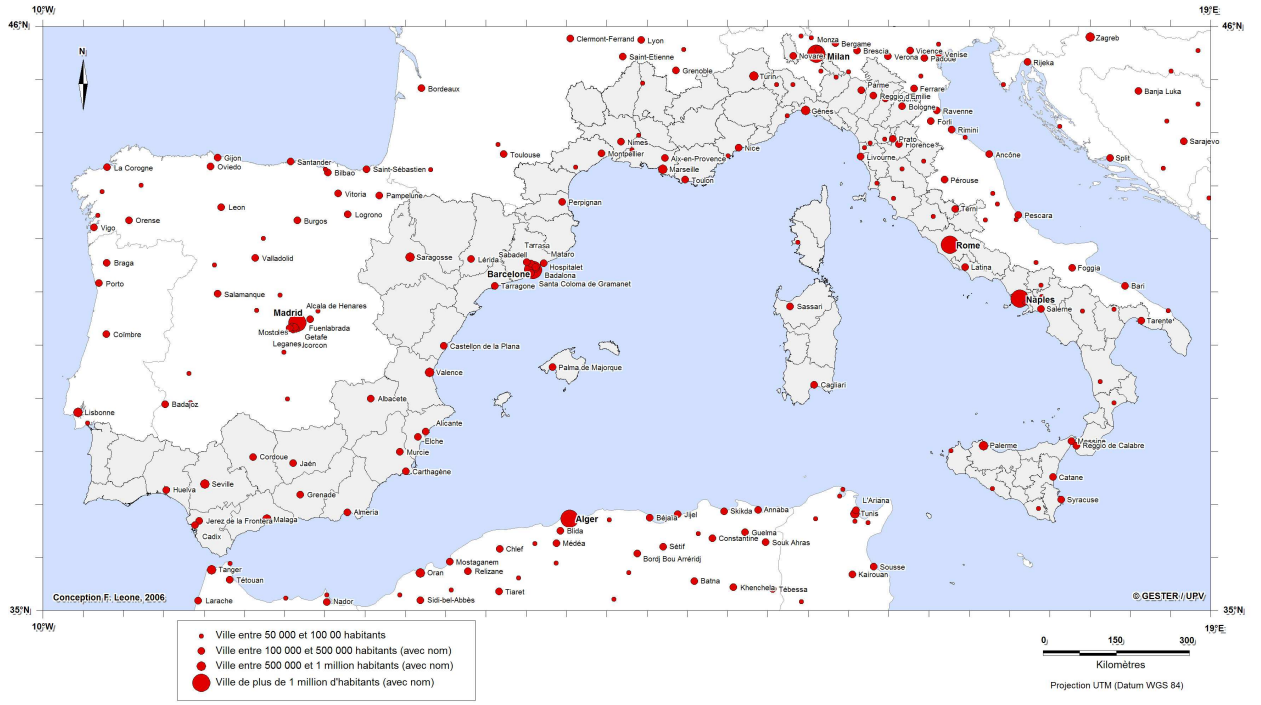
Source : EUROSION / AEE

L'érosion des sols de l'Arc latin



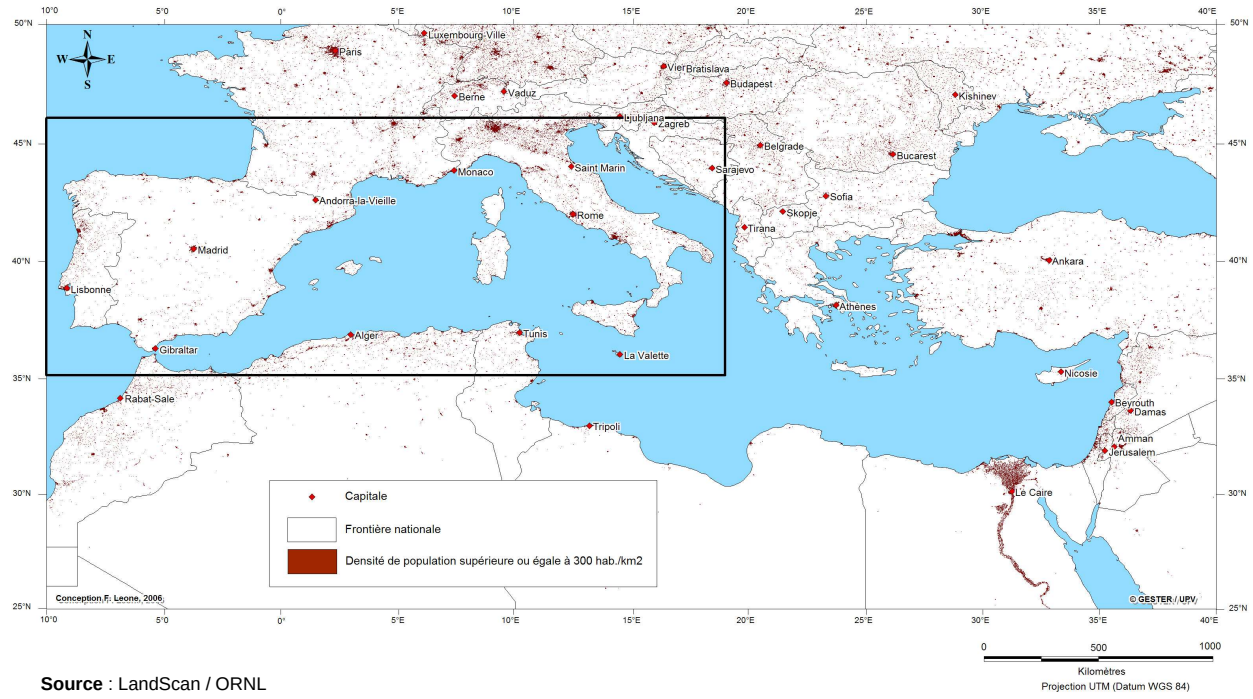
Source : CSERP / AEE

Les villes de plus de 50 000 habitants de l'Arc latin



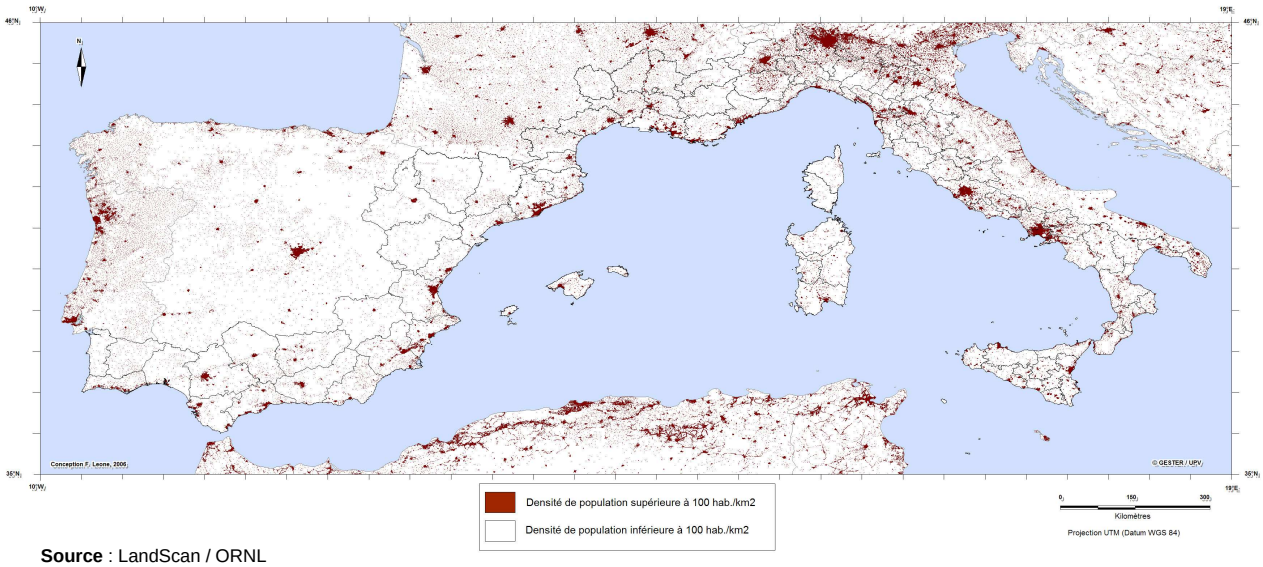
Source : SIG RINAMED / GESTER

Les agglomérations de la Méditerranée



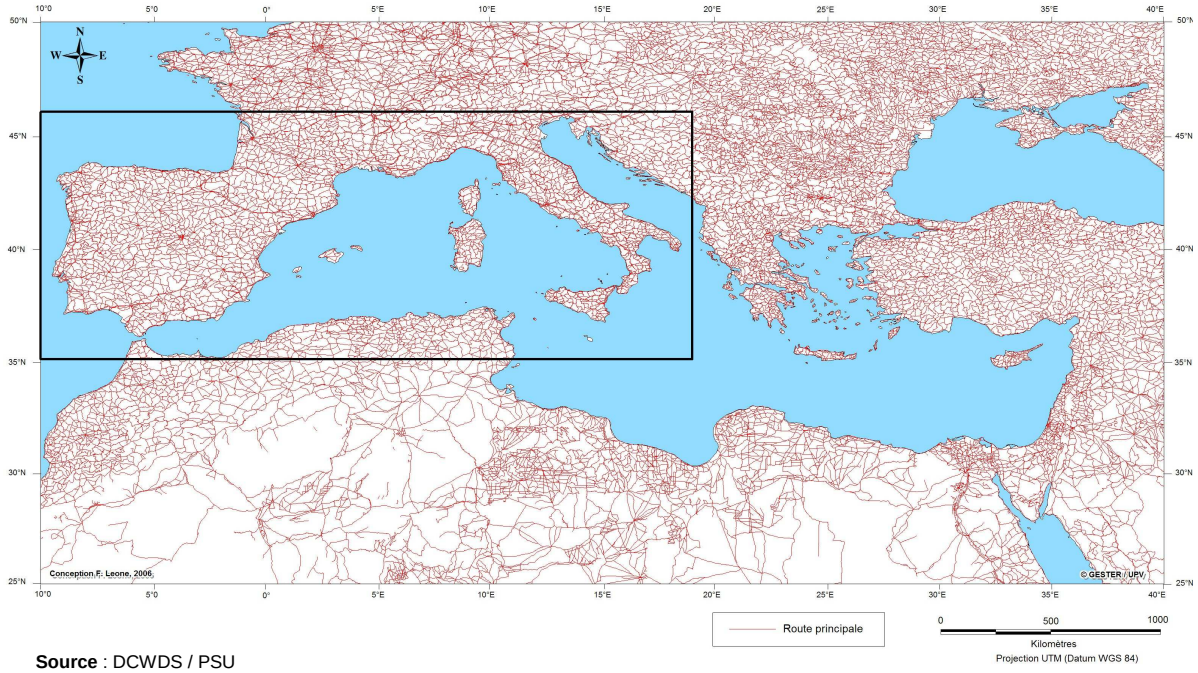
Source : LandScan / ORNL

Les fortes densités humaines de l'Arc latin



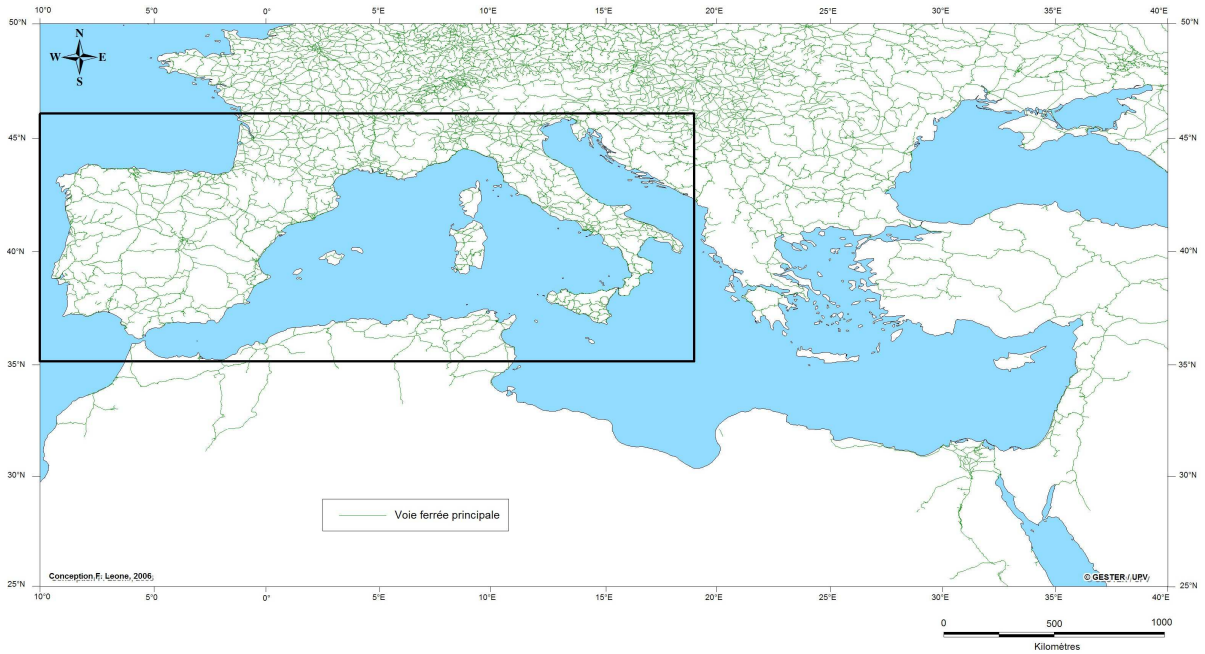
Source : LandScan / ORNL

Le réseau routier



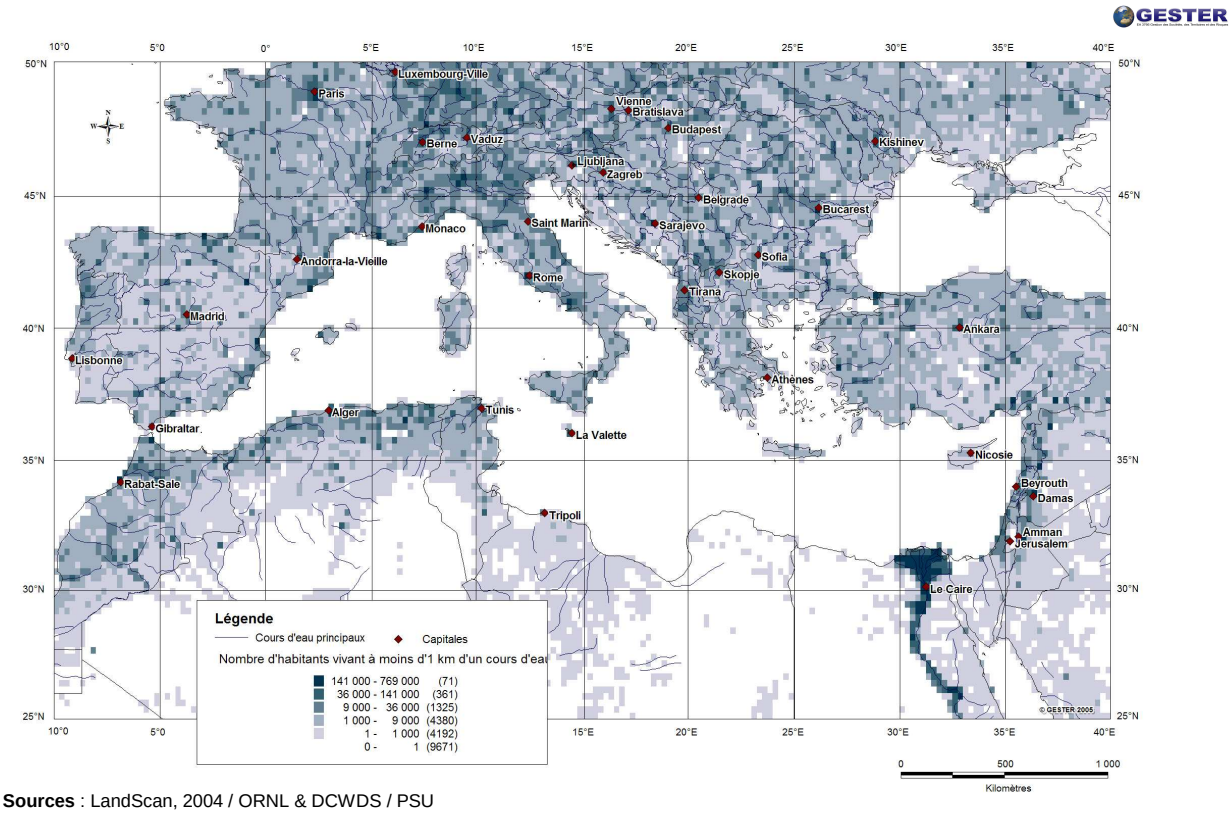
Source : DCWDS / PSU

Le réseau ferré



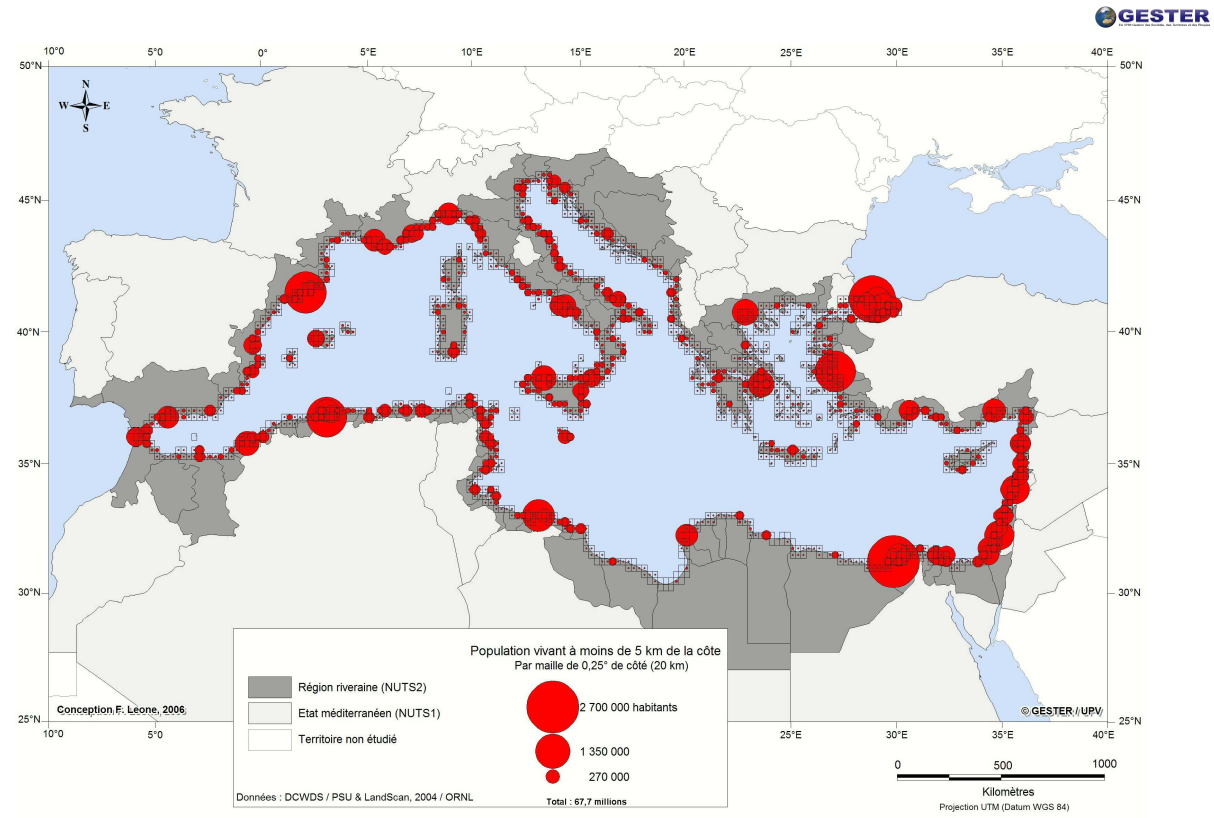
Source : DCWDS / PSU

Enjeux démographiques à moins d'1 Km d'un cours d'eau



Sources : LandScan, 2004 / ORNL & DCWDS / PSU

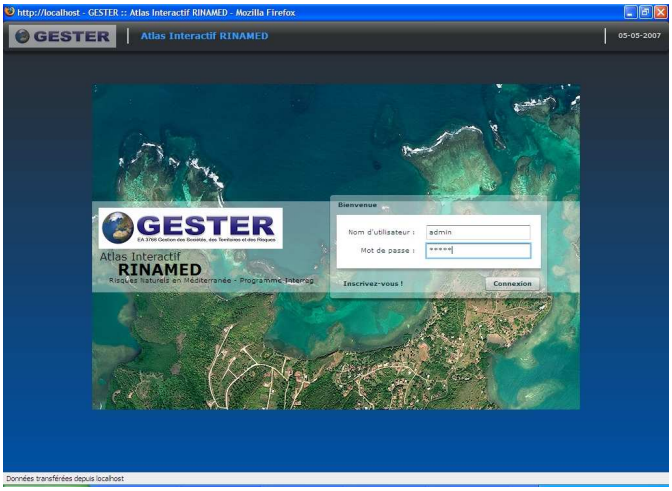
Enjeux démographiques à moins de 5 Km du littoral



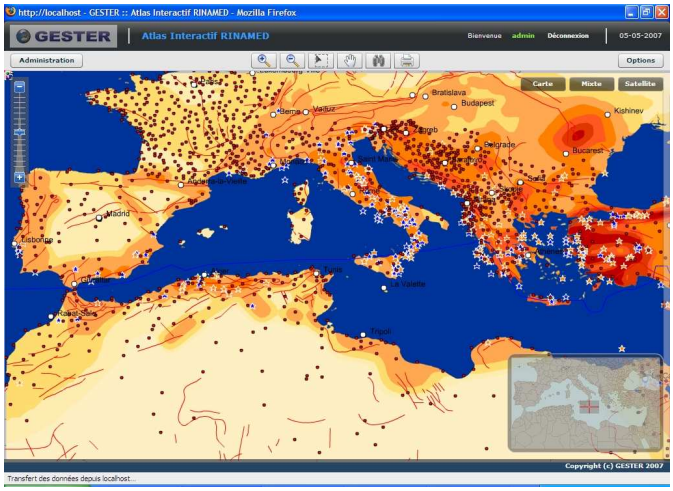
Sources : DCWDS / PSU & LandScan, 2004 / ORNL

ANNEXE 18

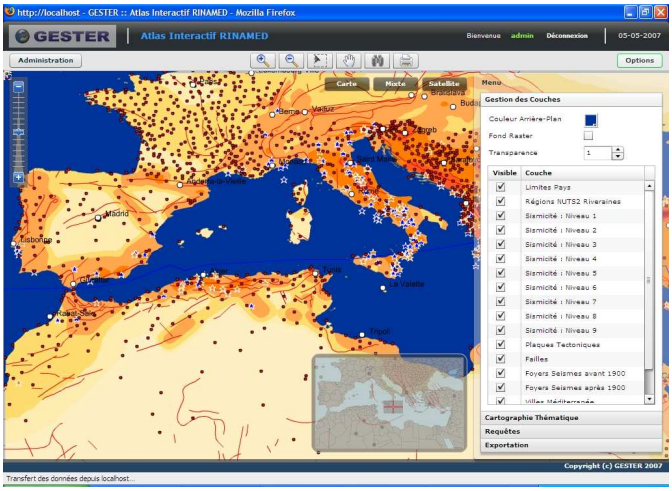
Captures d'écran des principaux menus du futur Atlas en ligne des Risques Naturels en Méditerranée (Atlas RINAMED).



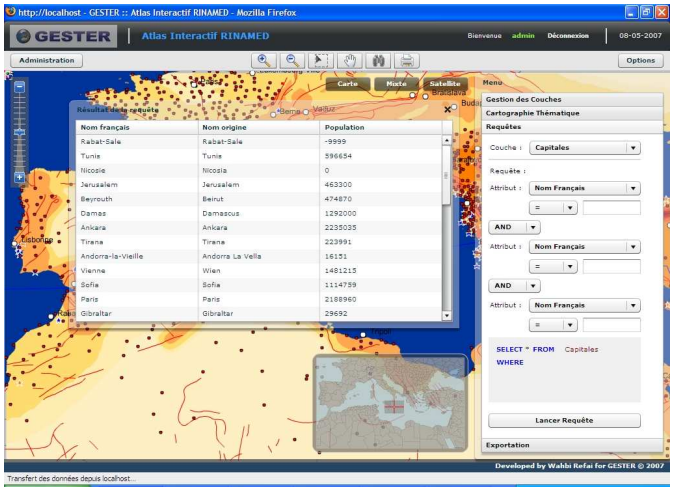
Fenêtre d'identification



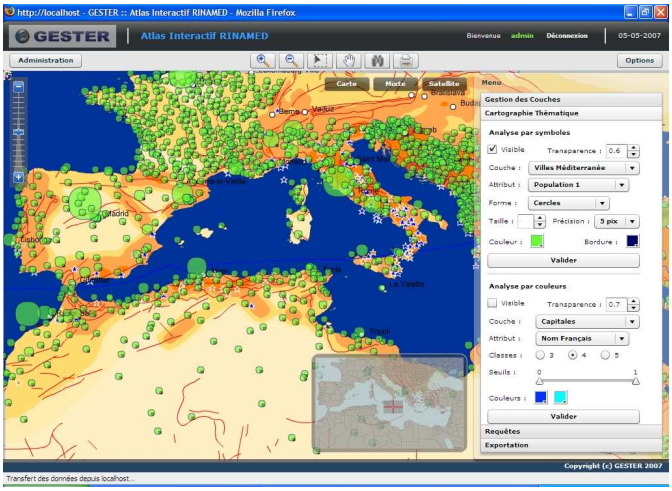
Fenêtre carte



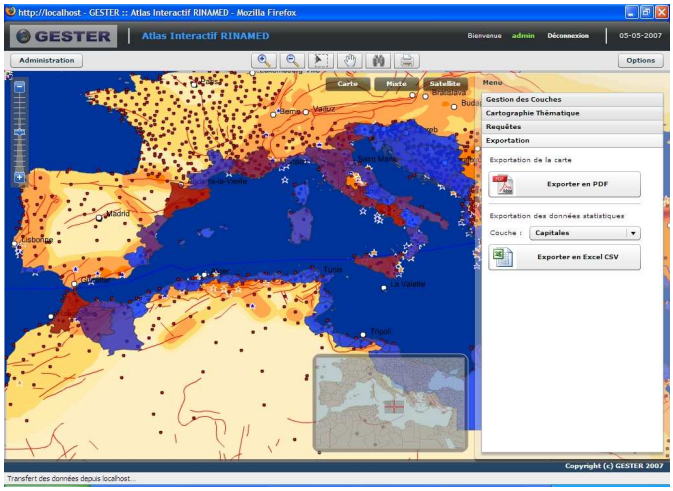
Menu de gestion des couches



Menu de requêtes spatiales



Menu de cartographie statistique



Menu d'exportation des données