



HAL
open science

Aléas naturels et gestion des risques

Frédéric Leone, Nancy Meschinet de Richemond, Vinet Freddy

► **To cite this version:**

Frédéric Leone, Nancy Meschinet de Richemond, Vinet Freddy. Aléas naturels et gestion des risques. Presses Universitaires de France, 288 p., 2021, 978-2-13-057432-3. hal-03279213

HAL Id: hal-03279213

<https://hal.science/hal-03279213>

Submitted on 6 Jul 2021

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.

GÉOGRAPHIE



Aléas naturels et gestion des risques

Frédéric Leone, Nancy Meschinnet de Richemond
et Freddy Vinet



LICENCE



L I C E N C E

G É O G R A P H I E

Frédéric LEONE
Nancy MESCHINET DE RICHEMOND
Freddy VINET

Aléas naturels et gestion des risques



LICENCE



Frédéric Leone
Nancy Meschinet de Richemond
Freddy Vinet

UMR GRED (UPVM/IRD)
Université Paul Valéry - Site Saint-Charles
Route de Mende
34199 Montpellier cedex 5
04 11 75 71 55
<http://www.gred.ird.fr>

Aléas naturels et gestion des risques



L I C E N C E

G É O G R A P H I E



Presses
Universitaires
de France



Droit
Économie
Géographie
Histoire
Langues
Lettres
Philo
Psycho
Socio

Les ouvrages de la collection « Licence » disposent
tous de compléments
(documents d'approfondissement des connais-
sances, annexes, cartes, tableaux et exercices...)
consultables en accès libre sur le site des PUF :
www.licence.puf.com

ISBN : 978-2-13-057432-3

Dépôt légal - 1^{re} édition 2010, juin
© Presses Universitaires de France, 2010
6, avenue Reille, 75014 Paris

SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE	11
 PREMIÈRE PARTIE - Une problématique géographique récente	
I. L'émergence de la géographie des risques	17
① Une définition générale consensuelle	17
a – Le risque et la catastrophe	18
b – L'évolution de la notion de risque « naturel » ..	19
c – Les risques : expression de la complexité	20
d – Des sociétés de plus en plus sensibles aux risques	20
② Risques naturels et territoires	21
a – Le rapport à l'espace et aux territoires	21
b – La prise en compte des temps longs : une gestion « durable » des risques	22
c – Concepts et grille d'analyse	23
 II. Les composantes du risque	25
① Les aléas naturels et leur caractérisation	25
a – Des phénomènes aléatoires	25
b – La notion de magnitude	26
c – L'intensité des dommages	27
d – L'extension spatiale et les effets induits	28
e – La durée d'action des aléas	30

f – La notion de probabilité d'occurrence	30
② Les enjeux exposés et leurs vulnérabilités	31
III. Du risque à la catastrophe	35
① Ambiguïté de la notion de catastrophe	35
② La catastrophe comme endommagement	37
③ Bilan des catastrophes dans le monde	38
a – Sources et bases de données	38
b – Bilan humain à l'échelle mondiale	43
c – Des conséquences économiques croissantes ..	45
④ Crise et retours d'expérience	46
a – Les temps de la crise	46
b – Les retours d'expérience (REX)	48
IV. L'évaluation des risques	51
① Une démarche en plusieurs étapes	51
a – La détermination du bassin de risque	52
b – Le recueil de l'information historique sur les phénomènes	52
c – Des aléas (phénomènes) à l'aléa de référence .	53
d – L'identification et la hiérarchisation des enjeux	59
② Les diagnostics de vulnérabilité	60
a – L'approche sociogéographique de la vulnérabilité	60
b – L'approche technique de la vulnérabilité	62
③ La mesure du risque	64
④ La mise en carte des risques	65
Conclusion	71

DEUXIÈME PARTIE - Les aléas d'origine géodynamique

I. Éléments et méthodes de classification des aléas naturels	75
① Classification génétique	75
② Classification spatio-temporelle	78
II. Les éruptions volcaniques	81
① L'activité volcanique mondiale	81
② Les différents types de dynamismes éruptifs	85
③ Les aléas volcaniques	87
a – Les intrusions et coulées de lave	88
b – Les retombées aériennes	88
c – Les gaz et pluies acides	89
d – Les coulées et déferlantes pyroclastiques	90
e – Les lahars	91
f – Les mouvements de terrain	92
g – Les tsunamis	93
h – Les séismes volcaniques	93
III. Les séismes et tsunamis	95
① L'activité sismique	95
② Caractéristiques des séismes	97
③ Les phénomènes induits par les séismes	99
a – Les effets de site géologique et topographique	100
b – Les effets liés aux failles actives	101
c – La liquéfaction des sols	101
d – Les mouvements de terrain	102
e – Les tsunamis	102
IV. Les mouvements de terrain	105
① Typologie et facteurs d'apparition	105
② Les mouvements à évolution lente et continue	109

a – Les tassements de sols argileux par retrait-gonflement	109
b – Les tassements par compression	110
c – Les affaissements	110
d – Les glissements de terrain	111
③ Les mouvements à évolution rapide et discontinue	112
a – Les effondrements	112
b – Les chutes de blocs et les écroulements	113
c – Les coulées de débris et de boue	114
④ Les phénomènes induits par les mouvements de terrain	116
a – L'obstruction d'un cours d'eau	116
b – La pénétration d'une masse de terrain dans un plan d'eau	117
 Conclusion	 119

TROISIÈME PARTIE - Les aléas d'origine hydroclimatique

I. Les aléas climatiques directs	123
① Les aléas liés au vent : cyclones, tempêtes et tornades	123
a – Les cyclones tropicaux	123
b – Les tempêtes	129
c – Tornades et trombes	132
② La grêle et les chutes de neige	134
③ Les excès thermiques	135
a – Le gel et les vagues de froid	135
b – Les canicules	137
④ La sécheresse	140

II. Les aléas climatiques indirects	143
❶ Les avalanches	143
a – Caractéristiques de l'aléa	143
b – Typologie et répartition	146
c – Bilan humain des avalanches	148
❷ Les inondations	152
a – Les inondations d'origine non climatique	153
• Les inondations naturelles non climatiques .	153
• Les inondations dues à des ruptures d'ouvrage	154
b – Les inondations d'origine pluviale	155
• Méthodes et sources pour la caractérisation de l'aléa « inondation »	157
• Les facteurs déterminant les crues	160
• La complexité des scénarios pluvio-hydrologiques	161
c – Typologies des inondations d'origine climatique	162
• Les inondations lentes	163
• Les inondations par remontée de nappe ...	164
• Les inondations de type torrentiel	164
• Les inondations en zone urbaine	165
• Les submersions marines	166
❸ Les feux de forêts	167
a – Les caractéristiques de l'aléa	167
b – Répartition géographique	171
c – Bilans économiques et humains	172
 Conclusion : risques d'origine climatique et réchauffement de l'atmosphère	 175

QUATRIÈME PARTIE - Les vulnérabilités au cœur des risques naturels

I. Contrastes géographiques	181
❶ Risques du Nord, risques du Sud	181
a – Les enseignements des bilans mondiaux	181
• Des pertes humaines majoritaires dans les Suds	181
• Des bilans économiques à relativiser	183
• Quelques variables explicatives des contrastes	185
b – Des pays en développement plus propices aux catastrophes naturelles	188
c – Des facteurs quotidiens de vulnérabilité exacerbés dans les pays du Sud	189
❷ Des enjeux et des vulnérabilités accrus dans un monde de plus en plus urbanisé	193
a – La ville : lieu de danger ou de sécurité ?	194
b – Villes, métropoles et mégapoles : des vulnérabilités spécifiques	198
II. Risques et histoire : le poids des héritages	203
❶ L'utilité des archives pour définir le risque	204
❷ Histoire et vulnérabilités	209
a – La vulnérabilité passée vue d'aujourd'hui	210
b – Des vulnérabilités changeantes	213
c – Des stratégies empiriques de réduction de la vulnérabilité	215
❸ L'importance des représentations dans la gestion des risques	219
Conclusion	227

CINQUIÈME PARTIE - La gestion des risques naturels

I. Approches et outils de la gestion des risques	231
① Objectifs et principes	231
a – Gestion des risques et gestion des crises	231
b – Les objectifs de la gestion des risques : la prise en compte du contexte	232
c – Les leviers de la prévention : politiques publiques et initiative individuelle ..	235
② Le contrôle des aléas : principe et limites des mesures structurelles	237
a – La protection contre les inondations : le cas des digues	241
b – Les limites de l'endiguement	242
• Les limites techniques	242
• Les implications territoriales des protections : le cercle vicieux urbanisation/protection ...	242
• Des alternatives aux protections structurelles	244
• Conclusion sur la maîtrise de l'aléa	246
③ La réduction des enjeux	247
a – La réduction des enjeux futurs par la maîtrise de l'occupation du sol	247
b – La réduction des enjeux existants par les délocalisations	251
④ La réduction de la vulnérabilité	252
a – La réduction de la vulnérabilité structurelle ...	253
b – La réduction de la vulnérabilité des sociétés et des personnes	254
• Réduire la vulnérabilité globale des sociétés	254
• La conscience et la connaissance du risque .	254
⑤ Prévision, alerte et gestion de crise	255
a – Veille, vigilance, prévision et alerte	256
b – La crise et sa gestion	261
c – La gestion de crise au niveau institutionnel ...	261

d – La gestion de crise au niveau local : l'exemple du plan communal de sauvegarde	264
e – La post-crise	265
⑤ Réparation et reconstruction	266
a – Aide et assurance	266
b – La reconstruction	267
II. Gouvernance des risques et aménagement des territoires	269
① Les acteurs de la gestion des risques	270
② Jeux d'acteurs et conflits	274
a – Des jeux d'acteurs complexes	274
b – Des conflits nombreux	275
③ La difficile prise en compte des risques dans l'aménagement des territoires	281
 Conclusion : la diversité des approches de la gestion des risques	 285

CONCLUSION GÉNÉRALE	287
--------------------------------------	------------

**BIBLIOGRAPHIE ET WEBOGRAPHIE
à consulter sur www.licence.puf.com**

**LISTE DES ABRÉVIATIONS
à consulter sur www.licence.puf.com**

**LISTE DES FIGURES
à consulter sur www.licence.puf.com**

**LISTE DES TABLEAUX
à consulter sur www.licence.puf.com**

**LISTE DES ENCADRÉS
à consulter sur www.licence.puf.com**



INTRODUCTION GÉNÉRALE

La question des risques naturels est abordée de plus en plus par les géographes depuis les années 1980. Elle a fait l'objet d'une question aux concours de recrutement des enseignants du secondaire en 2003 et d'une intégration dans les programmes scolaires, de seconde notamment. D'abord marquées par l'importance des études portant sur les aléas, les recherches se sont diversifiées ces dernières années, notamment dans le domaine des vulnérabilités, des jeux d'acteurs et des modes de gestion. Ce volume s'insère donc dans un corpus bibliographique déjà abondant et largement accessible, et dresse sur un thème en renouvellement rapide un tableau d'ensemble mais nullement exhaustif.

Cet ouvrage, qui s'adresse en priorité aux étudiants de premier cycle universitaire, tente de renouveler l'approche du thème des catastrophes et des risques naturels en dépassant le catalogue par type de risque (séismes, inondations, tempêtes...) ou par type d'espace (montagnes, littoraux, villes, pays riches, pays en développement...) au profit d'une approche synthétique et dynamique, d'une réflexion sur les évolutions contemporaines de ce thème en géographie. L'objectif des auteurs est d'apporter au lecteur, en plus de l'acquisition de connaissances indispensables, une approche critique du thème pour mieux aborder ensuite la lecture d'articles scientifiques spécialisés. Dans ce but, une large place est accordée aux vulnérabilités (souvent moins traitées dans les manuels que les aléas), aux sources et bases de données sur les catastrophes (de plus en plus accessibles gratuitement sur Internet), aux modes de gestion et aux jeux d'acteurs, le tout largement illustré par des graphiques, des cartes et tableaux de synthèse. Un certain nombre de réflexions émergentes dans le domaine des risques sont analysées, comme les forces et fai-

bles des modes de gestion des risques, les stratégies des différents acteurs, les représentations et le poids des héritages du passé dans la compréhension et la gestion contemporaine des risques.

Ce manuel s'organise en cinq parties et commence par une mise au point sur les notions clé indispensables à la compréhension de la géographie des catastrophes et des risques naturels (aléa, enjeu, vulnérabilité, catastrophe, risque, risque majeur, crise). Au croisement entre aléas et vulnérabilités, comment se définit et évolue la géographie actuelle des risques naturels ? La question du rapport au territoire et au temps est également posée afin de préciser comment le thème des risques est devenu ces dernières années un thème majeur de la géographie contemporaine. Les méthodes d'évaluation et de mesure des risques ainsi que les représentations cartographiques sont abordées en fin de première partie car elles sont au cœur d'innovations récentes dans l'étude des risques naturels et mobilisent largement les compétences des géographes.

Le risque en un lieu donné dépend de la combinaison d'aléas et de vulnérabilités, dans un contexte sociétal particulier. Quels sont les grands aléas naturels qui menacent les hommes à la surface du globe ? Quels sont leurs causes, leurs processus, les phénomènes induits ? Les aléas sont abordés de manière analytique dans la deuxième et la troisième partie. Face aux renouvellements disciplinaires récents, le choix d'analyser les aléas avant les vulnérabilités peut être contesté. Mais il apparaît pertinent d'un point de vue épistémologique, pour permettre à un large public de se familiariser avec une dimension du risque qui a longtemps constitué l'approche dominante, pour ne pas dire exclusive, du thème. Après la présentation de plusieurs méthodes de classification des aléas naturels (génétique et spatio-temporelle), la deuxième partie aborde l'étude des aléas d'origine géodynamique et morphodynamique (éruptions volcaniques, séismes et tsunamis, mouvements de terrain...) tandis que les aléas d'origine hydroclimatique font l'objet de la troisième partie (cyclone, tempête, grêle ou canicule, avalanches, inondations, feux de forêt...). Certains aléas ne font pas l'objet

d'un développement spécifique mais sont abordés à travers d'autres thèmes comme les évolutions des vulnérabilités au cours de l'histoire, la caractérisation, l'évaluation ou la gestion des risques. Les risques sanitaires, l'aléa « impact de météorite » ne sont ainsi pas explicitement traités bien qu'ils constituent des axes importants en matière de recherche. Le choix des risques retenus tient compte du poids des facteurs « naturels » dans leur caractérisation, de leur probabilité d'occurrence, de l'apport éventuel des disciplines géographiques dans leur étude.

Les sociétés humaines aggravent-elles les conséquences des phénomènes naturels ? Quelles sont les vulnérabilités – multiples et en constante évolution – qui interagissent avec les aléas pour produire le risque et expliquer l'ampleur variable des catastrophes à travers le monde ? Les territoires sont-ils un simple support à la manifestation des risques naturels ou participent-ils eux-mêmes à la définition du risque ? La quatrième partie, plus synthétique, montre combien la géographie des risques, à l'échelle mondiale, régionale ou locale, s'explique notamment par des différences de vulnérabilités (niveau de développement, d'urbanisation...). Ces vulnérabilités sont complexes à appréhender car elles dépendent aussi des différences de perception (sinistrés, élus, ingénieurs, assureurs, services d'urgence), de la (non ?) prise en charge passée des catastrophes, de la culture interne des services gestionnaires, sans oublier les transformations rapides des modes de vies dans le cadre de la mondialisation et d'une métropolisation croissante.

Cela permet de montrer le défi que constitue la gestion contemporaine des risques, abordée en cinquième et dernière partie, à travers les méthodes, les outils et les acteurs de la prévention et de la prévision des risques, jusqu'à la gestion de crise. La prise en compte des risques dans l'aménagement des territoires peut se heurter à la complexité administrative des États, aux difficultés de collaborations internationale, comme à l'instrumentalisation de cette gestion des risques en fonction des intérêts de différents acteurs. Dans un souci de clarté et de pédagogie, l'argumentation s'appuie sur de nombreux exemples choisis partout dans le monde, tirés de la bibliographie spécialisée et des travaux et missions de recherche des auteurs.

Cet ouvrage tente de clarifier une géographie des risques naturels, ses concepts, ses composantes, ses méthodes et ses objectifs. Il se présente comme une photographie à un instant T de savoirs et de pratiques maîtrisés par les géographes mais également partagés par d'autres disciplines axant leur travail sur la gestion et l'aménagement des territoires. Il s'inscrit donc aussi dans l'évolution d'une discipline, de ses problématiques de recherche et de son enseignement universitaire. Il s'agit ici de mettre à disposition des étudiants, de plus en plus nombreux dans les formations universitaires sur ces thèmes, un manuel synthétique et actualisé qui prépare aux enseignements spécialisés de niveau Master.

➔ PREMIÈRE PARTIE

Une problématique géographique récente

- ➔ I. L'émergence de la géographie des risques
- ➔ II. Les composantes du risque
- ➔ III. Du risque à la catastrophe
- ➔ IV. L'évaluation des risques

Depuis une trentaine d'années, la question des risques naturels et de leur gestion a pris de plus en plus d'ampleurs en France et dans le monde. La géographie, comme d'autres disciplines (la sociologie et évidemment les sciences de la Terre ou de l'atmosphère), s'est intéressée aux risques naturels et à leur expression tangible : les catastrophes d'origine naturelle. Après quelques tâtonnements, les géographes ont pu définir un certain nombre de concepts associés au paradigme de risque, qu'ils partagent – avec des nuances – avec d'autres sciences. Cette partie introduit les notions de catastrophe, d'aléa, d'enjeu, de vulnérabilité, de risque et de crise, tout en posant les étapes méthodologiques de leur évaluation, voire de leur quantification et de leur spatialisation. Elle contribue à faire le lien entre les risques et les territoires, tout en dévoilant le caractère pluridisciplinaire de l'apprentissage des risques et des catastrophes d'origine naturelle.

→ I. L'émergence de la géographie des risques

① Une définition générale consensuelle

La plupart des disciplines scientifiques s'accordent sur le fait que les risques naturels résultent du croisement entre la probabilité qu'un phénomène naturel destructeur se réalise et les dommages possibles que ce phénomène pourrait entraîner sur des biens ou des personnes dans une zone donnée. Le terme d'**aléa** (*hazard* en anglais) s'est peu à peu imposé comme le terme recouvrant à la fois les phénomènes naturels potentiellement destructeurs (une crue, un séisme...) et l'expression de ce potentiel sous la forme d'une probabilité (l'aléa « crue » dans un endroit donné est caractérisé par une période de retour, une fréquence, une magnitude...). Les **enjeux** sont définis par les biens et les personnes exposées directement ou indirectement aux aléas. Ils se caractérisent par une **vulnérabilité** qui reflète la fragilité des biens, des personnes, des systèmes sociaux, des territoires face aux aléas, et leur éventuelle capacité à se restaurer, s'améliorer après un dommage (résilience). Ainsi une personne âgée et malade est-elle plus vulnérable qu'un jeune adulte en bonne santé. En cas de cyclone ou d'éruption volcanique annoncée, elle pourra moins facilement fuir le danger ou y faire face.

Retenons que le risque est la combinaison de ces trois éléments de définition selon une formule désormais classique :

Risque = aléa × (enjeux × vulnérabilité).

Cette combinaison s'exprime différemment au sein des sociétés en fonction de chaque contexte culturel, social, politique.

a – Le risque et la catastrophe

Il faut bien distinguer le risque de la catastrophe. Le risque est une éventualité, un dommage potentiel lié à l'occurrence d'un événement naturel. 99,99 % du temps, on n'observe dans une région à risque ni crue, ni séisme, ni vague de froid. Le séisme n'est qu'un temps infime (quelques minutes au maximum) dans l'histoire géologique et sociale d'un pays comme le Japon. En revanche, le risque sismique est présent en permanence pour les Japonais ; il fait partie de la vie quotidienne par les normes de construction qu'il impose ou par les modifications de comportement qu'il induit (exercice de prévention...) ou encore à travers son influence sur les croyances (religieuses, philosophiques). Le risque se fait tangible en s'exprimant sous forme de dommages lors de sinistres (pour reprendre le terme des assureurs) ou de catastrophes. Les assureurs disent alors qu'il y a « réalisation du risque ». Il est également nécessaire de distinguer les événements banals fréquents des événements plus rares et plus graves. La médiatisation des catastrophes naturelles a tendance à gommer cette hiérarchie et à faire de tout événement une catastrophe exceptionnelle : le rôle du géographe et de l'historien est de relativiser ces catastrophes en les remettant dans leur contexte historique et spatial (partie 4).

La tempête qui a balayé le sud-ouest de la France le 23 janvier 2009 était comparable dans les vitesses de vents à celles de décembre 1999 mais les dommages ont été moindres : moins de victimes, moins de superficie de forêt détruite... Cette tempête était d'une rare violence dans les régions concernées (Gironde, Landes) mais à l'échelle de la France ou plus encore de l'Europe occidentale, le phénomène est relativement courant. Les tempêtes de 1999 avaient été précédées de celle de février 1990 ou du 15 octobre 1987.

L'effet de loupe des médias est aussi un biais. Il peut grossir des catastrophes et en passer d'autres sous silence. Le tsunami d'Asie du Sud-Est a été fortement médiatisé dans la mesure où il a touché des zones touristiques (Thaïlande) à une période de l'année pauvre en actualité (26 décembre 2004). En revanche,

on a très peu parlé de l'explosion de gaz qui fit le même jour 17 morts à Mulhouse. Il s'agissait du plus lourd bilan dû à une explosion de gaz en France. Nul doute que sans le tsunami intervenu le même jour, cette explosion aurait occupé la une des médias pendant quelques jours et aurait suscité des réactions de compassion ou des mesures préventives nouvelles concernant le remplacement des réseaux d'adduction de gaz vétustes.

b – L'évolution de la notion de risque « naturel »

Si la définition est acceptée par tous les scientifiques et les acteurs de la gestion du risque, des nuances interviennent lorsqu'il s'agit de définir précisément les « causes » des risques. La vision classique qui prévalait jusque dans les années 1980 et qui perdurent encore parfois est une relation de cause à effet entre des phénomènes naturels, qui seraient les causes déterminantes des catastrophes, et les hommes ou les sociétés qui les « subissent ». Dans cette vision, l'aléa est au centre du système explicatif du risque. Dans les années 1980 et 1990, les sciences humaines mettent de plus en plus la vulnérabilité au cœur de leur étude des risques. Les sociétés ne subissent pas les aléas ; elles participent plus ou moins consciemment à la construction des vulnérabilités. S'ils déterminent le déclenchement d'une catastrophe, les événements naturels ne contribuent que très partiellement à l'ampleur des dommages. Ces derniers sont dus, d'une part, à l'importance des biens exposés (personnes, logements, activités économiques situés en zone à risque) et, d'autre part, à la vulnérabilité organisationnelle ou fonctionnelle de ces enjeux. Le système de production du risque dépend autant sinon plus de l'homme que des éléments naturels (Gilbert, 2009). L'homme participe au processus de production du risque soit en s'exposant (volontairement ou non) aux phénomènes naturels, soit en ne prenant pas les mesures de protection ou de prévention nécessaires. Lorsqu'ils s'installent en zone inondable, lorsque des habitations en Algérie ou à Istanbul ne sont pas mises aux normes parasismiques, les promoteurs participent à la préparation des futurs dommages. Aussi, l'expression « risques naturels » est-elle un raccourci plus commode que juste.

c – Les risques : expression de la complexité

Parce que s'entrecroisent des causalités naturelles et sociales, parce que tous les domaines de la société sont concernés, parce qu'un événement naturel banal peut dégénérer en catastrophe, les risques naturels sont l'expression même de la complexité. Aborder la question des risques naturels oblige à considérer la complexité des territoires et des sociétés, de leur évolution, de leur rapport au milieu naturel. Dans le système socionaturel de production du risque, les causes s'additionnent, s'entrecroisent ; les phénomènes s'amplifient ou s'atténuent les uns les autres.

d – Des sociétés de plus en plus sensibles aux risques

Il peut paraître paradoxal que la thématique des risques émerge à une époque où la plupart des besoins fondamentaux des sociétés, au moins dans les pays riches, sont satisfaits. D'ailleurs, la prévention des risques naturels est plutôt une préoccupation de pays riches. Dans les pays pauvres, les préoccupations concernant le développement économique, le logement ou la santé sont prioritaires. Mais la question du développement et celle de la réduction des risques sont étroitement liées. Le développement et l'amélioration des conditions de vie sont la première des conditions de réduction des risques naturels, sanitaires et sociaux.

Nos sociétés supportent de moins en moins la variabilité normale de la nature qui perturbe la vie économique et sociale. Les enjeux ont fortement augmenté : biens exposés, populations, systèmes d'échange de plus en plus complexes et coûteux, et nos sociétés sont de plus en plus vulnérables à travers leurs réseaux : réseaux d'électricité, de télécommunication, réseaux routiers ferroviaires, aériens.

2 Risques naturels et territoires

L'épistémologie s'intéresse aux objets de recherche des différentes disciplines. Qu'étudie-t-on en géographie ou en géologie, en sociologie depuis l'apparition de ces sciences ? Comment un objet d'étude a-t-il été abordé au cours de l'histoire ? Les préoccupations et les méthodes des géographes ont fortement évolué depuis quelques années. Les sciences ne sont pas attachées à leur objet, elles sont – de plus en plus – le reflet du regard de l'homme sur lui-même et son environnement. Ainsi la géographie a-t-elle répondu à une demande sociale sur la relation homme/milieu « naturel »¹ renouvelée par rapport à une ancienne approche plus déterministe et statique (ou perçue comme telle). Le mot « environnement » a remplacé l'expression « milieu naturel ». Mais vue au travers du prisme des risques, la relation homme/milieu naturel ou environnement naturel est soumise à une nouvelle grille de lecture. Ainsi ce n'est pas tant l'objet de recherche qui évolue mais la façon de l'appréhender. Les inondations comme les séismes ont toujours existé, mais le regard porté sur eux évolue tout comme les moyens d'agir. Finalement, la géographie des risques a renouvelé l'épistémologie de la géographie en remettant les relations homme/nature au centre de la discussion.

a – Le rapport à l'espace et aux territoires

Qui dit risque dit zone à risque. Sans spatialisation, pas de conscience des risques et pas d'action possible pour les réduire. Dans l'évaluation des risques, la cartographie est de plus en plus nécessaire et réclamée par les décideurs. Elle se fait à des échelles différentes en fonction des risques. Le risque « tempête » se traite

1. Le caractère discutabile et relatif du terme « naturel » est souvent souligné dans la littérature géographique, mais la commodité d'usage de cette expression la rend incontournable : pour alléger la lecture, le terme n'est plus mis entre guillemets dans la suite de l'ouvrage sans que cela doive être interprété comme la négation ou l'oubli de cette ambiguïté.

à l'échelle de l'Europe alors que les risques de mouvement de terrain peuvent parfois se cartographier au décamètre près. Mais au-delà de sa simple cartographie, le risque s'inscrit dans le territoire à travers un faisceau de contraintes et d'aménités qui sont l'expression même de choix faits par les sociétés.

**b – La prise en compte des temps longs :
une gestion « durable » des risques**

Sous le vocable « durable » ressurgit une règle qui devrait prévaloir depuis longtemps dans la prévention des risques : la prise en compte des temps longs : temps long de l'environnement, temps long des sociétés, et enfin temps long de l'économie. Les recommandations du développement durable enjoignent d'aménager le territoire sans augmenter les risques « pour les générations futures ». Or les choix en matière de prévention se font souvent dans l'urgence mais engagent la protection des biens et des personnes parfois pour un siècle ou plus.

Les milieux naturels évoluent sur trois pas de temps différents (Mercier, 2004, p. 8-11) : la variabilité naturelle est une expression des écarts interannuels ou interjournaliers sur des pas de temps très courts. Une inondation peut succéder à plusieurs mois de sécheresse. Un été particulièrement chaud ne préjuge pas d'un hiver doux. Le deuxième type d'évolution est la cyclicité. Certains cycles sont connus, comme la cyclicité saisonnière, mais d'autres, de moyen et long terme, le sont moins (El Niño). Enfin, à l'échelle du siècle, on observe des évolutions climatiques notables d'origine naturelle (le petit âge glaciaire s'est traduit par une baisse de 1 °C de la température moyenne en Europe occidentale) ou anthropique (le réchauffement actuel). Ces évolutions sur le long terme sont malheureusement souvent peu prises en compte dans l'aménagement des territoires.

L'évolution des relations homme/nature conditionne également la production de risques, à travers les représentations mentales (Paulet, 2002 ; Schoeneich, 2000). La relation de l'homme aux cours d'eau a connu bien des vicissitudes allant de la répulsion à l'attractivité pour des raisons économiques ou récréatives (Languépée, 2003 ; Degardin, 2002). C'est un paramètre de fond

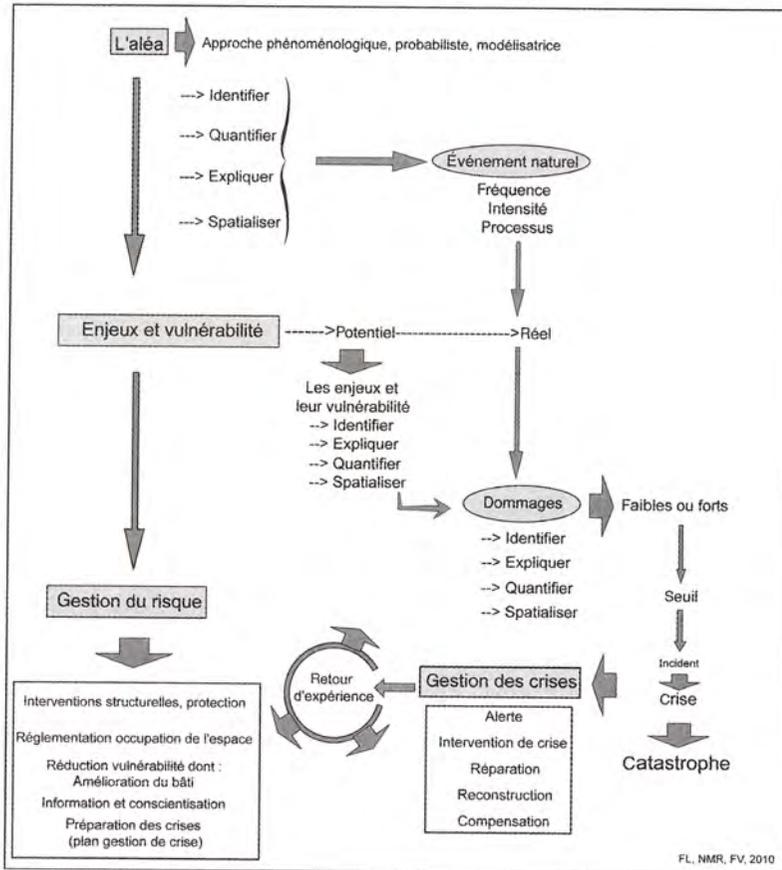
dans la compréhension de l'augmentation des enjeux et la mise en œuvre de protections, notamment à l'échelle locale.

Enfin, les tendances lourdes de l'économie et des modes de vie modifient le risque par la production d'enjeux ou de nouvelles vulnérabilités. Dans quelle mesure le vieillissement de la population, les nouvelles mobilités professionnelles ou les transformations familiales (décohabitation) peuvent-ils accroître la vulnérabilité ? Comment l'évolution des modes de consommation touristique peut-elle faire évoluer le risque en exposant toujours plus de personnes aux inondations méditerranéennes pendant la saison automnale ?

c – Concepts et grille d'analyse

Au terme de cette introduction succincte, nous proposons une grille d'analyse des risques qui reprend les principaux termes de la formule du risque. Il s'agit pour chaque élément du risque d'identifier les processus, de les expliquer, de les spatialiser. La combinaison des facteurs de risques se concrétise dans des catastrophes ou des sinistres qui sont l'expression concrète du risque. Développée dans la suite de cet ouvrage pour les risques naturels, cette grille de lecture peut être appliquée moyennant des adaptations aux risques technologiques ou sanitaires, ou à d'autres nuisances (gêne olfactive, etc.).

Figure 1
Grille d'analyse des risques naturels



→ II. Les composantes du risque

① Les aléas naturels et leur caractérisation

a – Des phénomènes aléatoires

Au sens commun, on définit par aléa naturel (danger, menace) tout phénomène d'origine naturelle potentiellement dommageable. Dans cet ouvrage, notre attention se porte sur les phénomènes à cinétique rapide et aux effets particulièrement catastrophiques en matière de vies humaines, de pertes matérielles et de dysfonctionnements divers. Les principaux aléas connus sur Terre ont une origine soit hydroclimatique (inondations, cyclones), soit morphodynamique (géodynamique externe telle que les glissements de terrain), soit géodynamique interne (aléas géologiques tels que les séismes). On peut également y ajouter pour mémoire ceux d'origine extraterrestre avec les impacts de météorites. Un certain nombre de phénomènes naturels complémentaires sont induits ou associés à ces aléas, comme par exemple les tsunamis consécutifs aux séismes sous-marins ou à certaines éruptions volcaniques, ou bien les effets de submersion marine des littoraux associés eux-mêmes aux tsunamis ou à des aléas d'origine climatique tels que les cyclones. Dans une démarche analytique, il convient donc de décomposer un aléa naturel en autant de sous-aléas ou effets induits ou associés. C'est notamment l'objectif poursuivi dans une démarche de cartographie préventive. Ainsi, la communauté scientifique internationale décompose-t-elle officiellement l'aléa volcanique global en sept sous-aléas qui peuvent être regroupés en deux catégories : aléas directs et indirects (c'est-à-dire directement induits ou non par l'arrivée de magma en surface). De la même manière, mais dans des conditions plus rares, un glissement de terrain qui

survient dans une vallée étroite peut à son tour générer un barrage de retenue en amont qui, en cas de rupture brutale, provoquera une onde de submersion en aval. L'analyse se complique lorsque certains aléas naturels peuvent entrer en interaction avec des infrastructures humaines (barrages, usines classées Seveso¹, centrales et réseaux énergétiques, etc.) génératrices de menaces ou de dysfonctionnements technologiques qui peuvent se propager par effet domino bien au-delà de la zone d'impact du phénomène naturel déclencheur. On parle alors de couplage NaTech (naturel/technologique) pour caractériser ces interactions combinées qu'il convient d'appréhender au moyen de scénarios d'enchaînement adaptés. L'ampleur des effets induits est dans ce cas largement conditionnée par la fragilité des infrastructures touchées et notre capacité à les protéger.

Les multiples aléas (ou multi-aléas) générés par cette grande diversité de phénomènes sont traditionnellement définis par la combinaison d'une magnitude (composante énergétique ou puissance), d'une probabilité d'occurrence (composante temporelle), d'une aire d'impact (composante spatiale) et d'une durée d'action. Pour chacun de ces critères, une démarche analytique d'évaluation des risques associés impose de considérer un potentiel d'endommagement mesuré le plus souvent par une intensité.

b – La notion de magnitude

La notion de magnitude permet d'évaluer la puissance du phénomène au moyen de paramètres physiques généralement indépendants et mesurables. Suivant les échelles utilisées et les phénomènes considérés, il s'agit de paramètres énergétiques (énergie libérée), cinématiques (vitesse, accélération) et parfois géométriques (volumes, hauteurs, amplitude). Le tableau 1 (*Principales échelles de magnitude et d'intensité disponibles dans la littérature scientifique pour caractériser des aléas naturels dommageables*, à consulter sur www.licence.puf.com)

1. Seveso désigne une directive européenne qui impose aux États membres de l'Union européenne d'identifier les sites industriels présentant des risques d'accidents majeurs.

recense 17 échelles de magnitude des phénomènes naturels dommageables décrites dans la littérature et d'usage plus au moins courant. On en dénombre quatre pour les tsunamis et les vents forts, trois pour les séismes, deux pour les mouvements de terrain, une pour la grêle, le volcanisme et les météorites. Elles respectent toutes le principe d'indépendance vis-à-vis des effets des phénomènes concernés et permettent de comparer des événements entre eux sans pour autant préjuger de leurs conséquences qui dépendent d'autres facteurs. Certains phénomènes ne disposent pas d'échelles de magnitude formalisées, mais leurs critères d'évaluation sont couramment admis. On pense par exemple aux inondations dont la magnitude est souvent mesurée par la hauteur de crue, la vitesse des écoulements et la capacité d'infiltration ou d'évacuation des eaux, autrement dit le temps de submersion. Les échelles de magnitude les plus connues du grand public sont certainement celles s'appliquant aux séismes (magnitude de Richter) ou aux tempêtes (échelle de Beaufort). D'autres sont plus confidentielles mais pourtant très utilisées par la communauté scientifique, comme par exemple l'indice d'explosivité volcanique (VEI) qui s'applique aux éruptions volcaniques, ou l'échelle de Turin qui permet de classer les menaces d'impact de météorite. Certaines échelles de magnitude sont hybrides, c'est-à-dire qu'elles sont définies à la fois à partir de critères physiques comme les précédentes, mais également de critères d'intensité des effets constatés ou attendus. C'est le cas des échelles de Fujita (tornades) et de Saffir-Simpson (cyclones) qui sont basées principalement sur la vitesse moyenne du vent mais qui intègrent également des intensités de dommages. En cela, elles se rapprochent des échelles d'intensité pures qui reposent quant à elles sur une description détaillée des conséquences des phénomènes sur les biens, les personnes et l'environnement.

c – L'intensité des dommages

C'est une notion importante qui décrit les effets constatés ou potentiels d'un phénomène sur différentes catégories d'éléments exposés. Le critère le plus souvent utilisé pour construire les échelles d'intensité est le niveau et la description des dommages

sur les bâtiments. On recense au moins 24 échelles de ce type pouvant aller jusqu'à 12 degrés. Ces échelles sont plus ou moins élaborées suivant les distinctions apportées au niveau des classes de bâtiments retenues et les modes d'endommagement associés. Les plus abouties, après des années d'observations sur le terrain, sont sans conteste les échelles d'intensité macrosismique. À titre d'exemple, l'échelle européenne EMS98 (*European Macroseismic Scale*) comporte 12 degrés définis à partir d'une description des dommages croissants pour 6 classes de bâtiments différents. Des échelles équivalentes, mais moins connues ou encore expérimentales, existent aussi pour les tsunamis, les vents forts, les mouvements de terrain ou les éruptions volcaniques.

Après une catastrophe, ces échelles permettent de reconstituer des enveloppes d'iso-dommages (iso-séistes pour un séisme) et de repérer cartographiquement l'épicentre de la catastrophe (zone de plus forte intensité des dommages).

D'un point de vue théorique, la capacité à prévoir ces intensités renvoie à la compréhension des différents mécanismes de destruction associés aux phénomènes considérés. 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 écoulement rocheux qu'à une coulée de débris chargée de gros blocs et aux retombées balistiques d'une éruption volcanique). Si l'on considère les effets mécaniques, hydrauliques, chimiques, thermiques, électriques et magnétiques, on constate que ce sont les mouvements de terrain et les éruptions volcaniques qui se distinguent par la plus grande diversité de mécanismes d'endommagement. Les inondations, les tsunamis et les séismes présentent quant à eux des mécanismes d'action relativement plus simples à décrire et donc à modéliser.

d – L'extension spatiale et les effets induits

La composante spatiale de l'aléa correspond à l'extension des effets associés au phénomène. La figure 10 (p. 78) permet de distinguer les principaux aléas naturels en fonction de leur exten-

sion spatiale maximale connue et de leur durée d'action moyenne. Ces effets peuvent être cantonnés à un lit majeur pour une inondation, ou bien s'étendre bien au-delà de la zone d'action du phénomène principal par le biais des différentes dynamiques de déplacements et d'effets en chaînes. Par exemple, l'arrivée en mer d'un écroulement rocheux peut être précédée d'un effet de souffle et suivi d'un tsunami, ce qui accroît considérablement la zone des dommages. Les pires catastrophes connues en termes de superficies touchées ont été déclenchées par des éruptions volcaniques relayées par des tsunamis ou des émissions massives de gaz et de cendres dans la troposphère. Ce fut le cas avec l'explosion du volcan Krakatoa en 1883 dans le détroit de la Sonde (Indonésie), suivie d'un tsunami, ou bien des retombées de cendres et aérosols à des milliers de kilomètres du volcan émetteur lors d'éruptions pliniennes majeures (Tambora en 1815 en Indonésie). L'exemple le plus fameux est celui de la péjoration climatique induite en Grande-Bretagne et en Europe par l'éruption du volcan Laki en 1783 en Islande.

Cet enchaînement des processus induits, néfastes à grande distance, se produit également pour des mouvements de versant qui peuvent affecter de vastes surfaces. Ce fut le cas en Équateur en 1993 avec la catastrophe de la Josefina initialement provoquée par un glissement de terrain de 28 millions de m³ qui obstrua le cours du Rio Paute. Le vaste lac d'inondation de 800 hectares créé en amont a été suivi un mois plus tard par une vidange brutale dont les effets se firent sentir jusqu'à 160 km en aval sur les piémonts amazoniens.

Enfin, le couplage de phénomènes géodynamiques (endogènes) et morphodynamiques (exogènes) engendre parfois des catastrophes sans précédent. En 1970 par exemple, un séisme localisé au large du Pérou a déclenché un écroulement de glacier et de paroi rocheuse du mont Nevado Huascarán (Cordillère Blanche) dans un lac. Cela a provoqué instantanément une coulée de boue et de débris très rapide, qui s'est propagée sur près de 16 km pour ensevelir la ville de Yungay (25 000 morts). Aussi, devant une telle diversité de mécanismes induits, tout le défi d'une cartographie préventive des aléas naturels sera d'arriver à

délimiter leurs aires d'extension potentielles et d'évaluer les scénarios d'aléas possibles.

e – La durée d'action des aléas

La durée de manifestation des aléas est un critère important de leur évaluation dont dépend souvent l'intensité des dommages induits. Au même titre que l'extension spatiale, on peut en faire un critère de classification (figure 10) : les plus brefs et qui exercent le plus d'effets de surprise sont la foudre, les impacts de météorites, les séismes et certains mouvements gravitaires (avalanches, certains mouvements de terrain). C'est donc une caractéristique qui contraint considérablement les capacités d'alerte et de mise en sécurité des personnes, d'autant plus en l'absence de signes précurseurs ou annonciateurs. À titre d'exemple, l'un des séismes historiques les plus longs s'est produit en Guadeloupe en 1843. La secousse principale (magnitude 8) a duré 104 secondes et provoqué 3 000 morts. Par ailleurs, et pour prendre un exemple plus récent, le tsunami du 26 décembre 2004 a atteint les plus proches côtes de Sumatra en 25 minutes, mais ses effets directs à terre se sont manifestés durant près de deux heures sur la ville de Banda Aceh (70 000 morts), le temps que le reflux marin se produise. Cette durée prolongée d'immersion des côtes a considérablement réduit les chances de survie des populations.

f – La notion de probabilité d'occurrence

On peut estimer la probabilité de retour d'un événement naturel de référence (par exemple un séisme d'une certaine magnitude) si l'on dispose d'une série statistique suffisamment longue sur l'activité passée. Ceci impose d'entretenir des bases de données sur de longues périodes d'observation. Leur constitution est actuellement facilitée par l'instrumentation automatique mais ne doit pas pour autant négliger le dépouillement des archives et le recueil de toute forme de témoignage. Ainsi, l'analyse historique permet de déterminer une fréquence historique d'occurrence (récurrence) et de classer par exemple les crues par débit théorique (dit de retour décennal, centennal, etc.) pour

dimensionner en conséquence les ouvrages de protection. On peut assigner une probabilité élevée, moyenne ou faible à un événement de magnitude donnée et caractérisé par une certaine période de retour. Par exemple, un cyclone de classe IV de période de retour moyenne historique de 30 ans aura une probabilité d'occurrence de 0,33 (33 %) sur 10 ans et de 0,03 sur une année (3 %). Il s'agit donc de la composante temporelle de l'aléa. Elle est essentielle dans le cadre d'une démarche quantitative et prévisionnelle. Suivant les applications recherchées, la définition de l'aléa peut parfois même se limiter à cette seule dimension probabiliste. L'aléa est dans ce cas défini comme la probabilité d'occurrence d'un phénomène, par exemple celle de voir une crue de fréquence donnée atteinte ou dépassée au moins une fois sur une période donnée.

Précisons que la crue décennale peut ne pas se produire au cours d'un demi-siècle et, au contraire, la crue centennale se produire deux fois dans la même année. Enfin, il est nécessaire de réactualiser régulièrement les calculs statistiques par le simple fait que les échantillons de données pluviométriques et hydrométriques se complètent au fil des années mais également du fait des oscillations climatiques séculaires (chapitre I).

Pour certains phénomènes, cette probabilité d'occurrence peut être évaluée sans approche probabiliste en utilisant des analyses multicritères basées sur des combinaisons de facteurs propices au déclenchement de l'aléa considéré. On pense en particulier à l'aléa « glissement de terrain », dont la probabilité d'apparition est synthétisée au moyen de cartes de susceptibilité (faible à forte) obtenues par combinaison de facteurs comme la pente, la lithologie, le type d'occupation du sol, la saturation en eau, la fréquence des pluies, etc.

2 Les enjeux exposés et leurs vulnérabilités

L'existence d'un risque sous-entend la conjonction spatiale et temporelle d'aléa(s) et d'éléments exposés. Ces éléments exposés, assortis d'une certaine valeur (marchande ou économique, environnementale, stratégique, fonctionnelle, affective,

etc.), se caractérisent par différentes formes de vulnérabilités qui les rendent plus ou moins sensibles à l'endommagement ou au dysfonctionnement : ils deviennent des enjeux. Ils peuvent être des biens, des infrastructures, des personnes, des fonctions ou des activités. Leur valeur, au regard de certains usages ou fonctions vitales, permet de les hiérarchiser. Les indicateurs de valeurs sont variables : un prix de vente pour un bien, un nombre de personnes desservies pour un réseau, une capacité d'accueil pour un bâtiment recevant du public, etc. Au titre de l'importance de la valeur humaine dans nos sociétés, la sauvegarde des vies humaines devient généralement le premier objectif des stratégies de prévention des risques, qu'elles passent par des mesures réglementaires ou techniques. La notion de vulnérabilité, introduite plus récemment dans les analyses de risque est désormais une entrée essentielle de leur évaluation. Nombreuses sont les définitions de la vulnérabilité (Becerra et Peltier, 2009). Elles sont influencées par les différentes écoles de pensées et les différentes disciplines impliquées dans son évaluation (sociologie, ingénierie, géologie, climatologie, économie, géographie). Les définitions courantes 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). La définition la plus appropriée aux analyses de risques 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 » (Leone et Vinet, 2006).

Techniquement, la vulnérabilité se mesure par un taux d'endommagement ou de dysfonctionnement potentiel ou déclaré d'un élément exposé ou d'un ensemble d'éléments (un individu ou un système urbain par exemple). Ce taux est un indicateur de vulnérabilité. Il est souvent exprimé entre 0 et 100 % et entre dans les évaluations quantitatives du risque, selon l'expression : $\text{Risque} = \text{aléa} \times \text{enjeux} \times \text{vulnérabilité}$. Cette équation est adaptée aux calculs d'indice de risque pour lesquels l'aléa est généralement exprimé par une probabilité d'occurrence (entre 0 et 100 %) et les enjeux par une valeur économique associée.

Dans une approche sociale définie par les Nations unies, la vulnérabilité renvoie à une prédisposition des populations à être affectées par un événement préjudiciable externe, ou une incapacité de leur part à faire face aux désastres qui pourraient survenir. La notion d'exposition renvoie à la valeur des pertes potentielles. La capacité de réaction prend en compte les ressources que les populations peuvent mobiliser et les stratégies qu'elles peuvent mettre en œuvre pour limiter ces pertes potentielles. La réduction de la vulnérabilité devient alors optimale lorsque les populations sont capables de compenser totalement les dommages. On parle alors de résilience pour définir cette capacité à surmonter l'événement, voire à améliorer sa capacité de réaction en vue de la prochaine occurrence. Bien entendu, ces notions de résilience et de vulnérabilité dépendent du temps nécessaire aux populations pour revenir à une situation normale. La vulnérabilité est donc un état permanent (qui ne disparaît pas entre deux phénomènes) et dynamique (en constante évolution) (Sirven, 2007).

Les approches analytiques déclinent la vulnérabilité par nature d'enjeux exposés (ou éléments vulnérables). Cette typologie répond directement au besoin de recherche des facteurs et causes de vulnérabilité. Ainsi on peut distinguer différentes formes de vulnérabilités suivant la nature des éléments exposés :

- physique ou structurelle, pour les infrastructures (bâti, réseaux physiques, ouvrages d'arts, etc.) ;
- humaine (morts, blessés, effets sur la santé, conséquences psychologiques) ;
- sociale pour les populations (approches sociale ou psychosociale) ;
- organisationnelle ou institutionnelle, pour les actions menées par des organismes privés ou publics ;
- environnementale, pour les composantes du milieu naturel (végétation, ressources en eau, pollutions, etc.) ;
- fonctionnelle, pour les fonctions et activités (économiques notamment) supportées par les éléments précédents.

La vulnérabilité d'un système territorial (une ville par exemple) ou social (une communauté) dépend de la combinaison des différentes formes de vulnérabilité précédentes. Il apparaît donc 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 (techniques, sociaux, géographiques, économiques, institutionnels, politico-administratifs, environnementaux, psychosociaux, culturels, historiques, etc.). Ces multiples facteurs peuvent être appréhendés au moyen de divers critères (voir tableau 2 – *Exemples de facteurs et critères de vulnérabilité pour différents types d'enjeux en vue d'un diagnostic* sur www.licence.puf.com). L'identification de ces facteurs et critères est une étape essentielle du diagnostic de vulnérabilité.

Pour certains experts, les causes de vulnérabilité face aux événements naturels tiennent davantage aux contraintes quotidiennes qui entourent les victimes qu'à une dimension « extraordinaire » des aléas naturels (Wisner *et al.*, 2004 ; Gaillard, 2007). Ainsi, l'origine de la catastrophe qui a frappé la Louisiane à la fin du mois d'août 2004 relève en partie de la marginalisation territoriale, politique, sociale et économique quotidienne dont font l'objet les habitants de cette région, et non du caractère exceptionnel de l'ouragan Katrina. Dans cette logique d'une approche dite « radicale », les catastrophes ne constitueraient que le prolongement de situations d'urgence quotidienne pour les victimes. Or, de manière paradoxale, la vision dominante en matière de gestion des risques et des catastrophes persiste à mettre l'accent sur le caractère exceptionnel de l'aléa et non sur le quotidien d'une vulnérabilité ancrée dans des contraintes structurelles sous-jacentes et profondes (partie 4.I.)

→ III. Du risque à la catastrophe

① Ambiguïté de la notion de catastrophe

La catastrophe est la manifestation du risque, la réalisation concrète dans le temps et l'espace d'un aléa, potentiel par définition. Les modalités de cette réalisation dépendent aussi bien de l'aléa que de la vulnérabilité globale d'une société.

Le terme de catastrophe désigne communément un événement rare et brutal dont les effets induits sont particulièrement graves : éruption volcanique, inondation, cyclone. Cette définition met l'accent sur l'ampleur de l'événement. C'est une approche factuelle, quantitative et relative, même si la prise en compte de la dimension sociale ou psychologique permet d'affiner l'analyse. Une première ambiguïté apparaît car la rareté d'un événement dépend de la période de référence retenue, de l'espace étudié et du locuteur. Le temps de retour d'une pluie de 400 mm en 24 heures dans le sud de la France est de 180 ans à l'échelle du département du Gard mais de 11 ans à l'échelle de la région Languedoc-Roussillon (données 1940-1989, Davy *in* Becat et Soutadé, 1993, p. 317-318). On parlera de catastrophe, par opposition à accident, à partir d'un certain seuil au-delà duquel les capacités de réaction (techniques, culturelles, économiques, organisationnelles...) d'une société sont dépassées. En ce sens, catastrophe est synonyme de crise. Les Nations unies ont fixé un seuil de 30 morts pour utiliser le terme de catastrophe. La catastrophe est relative également en fonction de la nature de l'observateur et de ses intérêts. À ce titre, certaines catastrophes peuvent à plus long terme devenir une manne financière pour certains secteurs d'activités (la construction par exemple) et même offrir de nouvelles opportunités de développement si leurs enseignements sont bien pris en compte. En

cela, les catastrophes sont bien des constructions psychosociales dont la cause « naturelle » est souvent à rechercher bien loin des effets constatés. La grande diversité d'événements pouvant être qualifiés de catastrophiques a donc conduit à distinguer accidents, catastrophes et catastrophes majeures.

Tableau 3
Échelle de gravité des dommages en France

Classe	Dommages humains	Dommages matériels
0. Incident	Aucun blessé	Moins de 0,3 millions d'euros
1. Accident	1 ou plusieurs blessés	Entre 0,3 et 3 millions d'euros
2. Accident grave	1 à 9 morts	Entre 3 et 30 millions d'euros
3. Accident très grave	10 à 99 morts	Entre 30 et 300 millions d'euros
4. Catastrophe	100 à 999 morts	Entre 300 millions et 3 milliards d'euros
5. Catastrophe majeure	1000 morts ou plus	Plus de 3 milliards d'euros

Source : d'après Mission d'inspection spécialisée de l'environnement, 1999 et MEDD/DPPR, 2005.

Une autre ambiguïté majeure, dont dépend l'extension spatiale des phénomènes, tient au type d'événement qualifié de catastrophique. S'agit-il de faits ponctuels ou chroniques ? (partie 4.11) Les protocoles d'étude des catastrophes sous-entendent souvent qu'il s'agit de faits brutaux (séisme) ou dont les bornes chronologiques sont nettement définies (l'épidémie de grippe espagnole de 1918-1919), exceptionnels par leur rareté, leur extension spatiale, l'ampleur des dégâts. Même en tenant compte de marges d'erreur importantes, les bilans humains des catastrophes naturelles ponctuelles semblent bien trois à quatre fois inférieurs aux pertes induites par des phénomènes de longue durée comme les sécheresses ou les famines (Péguy, 1989, p. 158). Un autre sens est celui de la catastrophe considérée comme une rupture, par le passage d'un équilibre à un autre au

sein d'un système naturel ou artificiel. Cette approche ne tient pas compte de l'ampleur de l'événement mais de sa nature.

Mais quelle que soit la définition que l'on privilégie, la catastrophe révèle le risque et permet souvent de le définir après coup, grâce à l'étude des dommages.

2 La catastrophe comme endommagement

L'une des approches les plus anciennes de la vulnérabilité consiste à évaluer un endommagement potentiel pour les enjeux vulnérables. Pour cela, il convient d'abord de recenser précisément les enjeux exposés, fixes ou mobiles, présents sur le territoire (personnes, bâti, voitures, trains, infrastructures telles que routes, aéroports, réseaux d'assainissement...). La vulnérabilité de ces enjeux se définit en fonction de leurs propriétés matérielles (résistance du bâti aux secousses sismiques), de leur usage (fréquentation horaire pour un magasin ou une salle de spectacle) mais aussi en tenant compte de ce dont ils ont besoin pour remplir leur rôle (personnel nécessaire, maintenance, alimentation en énergie...). C'est souvent la valeur marchande de ces enjeux qui sert de base au calcul de l'endommagement global. Pour cela, on se base sur une estimation financière des biens (approche analytique) mais aussi sur l'évaluation des pertes potentielles (chômage technique, coût d'une réorganisation des services, d'un allongement des délais de livraison...), ou encore sur une approche fonctionnelle. Ainsi, pour des enjeux dont la valeur intrinsèque n'est pas chiffrable (vie humaine, patrimoine symbolique ou immatériel tel que l'animation d'un quartier), l'approche fonctionnelle permet d'envisager les conséquences économiques de leur disparition ou de leur dysfonctionnement, les impacts en termes d'image de marque, de notoriété. Cette évaluation de l'endommagement est complexe et nécessite l'établissement de fonctions d'endommagement (humain, structurel ou fonctionnel) qui présentent le lien existant entre l'enjeu et le phénomène destructeur sous la forme de grilles empiriques, élaborées et affinées en fonction des retours d'expérience. Des scénarios de pertes sont envisagés en jouant sur les caractéristiques

du phénomène physique (magnitude, extension géographique, vitesse, durée) et sur celles de l'élément exposé (dans le cas d'un bâtiment : résistance des matériaux de construction, type de structure, vétusté, etc.). Le développement des approches coût/bénéfices pour la gestion des risques favorise le développement de ces outils car ils permettent de confronter le coût des mesures de prévention envisagées et le coût estimé des pertes qui seraient alors évitées, répondant ainsi à la demande des décideurs.

③ Bilan des catastrophes dans le monde

La catastrophe s'appréhende directement à travers l'endommagement. Cette vision de la catastrophe peut déboucher sur des définitions beaucoup plus sociales et politiques comme celle donnée par un ancien responsable japonais : « tout dommage pour lequel la population peut obtenir une aide du gouvernement est une catastrophe ». L'endommagement apparaît comme un bon indicateur synthétique car il dépend aussi de la résilience des sociétés (Pigeon, 2005).

a – Sources et bases de données

Proposer des bilans consolidés sur les impacts des catastrophes naturelles, à l'échelle internationale ou mondiale, est une entreprise ardue : les biais sont multiples et les marges d'erreur importantes. Les sources fiables sont rares, les phénomènes naturels nombreux, les critères de sélection des informations extrêmement variés et rarement homogènes même au sein d'un seul pays, et l'agglomération de données à une petite échelle géographique nécessite le recours à un grand nombre d'organismes relevant de disciplines différentes. Les tableaux 4 et 5 (voir tableau 5 – *Critères de classification des catastrophes naturelles retenus par la société Munich Réassurance (2009)* sur www.licence.puf.com) montrent la diversité des critères retenus, chaque organisme retenant ses propres indicateurs en fonction des priorités de son action : la collecte des données ne peut être

dissociée des stratégies et intérêts des différents acteurs qui la mettent en place (partie 4.II).

Tableau 4

Différents critères de comptabilisation des catastrophes naturelles suivant les différentes bases de données mondiales disponibles

Critères retenus (un ou plusieurs)	Université du Colorado (États-Unis)	Centre de recherche sur l'épidémiologie des désastres (CRED)	Nations Unies / Département des affaires humanitaires (DHA)
Morts	≥ 100	≥ 10	≥ 100
Blessés	> ou = 100	...	...
Sinistrés/sans-abris	...	≥ 100	≥ 1 % de la population
Coût	1 million de \$ (US)	...	≥ 1 % du PNB
Gestion	...	Déclaration d'état d'urgence national ou appel à l'aide internationale	...

Source : d'après Gaillard, 2001.

Les cartes suivantes ont été élaborées grâce à la base de données EM-DAT (*Emergency Disasters Database*) du Centre de recherches sur l'épidémiologie des désastres (CRED), de l'Université catholique de Louvain. C'est la plus complète et la plus homogène de toutes, notamment pour les événements postérieurs à 1973. Plus de 16 000 événements y sont référencés, de 1900 à nos jours.

Cette base a été créée avant tout dans un but opérationnel, afin de faciliter les actions humanitaires à l'échelle nationale et internationale, d'améliorer la prévention des catastrophes et de mieux évaluer la vulnérabilité. Ces objectifs expliquent les choix opérés dans la structuration des données et leur sélection : y sont référencés les désastres ayant entraîné au moins 10 morts ou au

moins 100 sinistrés, la déclaration d'un état d'urgence dans le(s) pays touché(s), ou un appel à l'aide internationale. La structuration des données EM-DAT montre une focalisation sur les événements brutaux ou dont les bornes temporelles sont faciles à déterminer (épidémie, vague de froid...). Les données sont donc très pertinentes pour l'étude des catastrophes majeures, dont la cinétique entraîne des dégâts massifs et groupés (éruptions volcaniques, séismes). Mais elles sont à compléter pour des aléas dont les conséquences peuvent être beaucoup plus ponctuelles. C'est le cas des avalanches dans les pays développés, puisque chaque événement implique en moyenne 4 ou 5 personnes (décédées, blessées ou indemnes), soit moins que la valeur plancher retenue par le CRED. La carte mondiale des décès par avalanche au cours des trente dernières années qui pourrait être présentée à partir des données EM-DAT ne porterait que sur les 74 événements ayant fait plus de 10 victimes ou 100 sinistrés, soit 3 534 morts en tout, essentiellement dans les pays himalayens et caucasiens, en Turquie et en Russie. Elle n'enregistre donc pas les victimes des avalanches liées à la pratique des sports d'hiver, chaque événement faisant en général dans ce contexte moins de 10 morts. Or, au cours des neuf dernières années en France, 275 personnes sont mortes emportées dans 206 avalanches (partie 3.II.1). Malgré leurs limites, le traitement des données EM-DAT est particulièrement éclairant sur la répartition géographique, phénoménologique et temporelle des témoignages de dommages et des victimes associées et permet des comparaisons à l'échelle mondiale.

Figure 2
Distribution mondiale des catastrophes d'origine géologique et hydroclimatique depuis 30 ans (1979-2008)

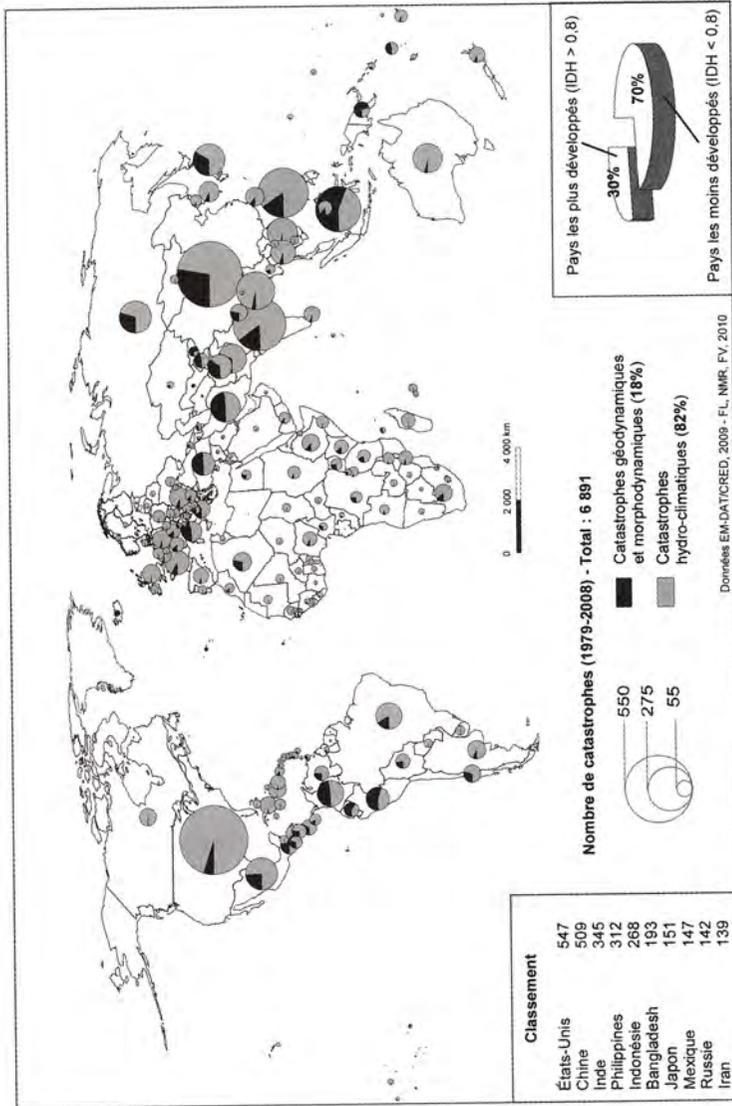
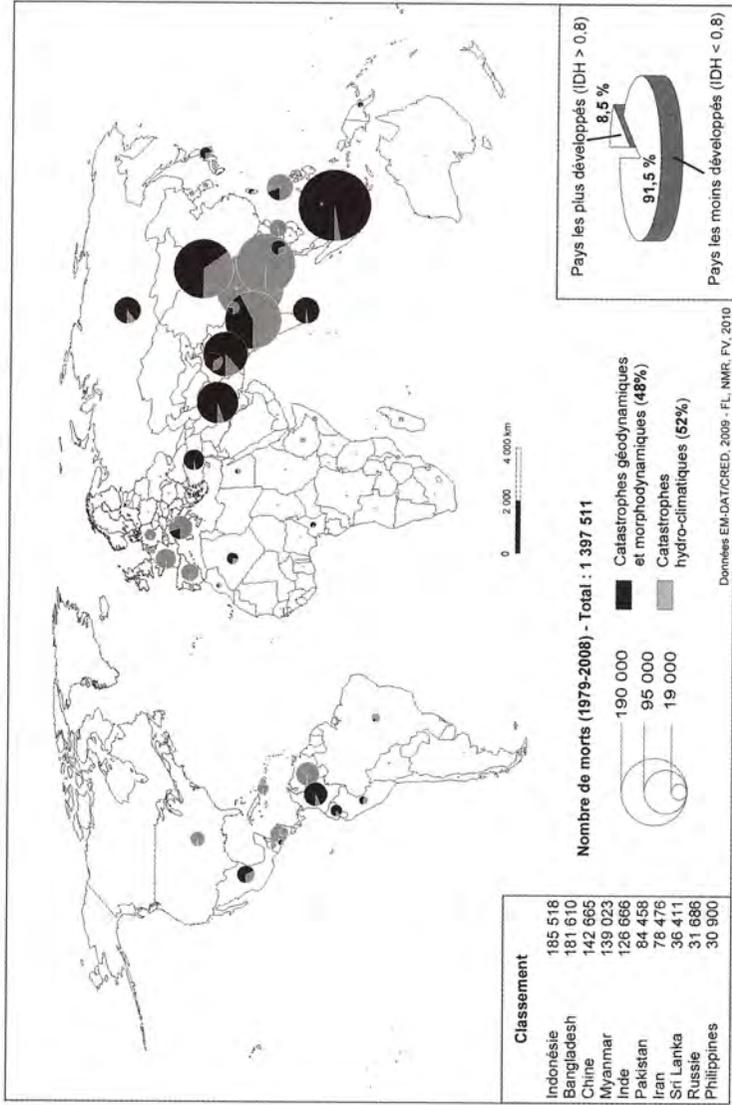


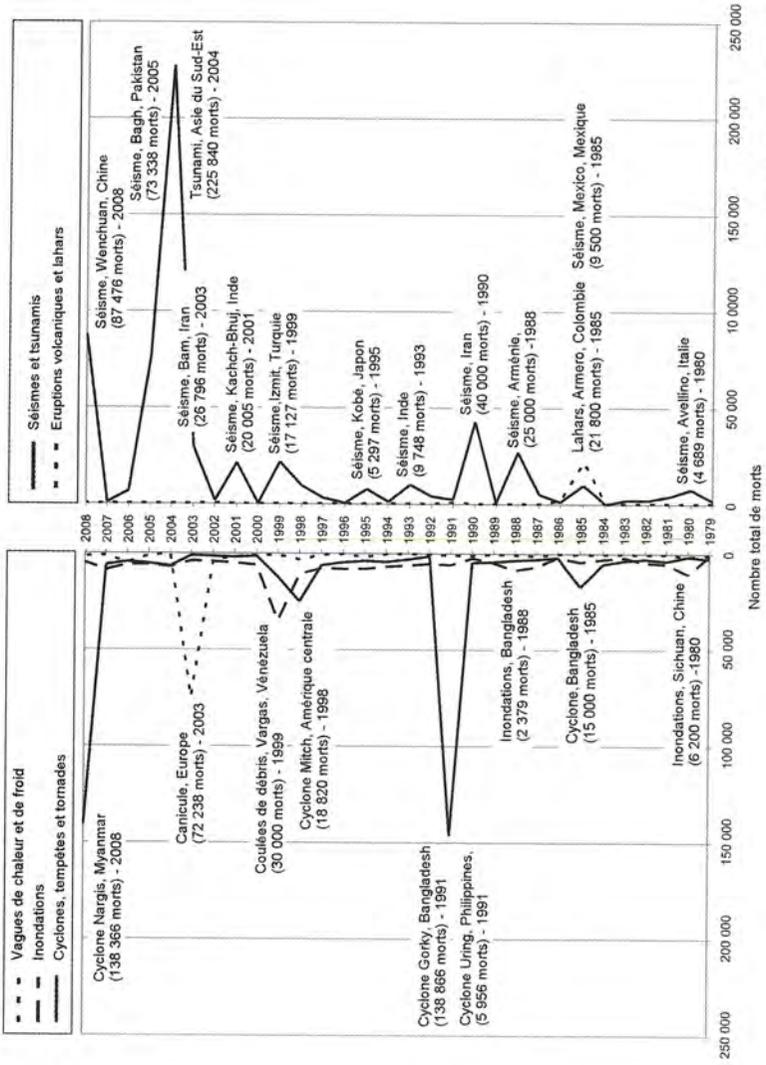
Figure 3
Distribution mondiale des victimes (morts) de catastrophes naturelles depuis 30 ans (1979-2008)



b – Bilan humain à l'échelle mondiale

Entre 1979 et 2008, les catastrophes hydroclimatiques (82 %) l'emportent largement sur celles de nature géologique et morphodynamique (18 %), les six dernières années ayant encore accru ce déséquilibre. Hormis les États-Unis, le Mexique, l'Australie, le Brésil et la Colombie, la plupart des autres pays fortement affectés se situent en Asie (Chine, Inde, Philippines, Indonésie, Bangladesh, Japon, etc.). Le continent africain, davantage concerné par les effets des sécheresses qui ne sont pas comptabilisés ici, apparaît faiblement affecté par ce type de catastrophes brutales et brèves (figures 2 et 3). Les phénomènes géologiques et morphodynamiques font presque autant de victimes que les calamités hydroclimatiques (respectivement 48 % et 52 %). L'Asie paie le plus lourd tribut et notamment l'Indonésie, le Bangladesh, la Chine et la Birmanie (Myanmar). Cela s'explique par quatre événements majeurs : le tsunami du 24 décembre 2004 (166 000 morts et 533 000 sinistrés en Indonésie) et le séisme du 12 mai 2008 en Chine (87 500 morts et près de 46 millions de sinistrés) d'une part, le cyclone Nargis du 2 et 3 mai 2008 en Birmanie (138 400 morts et 2,5 millions de sinistrés) et le cyclone Gorky du 30 avril 1991 au Bangladesh (138 900 morts et environ 15,5 millions de sinistrés) d'autre part. Les séismes et tsunamis sont responsables de 44 % des victimes recensées contre 30 % pour les cyclones, tempêtes et tornades et 14 % pour les inondations. Le nombre de victimes évolue depuis 30 ans en dents de scie, au gré d'événements d'une ampleur exceptionnelle. Cette dispersion souligne à quel point les conséquences humaines des catastrophes d'origine naturelle dépendent de la magnitude des phénomènes en cause mais aussi des vulnérabilités (figure 4).

Figure 4
Évolution comparée du nombre de victimes (morts) de catastrophes naturelles dans le monde depuis 30 ans (1979-2008)



Données EM-DAT/CRED, 2009 - FLNMR, FV, 2010

c – Des conséquences économiques croissantes

La société de réassurance Munich Re propose des bilans mondiaux des coûts monétaires des catastrophes naturelles. Depuis le début des années 1950, leur base de données rassemble 26 000 entrées en 2008 et s'enrichit de 800 à 1 000 événements dommageables chaque année. Munich Re estime à plus de 50 000 le nombre de catastrophes naturelles du xx^e siècle ayant entraîné la mort de plus de 4 millions de personnes (hors sécheresses et famines). Les pertes économiques totales ont augmenté d'un facteur 9 depuis les années 1960, et celles dues aux catastrophes de catégorie 6 (*Great natural catastrophe*), (figure 31, p. 222) sont estimées depuis 30 ans à environ 1 500 milliards de dollars US (valeur 2008). Ces pertes ont été multipliées approximativement d'un facteur 6,5 entre les décennies 1963-1972 (près de 85 milliards) et 1993-2002 (près de 552 milliards) suivant une évolution quasiment constante. Mais de la décennie noire des années 1990 (près de 660 milliards de pertes) émerge un premier record historique avec les 100 milliards de pertes dues au séisme de Kobé au Japon en 1995, détrôné en 2005 par les conséquences de l'ouragan Katrina aux États-Unis (125 milliards de pertes estimées). Si les trois premières années du xxi^e siècle ont été peu coûteuses, 2008 inclut la troisième catastrophe la plus coûteuse de l'histoire (séisme du Sichuan en Chine, 85 milliards de dollars de pertes) ainsi que la cinquième (ouragan Ike dans le bassin Caraïbe et aux États-Unis, 38 milliards). Depuis les années 1970, Munich Re estime que le coût des catastrophes de catégorie 6 représente la moitié des pertes économiques dues aux catastrophes naturelles dans leur ensemble (catégories 1 à 6).

Au-delà des valeurs brutes, l'évolution des coûts des catastrophes naturelles de catégorie 6 (voir figure 31, p. 222) illustre parfaitement la théorie de Patrick Lagadec qui prédisait au début des années 1980 l'entrée dans une ère de risques majeurs, avec des catastrophes d'une tout autre nature (et pas seulement ampleur) que celles connues jusque-là. Sans doute faut-il également y voir la conséquence des transformations profondes liées à la mondialisation, à la littoralisation des hommes et des activités,

à la croissance urbaine sans précédent observée depuis quelques décennies ainsi qu'au processus de métropolisation. Toutes ces évolutions conduisent à une concentration d'enjeux vulnérables et de richesses sur des espaces de plus en plus restreints (mégapoles) (partie 4.1).

À la lecture de ces bilans humains et économiques, les catastrophes naturelles peuvent être vues comme de véritables révélateurs de vulnérabilités humaines, socio-économiques ou institutionnelles au sein des sociétés. Pour mieux les comprendre, il faut faire appel à la notion de crise et exploiter les informations et analyses issues des retours d'expérience post-catastrophes mis en place ces dernières décennies.

④ Crise et retours d'expérience

a – Les temps de la crise

Les grandes catastrophes génèrent une désorganisation inhérente à la mise en place de procédures extraordinaires, désorganisation souvent aggravée par la rupture des moyens de communication et par les difficultés de coopération entre acteurs, dont les cultures de fonctionnement internes se prêtent mal à des coopérations exceptionnelles. Ces difficultés de toute nature font basculer la situation de l'état d'accident vers celui de crise (tableau 6). La transition entre ces deux états est souvent présentée comme la conséquence d'une accélération (ou compression) du temps dit normal, ne permettant plus aux organisations de gérer correctement la situation selon les délais dont elles disposent d'habitude pour absorber les dysfonctionnements quotidiens. Elle se caractérise également par une dilatation de l'espace car le sinistre s'étend rapidement à de nouveaux territoires.

Tableau 6
**Les caractéristiques de l'accident, de la crise
 et de la catastrophe majeure**

Accident : la situation est contrôlable moyennant une réaction rapide et organisée	Crise : le sinistre dépasse les moyens prévus	Catastrophe ou crise majeure : la capacité de gestion de la société est dépassée, rupture, faillite du système
Événement bien circonscrit dans l'espace et le temps (quelques heures à quelques jours)	Contraction du temps et dilatation de l'espace	Changement de nature et d'échelle des phénomènes, effet domino, crise durable
Un scénario connu	Faits insaisissables, incertitudes aiguës, paralysantes	Événement hors du commun, dissolution des repères fondateurs et structurants
Des procédures d'urgence codifiées	Procédures sous dimensionnées, inapplicables	Procédures inadaptées, inapplicables ou contre productives
Petit nombre d'intervenants, qui se connaissent, savent travailler ensemble	Éclatement des réseaux d'acteurs habituels, qui ne se connaissent pas et n'ont pas l'habitude de travailler ensemble : conflits	Multiplication des intervenants, les acteurs centraux ne jouent plus leur rôle, des acteurs marginaux se révèlent incontournables
Responsabilités et hiérarchie des intervenants connus et acceptés	Conflits de responsabilités, de compétences, manque de visibilité	Les règles du jeu, les hiérarchies, les normes sont bouleversées
Une maîtrise rapide du dérèglement en cause	Longue phase critique éprouvante pour les matériels, les hommes, les organisations	Diagnostic hors de portée, les outils conceptuels sont inadaptés à la situation
Peu de difficultés de communication interne, des communiqués de presse aisément établis	De redoutables problèmes de communication (internes, externes, avec la population, avec les médias omniprésents)	Problèmes majeurs et massifs de communication à tous les niveaux, rupture, dissolution des réseaux habituels
Une couverture aisée par les assurances	Des problèmes d'indemnisation très difficiles	Les systèmes d'indemnisation sont dépassés par l'ampleur des dommages
Une importance économique circonscrite	Des enjeux économiques, politiques et culturels importants	Enjeux fondamentaux non plus de gestion mais de politique

FL, NMR, FV, 2010.

Pour passer de l'état de crise à celui de catastrophe majeure, il faut que la situation dépasse la capacité de gestion institutionnelle de la collectivité et entraîne des mutations décisives (qui pourront ensuite être analysées comme des ruptures historiques importantes) en remettant en cause les repères structurants de la société (conventions, normes, dogmes, règle du jeu), aussi bien culturels qu'économiques et politiques.

b – Les retours d'expérience (REX)

Le retour d'expérience (REX) permet de reconstituer l'événement et de comprendre les difficultés rencontrées dans sa gestion, d'identifier les facteurs ayant pesé sur la conduite des opérations, positivement ou négativement. L'objectif est ensuite d'adapter la prévision et la prévention en vue de la catastrophe suivante, de réduire la vulnérabilité des enjeux en augmentant leur résilience. Le REX s'interroge sur la construction des circonstances de la catastrophe, techniques mais aussi sociales, 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. Il s'agit de ne pas négliger les interprétations subjectives des événements, d'autant plus essentielles à connaître et analyser qu'elles déterminent des comportements individuels ou organisationnels pendant la catastrophe, et construisent de nouvelles représentations du risque dans la période post-crise.

ENCADRÉ N° 1

Évolution du REX « CatNat » en France

L'un des premiers retours d'expérience « CatNat » réalisé en France est sans doute le travail scientifique entrepris par Alfred Lacroix (1904) au lendemain de la catastrophe de la montagne Pelée de 1902. Il marquait le début de la volcanologie moderne par son explication rationnelle et circonstanciée des causes de la catastrophe. D'autres REX ont suivi, plus souvent dans un souci de recherche de responsabilités que d'apprentissage scientifique. Mais il faut attendre 1997 et le rapport de l'instance d'évaluation des politiques publiques de prévention des risques naturels pour voir se formaliser le retour d'expérience CatNat. 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 mener une mission de réflexion et de propositions sur l'organisation du retour d'expérience dans le domaine des risques naturels. Deux types d'approches sont préconisés : 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). Mais des interrogations sur la faisabilité du retour d'expérience demeurent (Gilbert, 1999), en particulier la question des 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 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.

En France, l'outil le plus courant est celui de l'enquête administrative, réalisée par les inspections générales (IGE). Contrairement aux pratiques anglo-saxonnes, les rapports d'Inspection n'étaient diffusés, le plus souvent, qu'en interne. À partir de 1999, ils ont été mis en ligne sur le site Internet du ministère de l'Environnement (avalanche de Chamonix en 1999, inondations de l'Aude en 1999, de la Bretagne et de la Somme en 2001, du Gard en 2002, etc.).

→ IV. L'évaluation des risques

1 Une démarche en plusieurs étapes

En dehors de l'aspect organisationnel, la gestion des risques est aussi une question d'évaluation et de prévision des incertitudes qui accompagnent le caractère aléatoire des phénomènes naturels et de leurs effets potentiels. Ainsi peut-on concevoir qu'une bonne gestion des risques passe par une bonne connaissance scientifique et technique des différentes composantes du risque. Cette connaissance scientifique relève aussi bien de la recherche opérationnelle que fondamentale. Elle mobilise une large communauté scientifique composée de géologues, de géotechniciens, d'hydrologues, de climatologues, de géographes, etc., dont l'objectif est de prévoir les risques encourus à travers leurs effets potentiels dans le temps et dans l'espace. Cette démarche fondamentale d'évaluation qualitative ou quantitative des risques consiste en des diagnostics et des scénarios largement nourris par les enseignements tirés des différents retours d'expérience post-catastrophes. Elle mobilise des données, des outils et des méthodes très variables, en allant de l'observation de terrain à des modélisations numériques très poussées menées en laboratoire.

L'évaluation du risque revient à évaluer, qualifier voire quantifier, et surtout spatialiser ses différentes composantes (figure 9). Il s'agit d'une analyse croisée qui repose concrètement sur les étapes suivantes :

- la détermination du bassin de risque et du périmètre d'étude ;
- le recueil, la description et la retranscription cartographique des phénomènes historiques et actuels ;

- la qualification et la cartographie des niveaux d'aléa ;
- la détermination d'un aléa de référence contre lequel on cherche à se protéger ou pour lequel on cherche à mesurer le risque ;
- l'identification et la hiérarchisation des enjeux socio-économiques et humains (qualification du risque) ;
- la caractérisation des différentes formes de vulnérabilités (facteurs, critères, indicateurs) ;
- éventuellement la mesure du risque encouru au moyen d'indices de risques ou de pertes potentielles (quantification du risque).

Dans le cadre des PPR français, seules les deux dernières étapes ne sont pas réalisées.

a – La détermination du bassin de risque

Pour accroître l'information sur les événements historiques et valoriser la démarche d'expertise, il est important d'analyser les phénomènes à risque dans l'unité physique homogène concernée par leur manifestation. Cette unité que l'on peut qualifier de bassin d'aléa ou, par extension, bassin de risque, peut être délimitée par un contexte hydrographique, orographique, géologique, morphologique, où les facteurs de prédisposition ou de déclenchement de l'aléa sont relativement similaires. C'est par exemple un bassin-versant donné pour l'aléa « inondation », ou un massif karstique donné pour l'aléa « effondrement de cavités souterraines ».

b – Le recueil de l'information historique sur les phénomènes

La connaissance et la localisation des phénomènes historiques ou actuels constituent des étapes préalables et fondamentales de l'évaluation des aléas. Cette information est traditionnellement collectée auprès des archives et des populations sous la forme de témoignages de dommages. Pour les mouvements de terrain par exemple, elle peut être complétée par des relevés de terrain et des interprétations d'images aériennes ou

satellites de haute résolution afin de différencier et de localiser des expressions morphologiques caractéristiques de certains phénomènes (cicatrices d'arrachement, accumulations, blocs isolés, etc.) et des signes d'activité récente (désordres dans la végétation et sur les infrastructures, sources, zones humides).

Cette recherche documentaire présente un double intérêt :

- d'une part, celui de dresser un historique des événements et de constituer des bases de données descriptives et géoréférencées sur l'activité des phénomènes, leurs effets, leurs conditions de déclenchement, leur extension, leur fréquence de retour, etc. ;
- d'autre part, celui d'identifier par recoupement les conditions topographiques, lithologiques, hydrologiques, climatiques et d'occupation du sol les plus favorables à l'apparition des phénomènes (facteurs d'apparition ou d'occurrence).

En France, de nombreuses données géoréférencées sur l'activité des phénomènes naturels sont disponibles gratuitement en ligne. On peut citer les bases nationales *SisFrance/Antilles* sur la sismicité historique ou *BDMVT* sur les mouvements de terrain du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). Plusieurs équivalents internationaux existent sur les sites américains du *National Geophysical Data Center* (NGDC) pour les séismes, les tsunamis et les volcans et du *National Hurricane Center* (NHC) pour les cyclones.

c – Des aléas (phénomènes) à l'aléa de référence

D'un point de vue théorique, la composante aléa est appréhendée à travers la probabilité d'occurrence d'un phénomène de magnitude (ou intensité donnée) dans une période donnée. Les règles de combinaison des différents facteurs et paramètres entrant dans cette définition sont très variables suivant les phénomènes naturels et les approches suivies (déterministes ou géostatistiques par exemple). Elles permettent de définir plusieurs niveaux d'aléa appréciés généralement sur une échelle qualitative (de faible à fort). Dans le cadre des PPR inondation par exemple, la mesure de l'aléa intègre des critères de magnitude

des phénomènes (hauteurs et durées de submersion, vitesses d'écoulement), ce qui permet de traiter plus facilement les événements difficilement probabilisables comme la plupart des crues torrentielles. Les seuils entre les différents niveaux d'aléa « inondation » sont alors déterminés en fonction des possibilités de déplacement des personnes (figure 5).

Ainsi, la hauteur d'un mètre constitue une valeur seuil de différenciation des niveaux moyen à fort, pour laquelle :

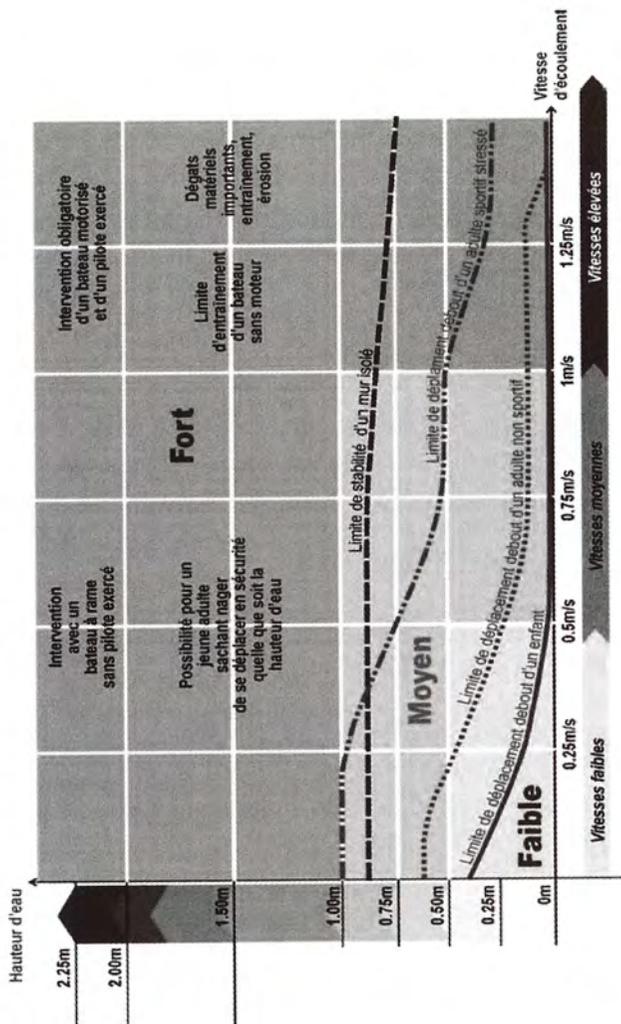
- un enfant ne peut se déplacer ;
- une voiture peut flotter et constituer un embâcle ;
- les engins classiques de secours ne peuvent plus intervenir ;
- la protection par batardeau par un particulier devient difficile.

Mais suivant les aléas, il n'est pas toujours possible de déterminer des seuils sur des critères d'endommagement potentiel et leur découpage devient alors assez arbitraire.

Pour certains aléas complexes comme les mouvements de terrain, la qualification de l'aléa peut faire intervenir plusieurs critères dont le poids respectif est apprécié selon différentes méthodes géostatistiques. Par exemple, la carte de susceptibilité aux mouvements de terrain des monts Menoreh en Indonésie combine neuf variables : altitude, pente, orientation des versants, morphologie des versants, lithologie, réseau hydrographique, failles, réseau routier, occupation du sol (Sri Hadmoko, 2009). Des exemples de cartes d'aléa « mouvements de terrain » sont par exemple disponibles sur le site du BRGM aux Antilles pour la Guadeloupe et la Martinique.

Dans le cas des séismes, le calcul de l'aléa à l'échelle régionale se fait avec des modèles probabilistes complexes qui combinent l'influence de tous les séismes dont les sources sont répertoriées. On aboutit pour le site étudié à un calcul des accélérations maximales (exprimées en m^2/s) qui ont 10 % de chance d'être dépassées pour une période donnée (généralement de 50 ans). Au niveau local – on parle dans ce cas de microzonage sismique –, l'évaluation de l'aléa sismique intègre les différents effets (de sites et induits) par des séismes potentiels. Elle s'appuie

Figure 5
Hiérarchisation de l'aléa « inondation » (faible à fort) en fonction des possibilités de déplacement des personnes suivant la hauteur et la vitesse des écoulements



Source : MEDD.

sur une démarche beaucoup plus naturaliste basée sur la combinaison empirique de facteurs de prédisposition.

Mais l'évaluation d'un aléa doit également intégrer son extension spatiale prévisible, *a fortiori* pour des phénomènes très dynamiques comme les glissements de terrain, les tsunamis ou les inondations. Dans ce cas-là, le recours à la modélisation numérique ou physique (sur modèles réduits) permet de délimiter cet aléa et d'en établir la cartographie dynamique pour plusieurs scénarios de déclenchement et de propagation. De nombreux modèles et outils informatiques permettent ainsi de prédire ce que sera l'extension spatio-temporelle d'un phénomène et de préciser aussi l'évolution de certains de ses paramètres comme la vitesse, le volume, l'énergie cinétique ou la hauteur. Ces applications très pointues et souvent coûteuses tendent à se développer et interviennent généralement en complément des expertises de terrain. Ainsi, l'évaluation de l'aléa « inondation » se fait généralement en couplant une approche hydrogéomorphologique et des observations historiques de crues avec des analyses hydrologiques (relations pluies/débits) et des modèles hydrauliques visant à modéliser les écoulements.

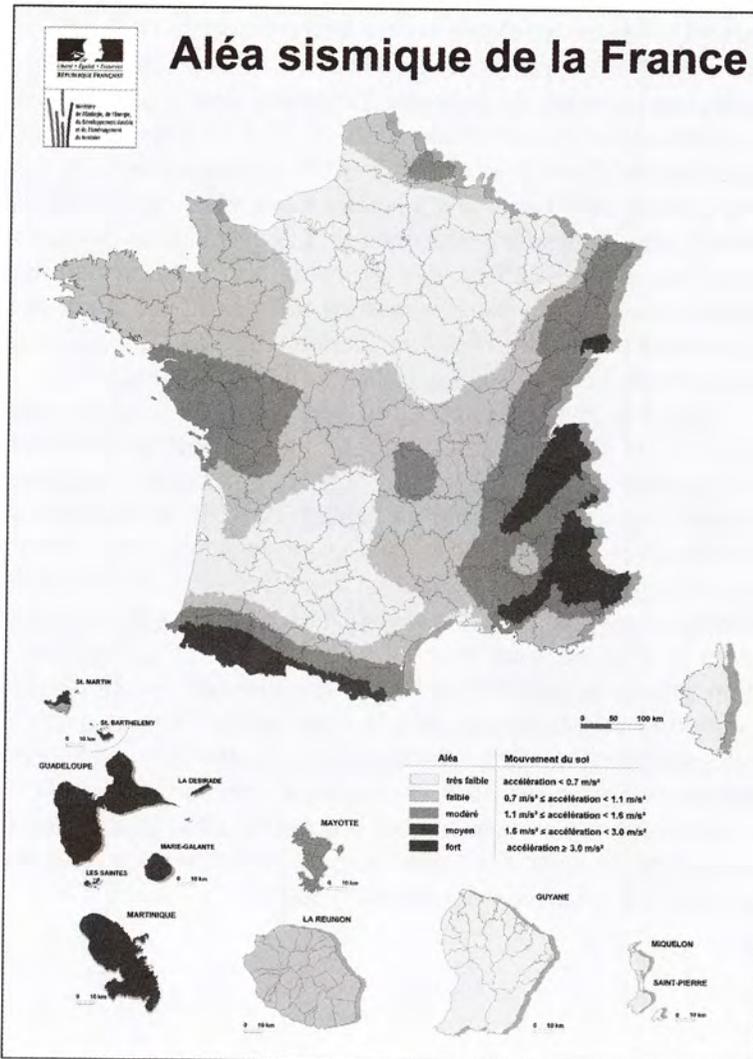
L'aléa de référence sur la base duquel va se faire le diagnostic de risque et certaines prises de décision correspond à une période de retour choisie pour se prémunir d'un phénomène. Il varie en fonction des objectifs de protection recherchés, autrement dit en fonction du niveau de risque collectivement supportable. Pour les inondations, on retient généralement l'événement le plus important entre la plus forte crue historique et la crue centennale. La crue historique peut être plus facilement perçue par la population, sauf si des aménagements ont été réalisés depuis pour s'en protéger (endiguement par exemple). Dans ce cas, le choix de prendre en compte ou non ces aménagements pour la quantification des aléas doit faire l'objet d'une concertation avec les services instructeurs du dossier. Le principe de précaution prévalant, il est d'usage de ne pas tenir compte des aménagements de protection dans l'évaluation des aléas ou bien d'affecter une zone d'aléa distincte en cas de défaillance d'un ouvrage de protection. Le niveau de protection peut être augmenté pour des

enjeux particuliers. Ainsi le dimensionnement des barrages hydroélectriques d'EDF est-il conçu pour résister aux crues décennales, donc à des débits bien supérieurs.

En matière de protection sismique, l'aléa de référence est en général fixé par les autorités. Il est défini conventionnellement comme le séisme maximum contre lequel la société choisit de se protéger. Il est supposé se produire avec une probabilité non nulle dans un intervalle de temps compatible avec la durée de vie des bâtiments et des aménagements. Pour les ouvrages courants, la probabilité d'occurrence généralement choisie est de 10 % sur une période de 50 ans, ce qui équivaut à une période de retour de 475 ans. Cette démarche conduit à la délimitation de zones pour lesquelles on édicte des règles de construction parasismiques. En France, l'aléa sismique de référence pour la protection sismique est défini réglementairement par l'arrêté du 29 mai 1997 en référence au zonage sismique de la France (figure 6).

Pour d'autres applications, du type calcul du risque et élaboration de scénarios catastrophes, l'aléa de référence retenu est généralement un événement historique marquant (éruption volcanique, crue ou séisme particulier) dont on va chercher à modéliser les conséquences dans un nouveau contexte socio-économique afin de sensibiliser les décideurs et l'opinion publique, voire de justifier la rentabilité économique de certaines mesures de prévention. Ainsi, la modélisation des conséquences d'un séisme équivalent à celui de 1839 en termes d'intensité locale (VIII) en Martinique dans le contexte de 1994 a conclu à l'effondrement de 46 % des bâtiments stratégiques, 35 % des bâtiments collectifs et 40 % des maisons individuelles. Il s'agit là d'une extrapolation faite à partir d'un échantillon de bâtiments représentatifs ayant fait l'objet au préalable d'un diagnostic de vulnérabilité physique (source BRGM, 1999).

Figure 6
Cartographie réglementaire de l'aléa sismique en France



d – L'identification et la hiérarchisation des enjeux

La présence d'un risque sous-entend la présence d'enjeux caractérisés par des valeurs et certaines formes de vulnérabilités. Ces enjeux définis dans la partie 1.II.2. peuvent être des biens, des personnes, des productions, des activités ou des fonctions assorties de différents systèmes de valeurs (économique, sociale, stratégique, environnementale, affective, etc.). Dans une démarche d'évaluation du risque, ces enjeux doivent être recensés, localisés et hiérarchisés. Leur recensement se fait généralement à partir des cartes d'occupation du sol, de différentes bases de données (démographiques, infrastructurelles, patrimoniales, socio-économiques, environnementales, etc.) et de relevés de terrain. La hiérarchisation des enjeux considérés se fait habituellement sur des critères de valeur, généralement fonctionnelle, et de classe de vulnérabilité, le plus souvent physique.

Par exemple, la vulnérabilité du système urbain de la ville de Quito en Équateur face à de multiples aléas naturels a été analysée dernièrement sur la base de six familles d'enjeux majeurs : la population, les établissements de santé, le réseau d'électricité, le système d'eau potable, la mobilité et les entreprises (D'Ercole et Metzger, 2009). Chaque famille d'enjeu est constituée d'éléments spécifiques et l'analyse de leur vulnérabilité a dû être adaptée à chaque cas. Ainsi, les éléments majeurs de l'approvisionnement électrique sont constitués de lignes et de nœuds clés du réseau. Ils peuvent être hiérarchisés sur des critères de valeur fonctionnelle tels que la tension transportée ou le nombre de foyers desservis, et/ou sur des critères de vulnérabilité comme la vétusté ou les alternatives de fonctionnement.

En matière de recensement des enjeux, les sources exploitables sont très variables suivant l'échelle d'analyse. À l'échelle locale, les données récoltées devront nécessairement être complétées ou mises à jour par des relevés de terrain, par exemple pour différencier les types de bâtiments ou apprécier le nombre d'occupants. Les typologies utilisées doivent être bien représentatives du patrimoine du pays ou de la région étudiée sans être trop exhaustives.

Pour certains diagnostics de vulnérabilité, notamment en matière de risque sismique, il existe des typologies d'enjeux très développées. Ainsi, dans sa dernière version, la méthode américaine d'estimation des dommages en cas de séisme (HAZUS) intègre quatre types principaux d'enjeux. Elle distingue pour le bâti courant 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. On trouve l'équivalent pour les réseaux de transport avec par exemple 56 sous-classes de voies ferrées.

Ces classes de vulnérabilité du bâti sont donc établies spécifiquement pour chaque aléa connu. À titre d'exemple, le tableau 7 (*Typologie du bâti (classes de vulnérabilité) adaptée à l'analyse des dommages en cas de tsunami (Indonésie)*, à consulter sur www.licence.puf.com) présente une typologie spécifiquement adaptée aux tsunamis en Indonésie (Leone *et al.*, 2007). Elle est adaptée à une modélisation des dommages potentiels en cas de tsunami de hauteur donnée.

2 Les diagnostics de vulnérabilité

Le diagnostic de vulnérabilité est une étape essentielle de l'appréciation du risque mais qui demeure beaucoup moins formalisée et standardisée que les méthodes d'évaluation de l'aléa. La caractérisation des différentes formes de vulnérabilité (propension au dommage) se fait couramment selon deux grandes approches : sociogéographique et technique.

a – L'approche sociogéographique de la vulnérabilité

Le plus souvent qualitative, l'approche sociogéographique de la vulnérabilité est basée sur l'analyse de facteurs de prédisposition au dommage ou au dysfonctionnement. Ces facteurs (techniques, institutionnels, socio-économiques, organisationnels, géographiques, psychosociologiques, culturels, etc.) peuvent être

appréhendés au moyen de différents critères et indicateurs variables suivant la nature des enjeux vulnérables et les échelles d'analyse. Le tableau 2 (*Exemples de facteurs et critères de vulnérabilité pour différents types d'enjeux en vue d'un diagnostic*, à consulter sur www.licence.puf.com) présente un certain nombre de ces facteurs. L'objectif de cette approche analytique est de décrypter le rôle respectif de ces facteurs et leurs interactions en tant que conditions propices à une future catastrophe. Par exemple et d'un point de vue psychosociologique, des enquêtes menées auprès des populations montrent que la vulnérabilité humaine face aux éruptions volcaniques dépend fortement de la qualité de la perception des risques, de la connaissance des moyens de protection et des comportements potentiels. On sait que ces facteurs vont fortement varier d'un individu à l'autre suivant son expérience (son vécu), son niveau d'instruction et même sa position géographique par rapport au volcan. Autre exemple avec la figure 7 (*Synthèse graphique de la vulnérabilité humaine face à trois menaces naturelles majeures en Martinique*, à consulter sur www.licence.puf.com) qui synthétise la qualité de la représentation des risques sismiques, volcaniques et cycloniques en Martinique : cette représentation collective est mesurée au moyen de dix critères psychosociologiques obtenus par enquêtes successives et gradués sur une échelle de vulnérabilité allant de 1 à 3 (max.). Elle participe au diagnostic comparatif de vulnérabilité humaine face à trois aléas majeurs. La pondération de ces critères montre que c'est pour le risque volcanique que cette vulnérabilité humaine est la plus élevée, suivi de près par le risque sismique et de plus loin par le risque cyclonique. Cette approche pseudo-quantitative montre que 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 défailants.

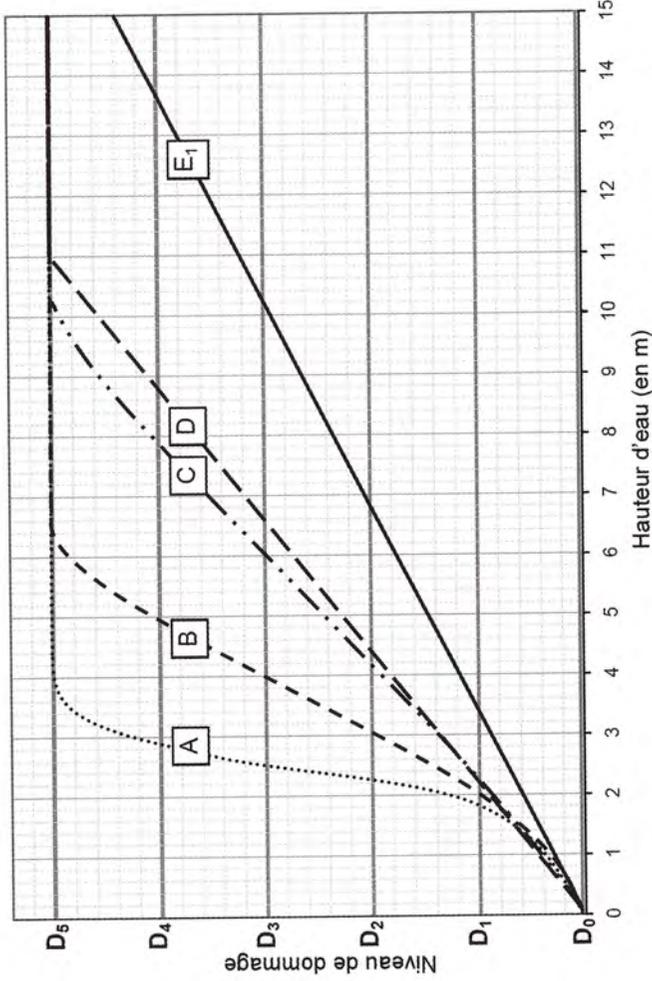
Cette approche par facteur peut également être menée rétrospectivement, après une catastrophe, pour en expliquer les

causes directes ou indirectes. C'est l'un des objectifs du retour d'expérience.

b – L'approche technique de la vulnérabilité

En général quantitative, l'approche technique de la vulnérabilité est basée sur la mesure de l'endommagement potentiel (D) en tant qu'indicateur de vulnérabilité. Cet endommagement potentiel est fonction de la magnitude de l'aléa, de sa durée et de la sensibilité des éléments exposés. Cet endommagement potentiel est décrit soit par des courbes, soit par des matrices (tableaux) qui permettent théoriquement de simuler les dommages, par exemple pour un type particulier de bâtiment soumis à une certaine magnitude. Suivant les courbes, le taux d'endommagement peut correspondre soit au niveau de destruction moyen d'un bâtiment de classe donnée (0 à 1), soit au pourcentage de destruction d'un stock de bâtiments appartenant à une même classe (0 à 100 %). À titre d'exemple, la figure 8 donne des courbes d'endommagement (ou courbe de fragilité) obtenues empiriquement après le passage du tsunami du 26 décembre 2004 sur le patrimoine bâti de Banda Aceh (Indonésie). Cette méthode est très utilisée dans les simulations de pertes économiques directes liées à des séismes ou à des inondations. Elle nécessite au préalable d'établir des classes d'enjeux de vulnérabilité équivalente (donc de faire des diagnostics physiques) et de connaître les valeurs de remplacement des éléments exposés. Elle est également adaptée au calcul d'indices de risque et à leur cartographie. Par contre, elle est surtout réservée au calcul des dommages directs, c'est-à-dire liés à la destruction des biens, voire dans certains cas des personnes. Dans ce cas-là il faut recourir à des courbes de dommages corporels qui sont fonction de l'intensité des dommages aux infrastructures et de la position des personnes (dans ou hors d'un bâtiment par exemple). Les calculs et les grosses bases de données que ces méthodes impliquent reposent généralement sur l'emploi de systèmes d'information géographique (SIG). Ces scénarios de pertes humaines ou matérielles peuvent également être affinés en intégrant dans les modèles la mobilité spatio-temporelle des personnes. Dans tous

Figure 8
 Courbes de vulnérabilité de cinq classes de bâtiments (A, B, C, D, E) exprimant le niveau moyen des dommages (D0 à D5) en fonction de la hauteur de submersion d'un tsunami



Les classes de bâtiments et de dommages sont décrites dans des tables annexes, voir tableau 7.
 Source : d'après Gauraz et al., 2009.

les cas, ils nécessitent une modélisation très fine de l'aléa de référence et de certains de ces critères de magnitude (par exemple la hauteur de submersion pour un tsunami, ou l'accélération du sol pour un séisme).

③ La mesure du risque

Dans une approche quantitative visant en particulier à apprécier sa variabilité spatiale, le risque peut être exprimé au moyen d'indicateurs ou d'indices intégrant un ou plusieurs critères. On peut construire de simples indices d'exposition qui donnent une quantification des enjeux pour une zone d'aléa de référence (par exemple le nombre de personnes en zone inondable), qui se distinguent des indices composites (et plus complexes) qui combinent des indicateurs d'aléa, d'enjeux et parfois même de vulnérabilité. Un exemple d'indice composite a été développé par Leone et Pagneux (2009) sur la Méditerranée pour mesurer le risque sismique à l'échelle des villes. Il combine quatre variables obtenues pour 693 agglomérations de plus de 20 000 habitants : le taux annuel moyen de croissance urbaine et l'inverse de l'IDH (deux critères de vulnérabilité), la population urbaine au dernier recensement (critère d'enjeux) et enfin le niveau d'aléa sismique. Cet indice expérimental permet de hiérarchiser les agglomérations méditerranéennes au regard du risque de pertes liées à un futur séisme en synthétisant un ensemble de conditions propices à la catastrophe.

Ces indices peuvent être spatialisés et agrégés sur différentes mailles spatiales et territoriales : bâtiment, quartier, commune, ville, province, pays, maille géométrique... Ils constituent donc un moyen de mettre le risque en carte. Ces indicateurs de risque ont tendance à se développer dans le cadre des observatoires (du littoral, des régions, des inondations). Ils facilitent les comparaisons, le suivi temporel des risques, et permettent de dégager des tendances et des priorités d'action sur les territoires les plus exposés. Deux conditions importantes doivent assurer leur pérennité et leur valeur scientifique ou opérationnelle : la traçabilité

des données entrant dans leur élaboration (au moyen de fiches de métadonnées) et leur reproductibilité dans le temps pour permettre des mises à jour régulières et suivre leurs évolutions.

D'autres indices composites sont conçus pour définir des seuils d'alertes en cas de risque de catastrophe naturelle. C'est par exemple la mission du *Global Disaster Alert and Coordination System* (GDACS) développé conjointement par les Nations unies et la Commission européenne. Ce service international, gratuit mais réservé aux abonnés (sms, email), émet une alerte électronique en temps réel en cas de déclenchement de séisme, de tsunami, d'éruption volcanique ou de cyclone. Pour les séismes, le niveau d'alerte (vert, orange, rouge) est basé sur la combinaison de trois indicateurs :

- la magnitude du séisme (aléa) ;
- un indice de vulnérabilité des régions les plus proches intégrant neuf critères socio-économiques et historiques ;
- et la densité de population (enjeux).

Cette alerte est assortie de cartes de localisation du phénomène et des principaux enjeux associés.

Certains indices peuvent aussi exprimer une estimation des pertes potentielles (souvent économiques ou matérielles) lorsqu'on intègre dans leur élaboration les taux d'endommagement potentiels et les valeurs marchandes des biens exposés. De tels indices sont généralement le résultat de scénarios de dommages (ou de pertes) pour lesquels on cherche par exemple à mesurer la rentabilité économique d'un ouvrage de protection visant à réduire l'aléa ou à protéger les enjeux. Les indices de pertes sont alors calculés avec et sans ouvrage, et la différence de coût obtenue (les dommages évités) est comparée avec le prix de l'ouvrage. Leur élaboration rentre typiquement dans le cadre des ACB (analyses coûts/bénéfices).

4 La mise en carte des risques

Comme on peut le voir à travers plusieurs figures de cet ouvrage, la cartographie des risques naturels peut se décliner à plusieurs échelles spatiales et peut faire l'objet d'applications spécifiques pour chacune des composantes du risque et des étapes de son évaluation : cartes informatives des phénomènes historiques, cartes de phénomènes modélisés, cartes d'aléas ou de facteurs d'aléas, carte d'enjeux, cartes de facteurs de vulnérabilité, cartes de dommages ou de pertes, cartes d'indices de risques, cartes réglementaires. Chacune de ces cartes fait l'objet de savoir-faire spécifiques, de chaînes de traitement parfois très complexes et de chartes graphiques variables, en fonction des objectifs d'utilisation et du public destinataire.

Le tableau 8 (*Typologie des principales familles de cartes relatives à l'évaluation et à la gestion des risques naturels*, à consulter sur www.licence.puf.com) donne un aperçu de la grande diversité de cartes produites dans le cadre de l'évaluation et de la gestion des risques naturels. Une entrée analytique permet de regrouper les principales productions cartographiques en sept grandes familles recouvrant une trentaine de types cartographiques différents allant de la caractérisation de l'aléa à la carte comme support de prévention. Des considérations plus pratiques permettent de définir quatre grandes familles d'usage de ces cartes : informatif, réglementaire, scientifique (connaissance) et opérationnel (aide à la décision). Mais à travers les nombreux exemples fournis, on peut voir que cette typologie n'a rien de définitif et que de nouveaux types et sous-types peuvent apparaître au gré des besoins et des expérimentations scientifiques.

En France, la cartographie normalisée des risques à l'échelle locale (communale) a pris son essor au début des années 1970 suite aux événements du Roc-des-Fiz (coulée de débris, 72 morts) et de Val d'Isère (avalanche, 39 morts). Ces deux catastrophes ont initié les premières démarches standardisées ZERMOS (ZONES exposées aux risques de mouvements du sol et du sous-sol) et CLPA (carte de localisation des phénomènes d'avalanche),

relayées sur un plan réglementaire par les premiers PER (plans d'exposition aux risques) et zonages R111-3, en particulier dans les départements alpins. La généralisation des PPR (plans de prévention des risques) depuis 1995 a définitivement placé la carte au cœur du dispositif français de prévention territoriale et d'appropriation des risques naturels, dans sa version informative (localisation des aléas) et réglementaire (contraintes d'occupation du sol).

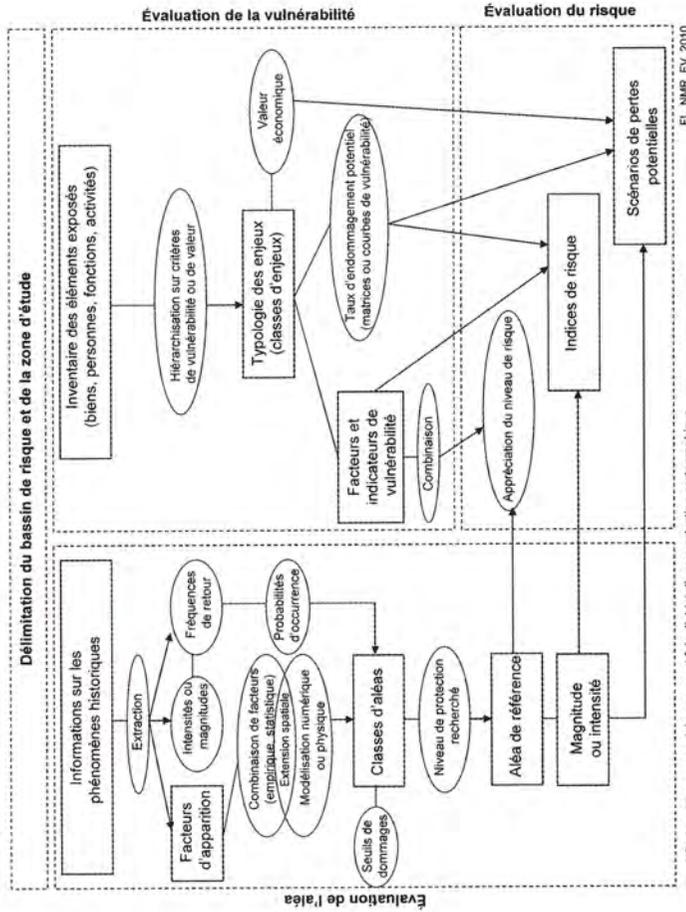
La carte est ainsi devenue un espace de connaissance, parfois de conflit, autour de limites physiques à appliquer à un risque par définition virtuel. Dans bien des cas, la carte vient matérialiser ce risque, le rendre un peu plus tangible, et permet d'en mesurer les conséquences prévisibles en termes de dommages et de coûts potentiels. L'exercice de délimitation cartographique devient délicat lorsque les enjeux – en particulier fonciers et économiques – sont importants. Il faut pourtant surmonter toutes les incertitudes sur l'extension possible des aléas avec un coup de crayon qui peut coûter très cher au 1/25 000 puisqu'à cette échelle, un trait de 0,3 mm sur la carte représente une bande de terrain de 7,5 m dans la réalité ! Il faut parfois faire des arbitrages pour trouver un juste équilibre entre des nécessités de protection et des besoins de développement. La carte de risques devient alors un espace de concertation, voire de négociation, utile à la prise de décision. Elle est relativement accessible pour le grand public et a pour autre grand avantage de conserver une mémoire des risques à un instant donné de nos connaissances scientifiques, mais qui peut être réactualisée en fonction de l'évolution de ces connaissances.

Cependant, la cartographie des risques ne se borne pas à ces considérations sécuritaires et juridiques. Dans le monde des géographes, les productions cartographiques traitant des risques d'origine naturelle sont riches et variées en échelles, en contenus et en objectifs. Elles relèvent souvent d'approches exploratoires, explicatives ou prédictives de processus souvent complexes dont on cherche à poser les limites. Des premiers indices de l'aléa à la modélisation spatiale des pertes potentielles, ces productions proposent un vaste panel d'approches, manuelles ou assistées par l'informatique, visant toutes à synthétiser de l'information

géographique utile à la prévention et à une connaissance durable de nos territoires.

Le développement de l'Internet, des SIG et du *Webmapping* permet désormais de partager plus facilement cette information géographique sur les risques naturels au moyen d'atlas interactifs en ligne, comme en témoignent les sites « Cartorisque » du ministère de l'Environnement, « Géoportail » de l'IGN ou bien les atlas en ligne du *Pacific Disaster Center* (<http://www.pdc.org/atlas/>) et du *Coastal Services Center* de la NOAA américaine sur les trajectoires cycloniques historiques (<http://csc-s-maps-q.csc.noaa.gov/hurricanes/viewer.html>).

Figure 9
Les grandes étapes méthodologiques de l'évaluation des risques d'origine naturelle et de leur mise en carte



→ Conclusion

L'évaluation des risques et leur mise en carte reposent sur des méthodes et des techniques très diversifiées propres à chaque discipline concernée par les aléas impliqués. Ce savoir a largement bénéficié des retours d'expérience post-catastrophes et a longtemps puisé dans les approches naturalistes privilégiées par les géographes de terrain, notamment des géomorphologues. Il évolue actuellement par le biais de la modélisation et des SIG afin de construire des cartographies évolutives, parfois en temps réel et même dynamiques, de l'aléa ou de ses effets potentiels. Les géographes ont un rôle important à jouer dans la construction de cartes et d'indicateurs de risque qui puissent dépasser la seule prise en compte de l'aléa. Il y a nécessité, pour les décideurs, de disposer de cartographies des pertes potentielles, avant ou après mesures de protection, mais également des cartes de facteurs de vulnérabilité permettant d'attirer l'attention sur des groupes de population plus exposés en cas de crise. Cette intégration des vulnérabilités, en particulier humaines, dans l'évaluation des risques, passe par des diagnostics sociologiques fins, des enquêtes de perception, des analyses de comportement potentiel, des entretiens, et une véritable connaissance des territoires et des relations entretenues entre les populations vulnérables et leurs espaces de vie. Mais une analyse intégrée des risques ne peut se concevoir sans une bonne connaissance des aléas naturels impliqués et de leurs spécificités. Car les vulnérabilités, humaines, fonctionnelles ou techniques, dépendent aussi de la nature des phénomènes naturels, de leur intensité, de leur durée, de leurs effets et de leur extension spatiale.

➔ DEUXIÈME PARTIE

Les aléas d'origine géodynamique

- ➔ I. Éléments et méthodes de classification des aléas naturels
- ➔ II. Les éruptions volcaniques
- ➔ III. Les séismes et tsunamis
- ➔ IV. Les mouvements de terrain

Cette partie et la suivante décrivent les phénomènes naturels potentiellement destructeurs. Il convient de rappeler que ces phénomènes font partie du fonctionnement naturel du système Terre. À ce titre, la connaissance de ces phénomènes relève de sciences comme la géologie ou la volcanologie. Les géographes abordent parfois cette caractérisation des aléas avec leurs propres méthodes (hydrogéomorphologie...), en privilégiant une démarche naturaliste fondée sur l'observation et la cartographie, très complémentaire des méthodes de plus en plus modélisatrices des sciences de la Terre.

Nous proposons ici deux types de classifications fondées respectivement sur les causes des aléas (classification génétique) et sur leurs caractéristiques spatio-temporelles. Les principaux phénomènes d'origine géodynamique et morphodynamique sont décrits dans la diversité de leur processus, leur répartition spatiale et leurs impacts : aléas volcaniques, aléas associés aux séismes et tsunamis, mouvements de terrain et phénomènes induits. Les mécanismes en jeu sont souvent complexes : effets en chaîne, rétroaction, combinaison de plusieurs aléas naturels, combinaison d'aléas naturels et de menaces technologiques... Il faut donc raisonner en termes de scénarios, les crises majeures étant souvent issues de tels enchaînements où se combinent aléas et vulnérabilités sociales.

→ I. Éléments et méthodes de classification des aléas naturels

① Classification génétique

Les aléas peuvent se classer en fonction des causes et des processus déclencheurs de l'événement naturel à l'origine des dommages. Le tableau 9 propose donc une classification génétique simplifiée et non exhaustive des aléas naturels les plus courants. On distingue globalement deux grands types d'aléas tels qu'ils apparaissent dans les classifications internationales : les aléas d'origine climatique et ceux d'origine géologique. Les premiers se partagent en aléas climatiques directs et indirects. Dans le cas des risques climatiques directs, l'aléa frappe directement les enjeux : c'est le cas du vent lors des tempêtes ou des cyclones, des aléas liés aux températures extrêmes et aux précipitations solides comme la grêle ou la neige (vague de neige en plaine). Les aléas hydroclimatiques indirects sont plus complexes que les risques climatiques directs car d'autres facteurs que le climat interviennent dans le processus, notamment la topographie. Le risque avalancheux est clairement déterminé par la pente. De même, la dynamique et la localisation des inondations sont très liées à la topographie. Ces différences sont importantes car, dans le second cas, les zones à risques sont plus faciles à déterminer. Il est relativement aisé, si l'on s'en donne les moyens, de cartographier les zones inondables et les zones qui ne le sont pas *a priori*. En revanche, les tempêtes ou la grêle peuvent atteindre n'importe quel espace du territoire français ou européen (avec une fréquence et une intensité inégales).

Certains phénomènes naturels, comme les cyclones, combinent plusieurs « aléas » en tant qu'agent destructeur, comme le vent et les précipitations, puis plusieurs phénomènes dans ses manifestations : coulées de boue inondations, mouvements de

terrain, érosion... Il est souvent difficile de faire la part des dommages qui sont dus à tel ou tel agent.

Cette liste est évidemment restrictive. Nous avons exclu les aléas d'origine biotique (risque acridien, pandémie, épizooties). Certains aléas majeurs comme les tsunamis sont des aléas induits par d'autres phénomènes comme les séismes ou les mouvements de masse sous-marins.

Tableau 9
Classification génétique simplifiée des aléas naturels

	Naturels directs	Naturels induits ou associés	Naturels-technologiques
Aléas climatiques	Vague de froid		
	Vague de chaleur/canicule	Incendie de forêt	
	Pluie verglaçante		
	Chute de neige et de grêle		
	Brouillard		
	Tornade		
	Tempête	Submersion marine, inondation, mouvements de terrain, érosion littorale, vent de sable	
	Cyclone		
	Sécheresse	Incendie de forêt, retrait-gonflement des argiles	
Aléas hydro-climatiques	Inondation	Coulée de boue, érosion	Rupture de barrage et de digue, pollutions des eaux
	Avalanche de neige		

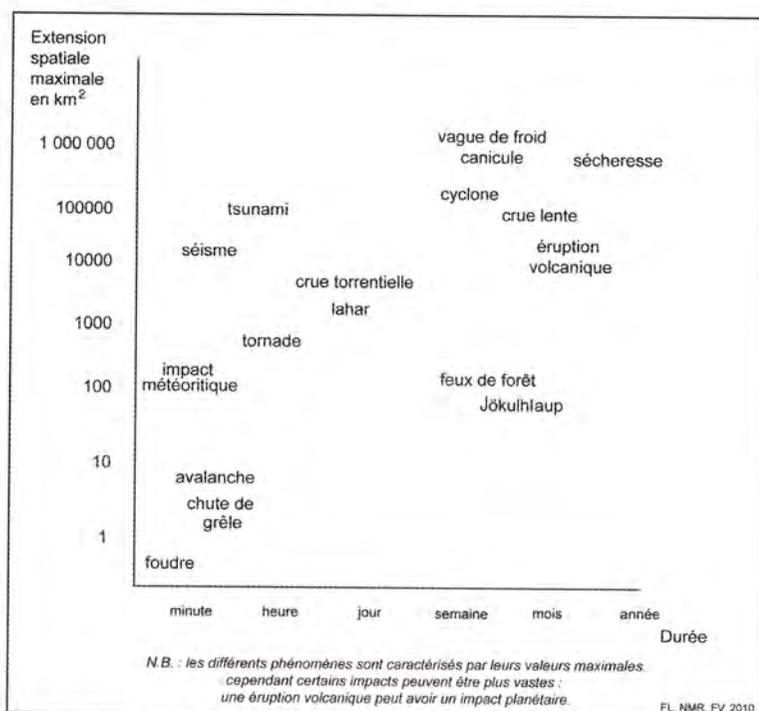
Aléas morpho-dynamiques (mouvements de terrain)	Retrait-gonflement d'argiles		
	Glissement de terrain (dont sous-marins)	Tsunami, barrage de vallée, onde de submersion, onde de choc	
	Écroulement et chute de blocs		
	Coulée de débris	Tsunami	
	Affaissements et effondrements		
Aléas géo-dynamiques	Séisme	Tsunami, subsidence, mouvements de terrain, liquéfaction, rupture de faille en surface, effets de site géologiques et topographiques	Rupture de barrage
	Éruption volcanique	Retombée de cendre et de blocs, coulée et domes de lave, émanation de gaz, coulée pyroclastique, avalanche de débris, tsunami, perturbation climatique	
Aléas extraterrestres	Impact de météorite	Onde de choc, perturbations climatiques	

FL, NMR, FV, 2010.

2 Classification spatio-temporelle

Un deuxième type de classement fait intervenir les échelles de temps et d'espace. Le spectre spatio-temporel des aléas est très vaste : il va des phénomènes quasi-instantanés et ponctuels comme la foudre ou les averses de grêle à des phénomènes de grande ampleur spatiale comme les sécheresses. La figure 10 donne un aperçu de cette diversité.

Figure 10
Classification des aléas en fonction
de leur répartition spatio-temporelle



On distinguera les phénomènes instantanés comme les séismes, les tornades ou la foudre et les phénomènes cumulatifs comme les crues lentes ou les sécheresses.

Dans le premier cas, la prévision est plus difficile à établir que dans le second cas où la situation à risque va résulter de franchissements plus ou moins rapides et progressifs de seuils critiques. Dans le second cas, les durées en jeu expliquent que l'on peut agir en amont des difficultés. De nombreux spécialistes remettent ainsi en cause la sécheresse comme principal facteur des famines. En effet, les sécheresses sont aisément prévisibles et si elles causent des victimes c'est principalement par la faute des hommes (manque de prévoyance, conflits, carence du pouvoir politique...). En revanche, les séismes, les tornades, les éruptions volcaniques constituent des phénomènes destructeurs car ils concentrent beaucoup d'énergie sur un espace restreint en peu de temps. La complexité des phénomènes tient aussi au caractère multiscalaire des impacts. Les éruptions volcaniques ont avant tout des conséquences locales mais peuvent avoir des impacts éloignés (tsunamis dans le cas des éruptions sous-marines), voire planétaires (refroidissement de l'atmosphère par les nuages d'aérosols après les grandes éruptions du Tambora, du Krakatoa et du Pinatubo). On notera également que les dommages aux biens et aux personnes ne sont pas proportionnels à l'extension spatiale du phénomène naturel. C'est la combinaison entre la magnitude, la durée et l'extension spatiale qui va déterminer la gravité de l'aléa. Les séismes et les cyclones sont à coup sûr les phénomènes les plus destructeurs compte tenu des énergies mises en œuvre. Un cyclone développe une énergie de 1 à 3 milliards de milliards de joules à l'heure, soit cinq bombes d'Hiroshima à la seconde.

Ces distinctions déterminent en particulier les stratégies de prévention face à ces aléas et aussi leur assurabilité (partie 5). La répartition spatio-temporelle, les processus et les échelles en jeu dans les aléas ont déterminé la façon d'aborder la prévention et la gestion des risques. En effet, face à un risque climatique direct de grande taille comme les cyclones, il n'est pas envisageable pour l'homme de tenter de réduire le phénomène. La seule stra-

tégie possible est de réduire la vulnérabilité des espaces touchés en renforçant la protection. De même, si l'effet de surprise dispense d'un certain nombre de responsabilités face aux aléas instantanés, ce n'est pas le cas pour les aléas cumulatifs où les situations de crise sont largement prévisibles.

→ II. Les éruptions volcaniques

① L'activité volcanique mondiale

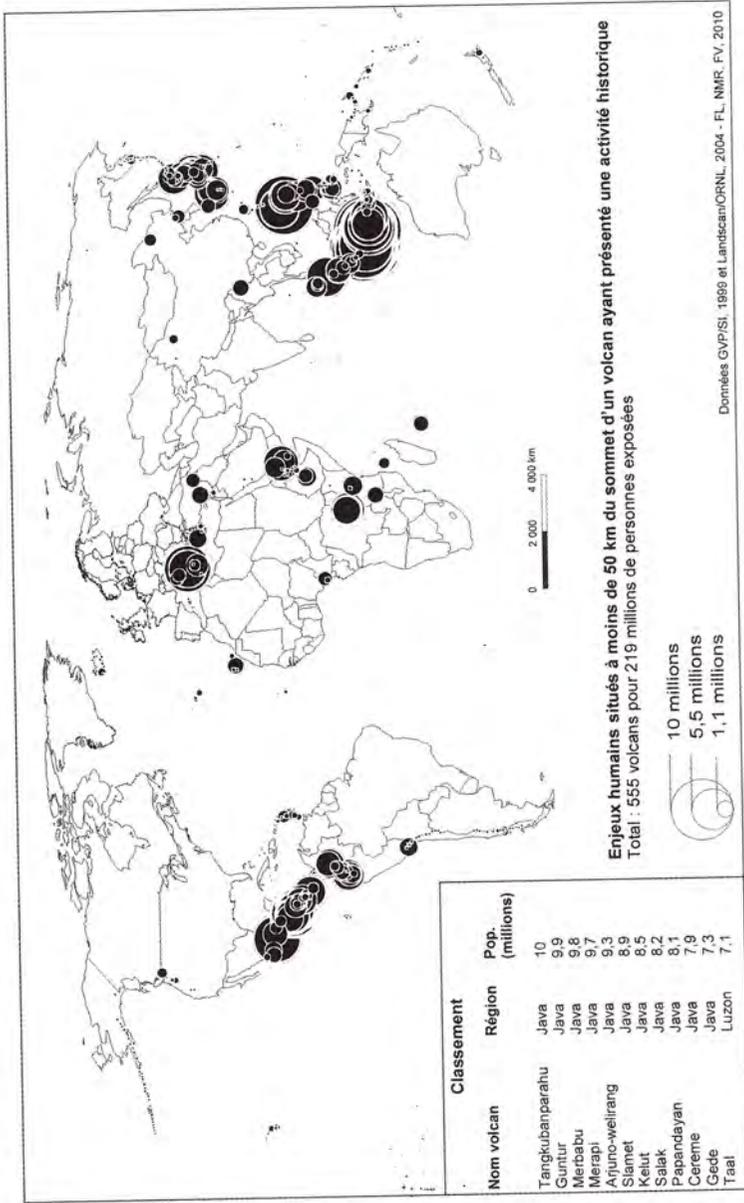
Un volcan est traditionnellement considéré comme un point d'émission de magma en surface de la Terre. Les différents produits éruptifs (gaz, lave, pyroclastes) conduisent à des formes volcaniques variées prenant le plus souvent la forme de dômes, de cônes ou de cratères d'explosion (maars). Ces expressions morphologiques ont longtemps été à la base de leur classification et témoignent de la diversité des mécanismes et produits éruptifs.

Un volcan peut être considéré actif si la période qui nous sépare de sa dernière éruption connue est inférieure à la moyenne des périodes entre ses différentes éruptions passées. Un autre critère d'activité, tout aussi arbitraire, revient à considérer des signes d'activité au cours de la période Holocène, soit depuis 10 000 ans. Sur cette base, la *Smithsonia Institution* des États-Unis recense 1 521 volcans émergés et supposés actifs à la surface du globe (voir figure 11 – *Les 1 521 volcans actifs et émergés du globe* sur www.licence.puf.com). Sur ce critère, le volcanisme de la chaîne des Puys en France est considéré comme actif puisque sa dernière phase éruptive remonte à moins de 8 000 ans. À proximité, le lac Pavin (massif des Monts Dore) est le vestige de la dernière éruption volcanique de France métropolitaine survenue il y a environ 6 000 ans. Une attention particulière doit être portée aux volcans ayant présenté des phases d'activité documentées sur la période historique, soit 555 volcans émergés, et à ceux qui présentent des fréquences éruptives élevées. Au total, ce sont près de 402 millions de personnes qui vivent à moins de 50 km d'un volcan actif, dont 219 millions sur des volcans à activité historique connue, et ce, en premier lieu en Indonésie, aux Philippines, au Japon, en Amérique latine et en

Italie (figure 12). Des villes comme Naples, Kagoshima, Quito, Arequipa ou Managua sont situées à moins de 15 km d'un cratère actif. Si l'on combine les enjeux humains avec d'autres critères d'exposition au risque volcanique tels que le type d'éruption (explosive) ou la fréquence des éruptions passées, une cinquantaine de volcans ou zones volcaniques méritent la vigilance des populations et des autorités, avec par ordre d'importance pour les premiers de la liste : champs Phlégréens et Vésuve (Italie), Rabaul (Papouasie-Nouvelle-Guinée), Kelut, Merapi, Semeru (Indonésie), mont Saint Helens (États-Unis), Santiaguito/Santa Maria (Guatemala), Mayon (Philippines), Cotopaxi (Équateur), montagne Pelée (Martinique, France). Si l'on prend le cas de la montagne Pelée, tristement célèbre pour son éruption catastrophique de 1902 (29 000 morts), ce sont 33 000 personnes qui vivent en zone d'aléa élevé, au pied de ce volcan particulièrement explosif qui a délivré vingt-trois éruptions depuis 5 000 ans dont quatre depuis l'installation des premiers colons (1790, 1851, 1902, 1929).

Les éruptions volcaniques peuvent être classées et comparées au regard des différents paramètres qui définissent la notion d'aléa : magnitude, fréquence, durée, extension spatiale. Ces paramètres sont très variables d'une éruption à l'autre et il est souvent difficile de les évaluer *a priori*. La notion de magnitude d'une éruption volcanique peut être caractérisée par l'indice d'explosivité volcanique (en anglais, *Volcanic Explosivity Index*, VEI) défini en 1982. Il s'établit sur une échelle logarithmique basée sur deux paramètres principaux : le volume de matériel émis (en m^3) et la hauteur du panache éruptif (en km). L'échelle s'étend de 0 à 8 (9 degrés), le niveau 0 étant réservé aux petites éruptions effusives, pour lesquelles cette échelle s'applique mal. Le VEI implique une relation entre le volume émis et la hauteur du panache. Sur 8 000 éruptions étudiées, une vingtaine d'éruptions historiques ont libéré un volume supérieur à $1 km^3$ ($VEI \geq 5$). Depuis l'an 1500, on dénombre seulement quatre éruptions de magnitude 6 (Long Island en Papouasie-Nouvelle-Guinée au XVIII^e siècle, Krakatoa en 1883 en Indonésie, Santa-Maria au Guatemala en 1902 et Katmaï en Alaska en 1912). Le record historique appartient au volcan Tambora (Indonésie, 1815) qui a

Figure 12
Enjeux humains situés à moins de 50 km des principaux volcans actifs et émergés du globe



produit 175 km^3 de tephra ($\text{VEI} = 7$). À l'échelle préhistorique, trois éruptions auraient atteint la magnitude 8 : au niveau du Lac Toba en Indonésie il y a 74 000 ans ($2\,000 \text{ km}^3$) et de la zone volcanique de Yellowstone aux États-Unis à deux reprises (il y a 0,6 Ma ($1\,000 \text{ km}^3$) et 2 Ma ($2\,500 \text{ km}^3$)).

D'un point de vue statistique, la fréquence des éruptions varie beaucoup en fonction des volcans mais on estime que 20 % entrent en éruption moins d'une fois tous les 100 ans et 2 % moins d'une fois tous les 10 000 ans. L'activité d'ensemble est stable au cours du temps. Depuis 1960, le nombre de volcans en éruption chaque année est compris entre 50 et 70.

Sur 3 300 éruptions étudiées ($\text{VEI} > 3$), 25 % ont duré moins d'une semaine et 45 % moins d'un mois, 40 % se sont prolongées sur une année et le reste sur plusieurs années (15 %). Un facteur important de gestion de crise volcanique concerne le déroulement d'une éruption et le temps qui sépare son début de sa phase paroxysmale. Sur 252 éruptions, ce temps a été estimé à moins d'une semaine dans 64 % des cas. Enfin, suivant sa puissance et les phénomènes considérés, l'aire de distribution des produits éruptifs, notamment des cendres volcaniques, peut atteindre plusieurs milliers de km^2 ($350\,000$ lors de l'éruption du Pinatubo aux Philippines en 1991).

Cette activité volcanique est liée à la dynamique interne du globe et se concentre préférentiellement aux limites de plaques tectoniques. Au moins 80 % du volcanisme est ainsi concentré au fond des océans sur ces zones d'accrétion que sont les dorsales médio-océaniques. La plupart des volcans émergés se localisent quant à eux à l'aplomb des zones de subduction intra-océaniques ou océan-continent. On parle de volcanisme andésitique car il est répandu dans les Andes. La ceinture de feu forme ainsi une succession d'arcs volcaniques de subduction s'étendant autour de l'océan Pacifique, de la Nouvelle-Zélande à l'Amérique du Sud en passant par les îles Aléoutiennes. Les Petites Antilles forment de même un arc volcanique actif et l'on retrouve des configurations semblables en Méditerranée (Italie, mer Égée). Ces volcans de subduction se caractérisent par une activité explosive. Le volcanisme de point chaud est un volcanisme intraplaque. Ses chaînons volcaniques viennent appuyer la théorie de l'étalement.

ment des planchers océaniques. Ces volcans sont très abondants à l'intérieur des plaques lithosphériques, surtout sur les portions océaniques des plaques. Les fonds océaniques du Pacifique en constituent un bon exemple : une multitude de ces volcans s'y trouvent, dont la plupart sont sous-marins (guyots) mais dont un bon nombre perce la surface des océans pour former des archipels comme les Carolines, les Marshall ou les îles Hawaï. Les points chauds sont stationnaires et peuvent fonctionner pendant plusieurs millions d'années. Le piton de la fournaise (île de la Réunion) est un point chaud. Il compte avec le Kilauea, l'Etna ou le Stromboli parmi les volcans les plus actifs de la planète. Un autre type de volcanisme, très complexe et diversifié, se produit également le long de certains fossés d'effondrement intracontinentaux qui préfigurent une future ouverture océanique. C'est le cas du volcanisme actif du grand rift est-africain avec les volcans Erta Ale, Dallol, Ol Doinyo Lengai, Kilimandjaro ou mont Kenya, ou bien du fossé Rhénan avec les anciens volcans du Kaiserstuhl et du Vogelsberg.

2 Les différents types de dynamismes éruptifs

Lorsque le magma extrait et éventuellement différencié en profondeur arrive en surface, il se produit l'éruption volcanique. Ce magma se compose d'un bain de silicates fondus dans lequel divers gaz sont dissous. Gaz et liquides ont tous un rôle à jouer dans les mécanismes éruptifs. La fraction gazeuse du magma, par son action physique durant le processus éruptif, est considérée comme étant le véritable « moteur » d'une éruption. Gaz et liquides sont responsables des différents types de dynamismes éruptifs. Une classification simple permet de distinguer les « volcans rouges » aux éruptions effusives relativement calmes et émettant des laves fluides sous la forme de coulées – ce sont les volcans de « point chaud » et les volcans sous-marins des dorsales océaniques – et les « volcans gris » aux éruptions explosives et émettant des laves visqueuses et des cendres sous la forme de nuées ardentes (ou coulées pyroclastiques) et de panaches volca-

niques – ils sont principalement associés au phénomène de subduction.

En se basant sur un diagramme qui lie fragmentation et dispersion des produits éruptifs (ejectas, tephres ou pyroclastes), on peut sous-différencier sept types de dynamismes éruptifs principaux qui se rapprochent des anciennes classifications morphologiques¹. Un même volcan peut présenter plusieurs dynamismes différents au cours de son histoire géologique, ou même durant une seule éruption, car la composition et la viscosité du magma peuvent varier au cours du temps. Deux types extrêmes se dégagent : le volcanisme **hawaïen**, constitué essentiellement de coulées de lave où la fragmentation est nulle (coulées de lave massives) et où la dispersion est très limitée (faible surface couverte), et le volcanisme **ultra-plinien** où la fragmentation est extrême (la lave n'existe plus que sous forme de cendres fines) et la dispersion très élevée (retombées de cendres sur de très grandes surfaces). Le contact entre l'eau et le magma peut faire apparaître deux types de dynamismes supplémentaires : dynamisme **surtseyen** lors de l'émission de lave sous faible profondeur d'eau et volcanisme **vulcanien** lorsqu'il y a contact entre l'eau et le magma.

Les éruptions volcaniques peuvent aussi se différencier en fonction de la nature des produits émis : l'arrivée de magma en surface donne des éruptions **magmatiques** tandis qu'un magma rencontrant des terrains hydratés (marais, après de fortes pluies, etc.) déclenche une éruption **phréatique** (également appelée éruption phréato-magmatique). Ce contact engendre un choc thermique qui provoque la vaporisation de l'eau et un panache volcanique composé d'une bonne part de vapeur d'eau et de lave fragmentée et solidifiée arrachée à la cheminée du volcan. D'autres éruptions sont qualifiées de gazeuses car elles ne délivrent que des gaz, parfois mortels. C'est ce qui s'est produit dans l'ouest du Cameroun en août 1986. En quelques minutes, 1 746 personnes ont été asphyxiées dans la région du lac Nyos, dont les eaux profondes sursaturées en CO₂ sont brutalement remontées à la surface à la suite d'un dégazage spontané, jaillis-

1. Hawaïen, strombolien, péléen, vulcanien, surtseyen, plinien, ultraplinien.

sant jusqu'à cent vingt mètres de hauteur et libérant un nuage composé essentiellement de gaz carbonique pur. Un événement du même type s'était déjà produit au Cameroun deux ans auparavant, à une trentaine de kilomètres de Nyos, sur le lac Monoun (34 victimes). Enfin, certaines éruptions peuvent prendre l'allure d'épanchements continus de boues chaudes. Un tel volcan de boue et de gaz se manifeste depuis 2006 dans la province orientale de l'île de Java en Indonésie (Surabaya).

3 Les aléas volcaniques

Depuis l'an 1600, tous les volcans du monde confondus ont tué près de 270 000 personnes et seulement huit éruptions ont été responsables de près des trois quarts des victimes du volcanisme : Laki (Islande, 1783, 9 300 morts), Unzen (Japon, 1792, 15 200 morts), Tambora (Indonésie, 1815, 92 000 morts), Krakatau (Indonésie, 1883, 36 000 morts), montagne Pelée (Martinique, 1902, 29 000 morts), Santa Maria (Guatemala, 1902, 6 000 morts), Kelut (Indonésie, 1919, 5 100 morts) et Nevado del Ruiz (Colombie, 1985, 25 000 morts).

On considère généralement sept aléas volcaniques majeurs. On distingue les aléas directement liés au magma tels que les coulées et intrusions de lave, les retombées aériennes de tephra (cendres, pierres, blocs), les coulées pyroclastiques (aérosols) et les émanations de gaz ; et les aléas indirects (ou induits) tels que lahars (coulées de débris), les mouvements de terrain (avalanches de débris) et les tsunamis. On peut rattacher à ces aléas indirects les famines ou épidémies apparaissant lors des éruptions majeures. D'autres aléas secondaires indirects peuvent également intervenir avec des effets dommageables au cours d'une éruption volcanique : séismes, décharges électriques, déformations du sol, ondes de choc, pluies acidifiées. Certaines éruptions peuvent obscurcir durablement l'atmosphère à l'échelle planétaire et provoquer des perturbations climatiques. Selon le type d'éruption, certains aléas vont se succéder et se chevaucher et parfois même intervenir simultanément. Notons que les lahars surviennent généralement dès les premiers stades éruptifs,

même en cas d'éruption phréatique, et qu'ils sont responsables depuis 1600 de près de 40 % des victimes du volcanisme mondial. Les coulées pyroclastiques demeurent les phénomènes les plus meurtriers : elles sont responsables de 46 % des victimes. Dans un souci de prévention, il convient de bien anticiper ces manifestations potentielles au moyen de scénarios spatialisés. Chaque type d'aléa met en œuvre des mécanismes et des processus de destruction spécifiques complexes à appréhender.

a – Les intrusions et coulées de lave

Elles se forment par arrivée du magma en surface. Dans le contexte géodynamique d'arc insulaire (volcanisme de subduction), le magma libéré est généralement très visqueux et riche en gaz (andésite par exemple), de sorte que l'on assiste plutôt à des intrusions qui conduisent à la formation de dômes sur les édifices volcaniques (Montagne Pelée par exemple). Ces intrusions constituent une menace mais dans un périmètre relativement restreint autour du point d'intrusion. Elles sont le point de départ potentiel de phénomènes éruptifs bien plus dangereux que sont les coulées et déferlantes pyroclastiques. Une faible viscosité du magma (basalte par exemple) et de fortes pentes peuvent entraîner des coulées très fluides et rapides qui deviennent coalescentes sur les flancs du volcan. Elles sont observables sur les volcans Kilauea et Mauna Loa à Hawaï ou bien sur le Piton de la Fournaise à la Réunion.

b – Les retombées aériennes

Il s'agit des chutes de cendres, de lapilli et des projections de blocs émises depuis le centre éruptif. Les projections balistiques sont émises dans un rayon de 3 à 5 km autour du cratère et ont une distribution qui n'est pas affectée par la direction des vents. Ces projections peuvent être composées soit de matériaux arrachés des parois de l'évent éruptif, soit de blocs de magma incandescent. Les pyroclastes ainsi projetés libèrent une énergie élevée à l'impact et peuvent déclencher des incendies secondaires dans les zones bombardées. Les retombées des cendres volca-

niques (fraction la plus fine) dépendent par contre de la direction des vents et de la hauteur de la colonne éruptive. Ces retombées aériennes peuvent parfois plonger les populations dans l'obscurité quasi-totale. Leur accumulation pose par ailleurs de sérieuses menaces sur le bâti, par effondrement des toits. En se basant sur l'expérience de l'éruption du mont Pinatubo (Philippines, 1991), on sait qu'une couche de cendre de 15 cm d'épaisseur détremnée par la pluie peut exercer une pression de l'ordre de 200 kg/m². La composition chimique des cendres peut se révéler par ailleurs très nocive. L'émission de cendres volcaniques et leur propagation dans l'atmosphère sont également sources de menaces pour la circulation aérienne. Les nuages de cendres fines ne sont pas détectables par les radars des avions et sont difficilement visibles par les pilotes. La rentrée d'un avion dans un tel nuage pose de graves problèmes de sécurité liés à l'abrasion des éléments extérieurs (hublots, bords d'attaque des ailes, des ailerons et de la queue, feux de signalisation...) jusqu'à des pertes de puissance voire l'arrêt total des moteurs en vol.

c – Les gaz et pluies acides

Parmi les principaux gaz volcaniques émis, on peut citer la vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), le dioxyde de soufre (SO₂), l'hydrogène (H₂), le sulfure d'hydrogène (H₂S), le monoxyde de carbone (CO), le chlorure d'hydrogène (HCl), l'acide fluorhydrique (HF), l'acide sulfurique (H₂SO₄), le radon (Rn) et l'hélium (He). Leurs effets sur l'homme et l'environnement sont loin d'être négligeables, et s'inscrivent souvent dans le long terme. L'émission de gaz peut être concomitante d'une éruption, mais peut aussi se réaliser de façon continue en période de repos éruptif. Le danger peut ainsi provenir non seulement d'importants volumes de gaz émis lors d'une activité éruptive, mais aussi d'une exposition prolongée à de faibles volumes de gaz. La composition des gaz volcaniques varie principalement en fonction du type de volcan et de son activité. En fonction de leur concentration et de la durée d'exposition, certains gaz tels que le dioxyde de soufre, le chlorure d'hydrogène, l'acide sulfurique et l'acide fluorhydrique sont responsables d'inflammations, d'irrita-

tions des yeux et du système respiratoire, voire même de corrosions de la peau et des muqueuses de l'organisme. D'autres gaz tels que le dioxyde de carbone et le monoxyde de carbone sont asphyxiants. Enfin, une exposition prolongée au radon favorise l'apparition d'affections des poumons, voire de cancers. La libération d'importants volumes de gaz volcaniques dans l'atmosphère participe aux cycles des écosystèmes, particulièrement par la formation d'aérosols et de pluies acides. Les aérosols se forment par combinaison de particules microscopiques en suspension dans des gaz (soufre, chlore et fluor), et constituent dans la stratosphère un voile absorbant et/ou réfléchissant le rayonnement solaire. La présence de ce voile peut contribuer, selon son importance, à modifier sensiblement le bilan radiatif aussi bien à l'échelle locale qu'à l'échelle du globe ; il est ainsi possible d'observer des phases de refroidissement de la planète, postérieures à des paroxysmes volcaniques majeurs. L'association de précipitations avec les gaz du panache de gaz entraîne la formation de pluies acides qui sont alors particulièrement dommageables pour l'environnement naturel et les activités humaines, et ce, sur de très grandes distances.

d – Les coulées et déferlantes pyroclastiques

Les deux termes regroupent les nuées ardentes, les nuées à cendres et à blocs ainsi que les nuées de ponces et de cendres. Il s'agit de mélanges intimes de gaz et de pyroclastes portés à hautes températures, dont le déplacement sur les flancs du volcan procède de la physique des fluides, raison pour laquelle il est souvent fait référence à un écoulement pour décrire la dynamique de déplacement de ces phénomènes éruptifs. Cette terminologie plus récente a le mérite de différencier les coulées pyroclastiques des déferlantes pyroclastiques. Les processus éruptifs de même que la dynamique interne des coulées et des déferlantes pyroclastiques sont complexes et variés, et les classifications ainsi que les vocabulaires en usage diffèrent selon les auteurs. Les propriétés physiques des coulées et des déferlantes pyroclastiques, telles que la mobilité et la vitesse, dépendent des dynamismes éruptifs en jeu (éruption explosive ou simple crois-

sance et écoulement d'un dôme) et du volume de matériaux émis. Les coulées pyroclastiques sont généralement denses et présentent une fraction solide élevée, comportant de nombreux blocs volumineux. Leur écoulement obéit à la gravité et est conditionné par la topographie, les coulées empruntant principalement les thalwegs du massif volcanique. À l'inverse, les déferlantes pyroclastiques sont essentiellement composées de particules fines (lapilli et cendres). Elles sont le plus souvent associées aux coulées pyroclastiques, qu'elles précèdent et/ou dont elles se détachent. Les déferlantes sont moins tributaires du relief et peuvent se mouvoir sur des surfaces très accidentées avec un déplacement turbulent car elles développent une importante énergie cinétique. Les vitesses de progression des coulées et des déferlantes pyroclastiques sont généralement très élevées, de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres par seconde, et atteignant parfois plusieurs centaines de mètres par seconde. Des mesures de température prises sur coulées pyroclastiques des volcans Unzen et Soufrière Hills ont donné des valeurs comprises entre 99 et 660 °C. Cet aléa est responsable de la plus grande catastrophe volcanique connue par effet d'un aléa volcanique direct. Elle s'est produite le 8 mai 1902 en Martinique (29 000 morts, 2 survivants).

e – Les lahars

Ce sont des coulées de boue et de débris d'origine volcanique. Ils procèdent de la mobilisation de produits éruptifs non consolidés, déposés sur les versants et dans les vallées d'un volcan actif. La mobilisation de ces matériaux peut intervenir soit sous l'effet des précipitations, soit sous l'effet de l'éruption elle-même par rupture d'un lac de cratère ou d'une poche d'eau sous-glaciaire ou par fonte de la neige sur le volcan. En fonction de la charge ainsi mobilisée, la terminologie peut s'affiner, en désignant par « coulées de boue » les lahars constitués de matériaux fins, et par « coulées de débris » les lahars constitués de blocs de tailles hétérogènes. Les lahars ont un potentiel érosif très élevé, et le volume des matériaux transportés s'accroît vers l'aval. À la faveur de ruptures de pente, il se produit souvent une importante

sédimentation qui peut également bouleverser la topographie initiale des zones submergées, avec le comblement de vallées, la modification des lits de rivières et la création de lacs de barrage. Les coulées peuvent être chaudes ou froides, en fonction généralement de la température des dépôts mobilisés. Les lahars sont des phénomènes indirects d'une éruption, ils peuvent se produire dès la phase phréatique des manifestations, mais peuvent se déclencher plusieurs mois, voire plusieurs années après l'éruption. Certains auteurs distinguent ainsi les lahars primaires, contemporains d'une crise éruptive, des lahars secondaires qui se déclenchent en période de repos éruptif. La dernière catastrophe volcanique la plus meurtrière est due à un lahar alimenté par la libération d'une poche d'eau sous-glaciaire au sommet du volcan Nevado del Ruiz (Colombie, 13 novembre 1985, 25 000 morts).

f – Les mouvements de terrain

Ils comprennent une large gamme de phénomènes essentiellement gravitaires aux causes très différenciées. Il peut s'agir aussi bien de simples déformations des sols, liées à l'ascension du magma, que de déstabilisations localisées de versants, de chutes de pierres et de blocs liés à l'activité volcano-sismique. Le terme englobe également l'ensemble des processus de mobilisation et de remaniement des dépôts volcaniques récents sur les édifices volcaniques. En règle générale, les phénomènes les plus spectaculaires se produisent dans la partie sommitale du volcan, la plus accidentée et soumise au maximum de contraintes mécaniques. Les mouvements de terrain peuvent apparaître très tôt dans le déroulement d'une crise éruptive, et cela dès la phase des précurseurs, les déformations de l'édifice volcanique étant l'un des signes de la progression du magma vers la surface. Ils peuvent ainsi pénaliser très tôt la gestion d'une évacuation, par l'obstruction possible de voies d'accès. Dans certains contextes, de vastes effondrements de flanc nommés avalanches de débris peuvent se produire sur les édifices volcaniques. Il peut s'agir de la déstabilisation du cône par l'intrusion du magma en profondeur, ou encore de l'évolution d'une faiblesse structurale de l'appareil volcanique (existence de fractures, activité hydrother-

male). Les avalanches de débris peuvent être accompagnées de blasts (explosions latérales dirigées) dont l'effet de souffle accentue l'étendue des zones de destruction comme ce fut le cas lors de l'éruption du mont Saint Helens aux États-Unis en 1981 (chaîne des Cascades).

g – Les tsunamis

Ils peuvent être produits par l'entrée en mer d'un volume important de matériaux volcaniques. Un écroulement de flanc ou l'entrée en mer de coulées pyroclastiques sont susceptibles d'entraîner la formation de vagues qui peuvent ainsi affecter des espaces éloignés. Deux tsunamis d'origine volcanique et de dimensions catastrophiques sont bien connus. Le premier s'est produit lors de l'éruption du volcan Santorin (anciennement Thera) en Grèce vers 1600 avant J.-C. Il dévasta la côte nord de la Crète distante de 70 km et détruisit certainement une grande partie de la flotte minoenne. Certains savants inspirés par les écrits de Platon virent dans cet événement une origine du mythe de l'Atlantide. Le second grand tsunami volcanique a été déclenché en 1883 par l'éruption du Krakatoa dans le détroit de la Sonde entre Sumatra et Java, provoquant la mort de 36 000 personnes. Une éruption sous-marine est une menace sérieuse pour tous les navires se trouvant dans les abords immédiats du centre éruptif.

h – Les séismes volcaniques

Les séismes pré-éruptifs ou syn-éruptifs sont généralement de faibles magnitudes, cependant, compte tenu de la faible profondeur des foyers, les intensités atteintes peuvent être grandes, jusqu'à VIII sur l'échelle modifiée de Mercalli. Ils sont généralement liés à la fracturation des roches sous l'effet de l'ascension du magma ou aux explosions de surface, et sont dénommés tremors. L'étendue des zones concernées par ce type de séismes est généralement très limitée, toutefois des dommages peuvent se produire, en fonction notamment des effets de site (mouvements de terrain, destruction du bâti...). Il existe donc une

menace certes modérée, mais réelle. Les expériences récentes des activités sismiques de Montserrat (1995-1996 surtout) et de la Dominique (1998) ont montré que les dommages au bâti se sont limités à l'apparition de fissures dans les secteurs proches des épicentres. Toutefois, le vécu de ces manifestations par les populations proches du volcan, avec le développement de fortes tensions nerveuses, constitue l'une des conséquences majeures de ce type d'activité.

→ III. Les séismes et tsunamis

① L'activité sismique

Un séisme ou tremblement de terre correspond à une secousse ou une série de secousses du sol plus ou moins violentes, liées au passage d'ondes élastiques. Il est déclenché par la libération brutale d'une certaine quantité d'énergie. Suivant leurs causes, les séismes peuvent être naturels (tectoniques, volcaniques) ou artificiels (mises en eau de barrages, pompages de fluides souterrains, extraction minière, explosions et essais nucléaires).

Les séismes tectoniques sont de loin les plus fréquents et dévastateurs. La majorité d'entre eux se produit aux frontières des plaques tectoniques, où existe un glissement entre deux milieux rocheux. Ce glissement, localisé sur une ou plusieurs failles, est bloqué durant les périodes intersismiques et l'énergie s'accumule par la déformation élastique des roches. Lors des séismes, le glissement se débloque et l'énergie est brusquement relâchée, généralement en plusieurs secousses. Il peut se produire plusieurs réajustements avant de retrouver une configuration stable. Ainsi, on constate des répliques suite à la secousse principale d'un séisme, d'amplitude décroissante, et sur une durée allant de quelques minutes à plus d'un an. Ces secousses secondaires sont parfois plus dévastatrices que la secousse principale car elles agissent sur des infrastructures déjà fragilisées par la secousse principale.

On constate que les épicentres des séismes récents se répartissent en trois zones principales qui représentent 80 % de l'activité sismique annuelle : péripacifique, arc des Antilles, dorsale océanique et une zone située à la limite des continents eurasiatique et africain, des Açores à Java. Entre ces zones de forte

sismicité existent de vastes territoires presque entièrement asismiques, océaniques ou continentaux comme le Canada, la Sibérie, l'Afrique de l'Ouest, l'Australie, une partie de l'ouest du continent Américain et le nord de l'Europe (voir figure 13 – *Répartition mondiale des séismes sur 30 ans (1979-2008)* sur www.licence.puf.com).

La moitié des séismes destructeurs du globe prennent naissance au niveau des zones de subduction et dissipent 75 % de l'énergie sismique de la planète. C'est le seul endroit où l'on trouve des séismes profonds de 300 à 645 km. C'est aussi dans ces zones qu'ont été mesurées les plus fortes magnitudes (9,2 en Alaska le 28 mars 1964, 9,5 au Chili le 22 mai 1960, 9,3 en Indonésie le 26 décembre 2004). Mais certains séismes ne sont pas complètement expliqués par la tectonique des plaques. Par exemple, la collision de l'Inde avec l'Asie a laissé de grandes failles dans le continent asiatique. La poussée actuelle – quoique très faible – est responsable des séismes meurtriers de Chine. Le dernier en date s'est produit dans le Sichuan le 12 mai 2008 (70 000 morts).

L'activité sismique est très soutenue aux Antilles. Elle est liée au contexte géodynamique actif de cette région du fait de l'affrontement entre les plaques nord et sud-américaines et la plaque Caraïbe, selon une vitesse moyenne de 2 cm/an. Les derniers grands séismes destructeurs sont ceux de Guadeloupe du 8 février 1843 (8,0 ; 3 000 morts) et de Martinique du 11 janvier 1839 (7,5 ; au moins 300 morts) et du 29 novembre 2007 (7,4).

La France métropolitaine est une région à sismicité modérée. On y dénombre en moyenne 600 séismes superficiels par an, dont une vingtaine de magnitudes supérieure à 3.5 ressentis par la population. Depuis le xv^e siècle, 35 événements ont dépassé l'intensité VII. Le dernier grand séisme meurtrier s'est produit il y a 100 ans dans la région de Lambesc le 11 juin 1909 (intensité VIII-IX, 46 morts, 250 blessés, 2 000 constructions endommagées). Cette activité se concentre au niveau des chaînes pyrénéenne et alpine, de la Provence, de la Côte d'Azur, des fossés d'effondrements du Rhône, du Rhin et de la Limagne et au niveau des massifs hercyniens (Armoricaïn, Vosges, Massif Central).

2 Caractéristiques des séismes

À l'échelle humaine, les séismes se produisent sur des failles préexistantes sur lesquelles se sont déjà produits des séismes. On a initialement appelé cycle sismique la répétition au cours du temps de l'ensemble séisme et déformation intersismique. Ce modèle s'apparente à celui d'un rebond élastique. C'est une façon imagée d'exprimer le fait que, lors d'un séisme, la partie fragile de la croûte fait un rebond pour rattraper le retard accumulé pendant la période intersismique. Aujourd'hui, on considère que ce cycle comporte trois, voire quatre périodes. On appelle mécanisme au foyer le mécanisme permettant de définir le type de faille qui intervient dans le tremblement de terre, ainsi que l'orientation de la faille et la direction de glissement des compartiments sur cette faille. On peut ainsi définir la nature convergente ou divergente des mouvements à l'origine des séismes. Il existe trois sortes de failles et trois sortes de mécanismes au foyer :

- **Les failles normales** : la déformation entraîne un étirement des roches initiales. Elles résultent de mouvements d'écartement (divergence).
- **Les failles inverses** : la déformation entraîne un raccourcissement des terrains initiaux. Elles résultent de mouvements de rapprochement (convergence).
- **Les failles en décrochement** : elles provoquent un déplacement des blocs uniquement dans le sens horizontal.

Les **ondes sismiques** sont des ondes élastiques qui traversent un milieu sans le modifier durablement. L'impulsion de départ est transmise de particules en particules et les vibrations engendrées par un séisme se propagent dans toutes les directions. On distingue les ondes de volume qui traversent la Terre et les ondes de surface qui se propagent parallèlement à sa surface. Ces deux trains d'ondes se succèdent et se superposent sur les enregistrements des sismomètres. Leurs vitesses de propagation et leurs amplitudes sont modifiées par les structures géologiques traver-

sées. C'est pourquoi les signaux enregistrés sont la combinaison d'effets liés à la source, aux milieux traversés et aux instruments de mesure.

La **magnitude** d'un séisme est une valeur intrinsèque au séisme, indépendante du lieu d'observation, des effets et des témoignages de la population. La notion de magnitude a été introduite en 1935 par l'Américain Charles Francis Richter pour les séismes locaux californiens afin d'estimer l'énergie libérée au foyer d'un tremblement de terre et pouvoir ainsi comparer les séismes entre eux. La magnitude de Richter mesure la part d'énergie émise sous forme d'ondes élastiques. Elle se calcule à partir des différents types d'ondes sismiques en tenant compte de paramètres comme la distance à l'épicentre, la profondeur de l'hypocentre, la fréquence du signal, le type de sismographe utilisé, etc. La magnitude n'est pas une échelle mais une fonction continue logarithmique. Ainsi, lorsque l'amplitude du mouvement ou l'énergie libérée par le séisme varient d'un facteur 10, la magnitude change d'une unité. Ainsi, un séisme de magnitude 7 sera dix fois plus fort qu'un événement de magnitude 6. En réalité, sa valeur minimale est liée à la sensibilité du sismographe. Sa valeur maximale est liée à la résistance de la lithosphère aux forces tectoniques et à la longueur maximale de la faille susceptible de se fracturer d'un seul coup. Le séisme de plus grande magnitude connu au cours de ce siècle est celui du Chili en 1960, de magnitude 9,5. La zone de rupture de la faille a atteint plus de 1 000 km de long. C'est à cause de cette limite qu'on entend parfois parler des 9 degrés de l'échelle de Richter. Les séismes de magnitude supérieure à 9 sont très rares et la magnitude 10 semble être une limite raisonnable compte tenu de la résistance des roches. Plusieurs valeurs de magnitude peuvent être ainsi calculées (magnitude locale M_L , de durée M_D , des ondes de surfaces M_S , des ondes de volumes M_B). Mais ces différentes valeurs ne sont pas très fiables dans le cas des très grands tremblements de terre. Les sismologues privilégient dans ce cas la magnitude de moment (notée M_W) qui est directement liée à l'énergie libérée lors du séisme. Des lois d'échelle relient cette magnitude de moment aux

paramètres géométriques du séisme (surface rompue et quantité de glissements sur la faille).

La magnitude d'un séisme ne doit pas être confondue avec l'**intensité macrosismique** qui se fonde sur l'observation des effets et des conséquences du séisme en un lieu donné : vibration des fenêtres, nombre de personnes qui ressentent les secousses, ampleur des dégâts, etc. On parle alors d'effets macrosismiques. Les échelles d'intensité comportent des degrés notés en chiffres romains, de I à XII pour les échelles les plus connues. On peut citer les échelles de Rossi-Forel (RF), de Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK), de Mercalli (notée MM dans sa version modifiée), de Shindo (Agence météorologique japonaise), macrosismique européenne (EMS98).

Les relations entre magnitude et intensité sont complexes. L'intensité dépend du lieu d'observation des effets. Elle décroît généralement lorsqu'on s'éloigne de l'épicentre en raison de l'atténuation introduite par le milieu géologique traversé par les ondes sismiques, mais d'éventuels effets de site (écho, amplification locale par exemple) peuvent perturber cette loi moyenne de décroissance. En France, la valeur du degré d'intensité en chaque lieu est établie à partir de questionnaires distribués par le Bureau central sismologique français aux habitants de la région touchée par le séisme. Sur la base de ces témoignages, on établit généralement après les séismes importants une carte sur laquelle figurent les courbes d'égale intensité qu'on appelle isoséistes. Le centre de la zone de plus forte intensité est appelé l'épicentre macrosismique (ou intensité épacentrale). Il peut être différent de l'épicentre réel, dit microsismique. Pour un séisme donné, on donne souvent uniquement l'intensité à l'épicentre qui est généralement la plus forte.

3 Les phénomènes induits par les séismes

Le séisme se manifeste en premier lieu par des vibrations dont l'ampleur est fonction des paramètres de la source (magnitude,

type de mouvement, profondeur, etc.), de la distance à la source, des propriétés mécaniques du sol et de la structure du sous-sol. Hormis les problèmes éventuels posés par la rupture en surface de la faille sismogène, deux familles d'effets peuvent être mises en évidence localement :

- Des effets directs dus à la modification du mouvement vibratoire (amplification ou atténuation). Il s'agit des effets géologiques et topographiques, communément appelés « effets de site ».
- Des effets induits dus à des ruptures du sol (liquéfaction, mouvements de terrain, tsunamis) qui peuvent à leur tour provoquer des dommages irréversibles.

a – Les effets de site géologique et topographique

Ils se manifestent par une modification du signal vibratoire à la surface d'un sol par rapport au signal observé sur un site de bonnes propriétés mécaniques (appelé également signal au rocher). L'effet de site géologique en un point est principalement dû aux contrastes de rigidité verticaux ou latéraux entre le sol et le substratum sous-jacent. Ce contraste de structure géologique provoque le piégeage des ondes sismiques dans les couches peu consolidées et l'apparition de phénomènes de résonance et de réflexion multiples. En surface, l'amplification des mouvements du sol peut dépasser un facteur 4 à 5 pour certaines plages de fréquences. Cet effet a été particulièrement observé lors des séismes de Mexico en 1985 et de Kobé en 1995. Des bâtiments construits sur des sédiments meubles de remplissage lacustre dans le premier cas, et marins dans le second cas, ont subi des dommages beaucoup plus importants que ceux des quartiers implantés sur des formations en place. Dans les vallées intramontagneuses remplies d'alluvions, la création et la propagation d'ondes de surface qui se réfléchissent au contact des terrains encaissants peuvent doubler, voire tripler l'effet de site. L'effet de site topographique se traduit par l'amplification ou l'atténuation du signal vibratoire. Il est provoqué par des phénomènes de réflexion ou de diffraction des ondes sismiques résultant de l'influence des reliefs. Ces ondes ont tendance à se concentrer

dans les reliefs marqués. Une topographie convexe entraîne une concentration des ondes incidentes par rapport aux sites présentant une topographie concave. Les sites topographiques les plus favorables à l'amplification correspondent aux sommets, aux lignes de crêtes et aux rebords de plateaux.

b – Les effets liés aux failles actives

Une faille active est définie comme une fracture plane ou légèrement gauche de l'écorce terrestre, le long de laquelle des déplacements tectoniques peuvent se produire. Elle est considérée comme un aléa à partir du moment où la dislocation des terrains atteint la surface (déformations et ruptures). Une manifestation extrême des conséquences du mouvement d'une faille est la subsidence ou le relèvement côtier. Ce phénomène a été observé en particulier à Gölcük lors du séisme de d'Izmit (Turquie) en 1999. Le rivage s'y est affaissé de 2 à 3 m en moyenne sur plusieurs kilomètres de long et il s'en est suivi une submersion marine jusqu'à 100 m à l'intérieur de la ville.

c – La liquéfaction des sols

La liquéfaction est un phénomène qui se produit sous sollicitation sismique. Le passage d'une onde sismique provoque dans certaines formations géologiques la perte de résistance mécanique d'un matériau sableux saturé en eau, liée à une augmentation de la pression interstitielle engendrée par les déformations cycliques. Cela se traduit par des phénomènes de tassement, le plus souvent différentiels, ou des mouvements latéraux. Cette déconsolidation brutale du matériau peut entraîner un enfoncement, voire un basculement de certaines infrastructures aux fondations peu profondes. Le phénomène de liquéfaction affecte préférentiellement les formations sableuses et limoneuses, de faible cohésion, saturées en eau et de granulométrie uniforme, comprise entre 0,05 et 1,5 mm. Le phénomène peut se produire lorsque des couches à dominante sableuse, situées sous le niveau de la nappe phréatique et à moins d'une vingtaine de mètres de profondeur, perdent leur résistance au cisaillement et se com-

portent comme un liquide sous l'effet des sollicitations sismiques. Le sable est alors éjecté en surface, donnant parfois des petites structures coniques caractéristiques appelées volcans de sable (*craterlets*). L'étendue de la zone de liquéfaction peut être très importante. Elle dépend de la magnitude du séisme. Ainsi les phénomènes de liquéfaction ont été observés jusqu'à plus de 250 km de l'épicentre lors du séisme de New Madrid aux États-Unis en 1811-1812 (8,0) et à plus de 400 km lors du séisme de 1960 au Chili (9,5).

d – Les mouvements de terrain

Les séismes sont des phénomènes déclencheurs de mouvements de terrain, essentiellement des chutes de blocs, des écroulements et des glissements, en particulier en milieu rocheux. Les paramètres de la sollicitation sismique (accélération, fréquence de vibrations, durée) viennent s'ajouter aux facteurs habituels de prédisposition des terrains aux mouvements (pente, lithologie, saturation, etc.). Ces phénomènes induits sont souvent immédiats et peuvent souvent provoquer plus de victimes que les secousses elles-mêmes. Le glissement de terrain de Las Colinas (Santa Tecla, El Salvador) provoqué par le séisme du 13 janvier 2001 (7,6) a ainsi tué à lui seul 500 personnes et s'est déclenché quelques secondes seulement après le séisme. L'écroulement rocheux catastrophique de Yungay (Pérou, 23 000 morts) a également été déclenché par un séisme de magnitude 7,7 survenu au large de la côte pacifique. Ces phénomènes ont davantage de chance de se produire si les terrains ont été préalablement préparés par de fortes précipitations. Ils peuvent aussi se produire sur les talus continentaux sous-marins des grandes zones sismiques du globe.

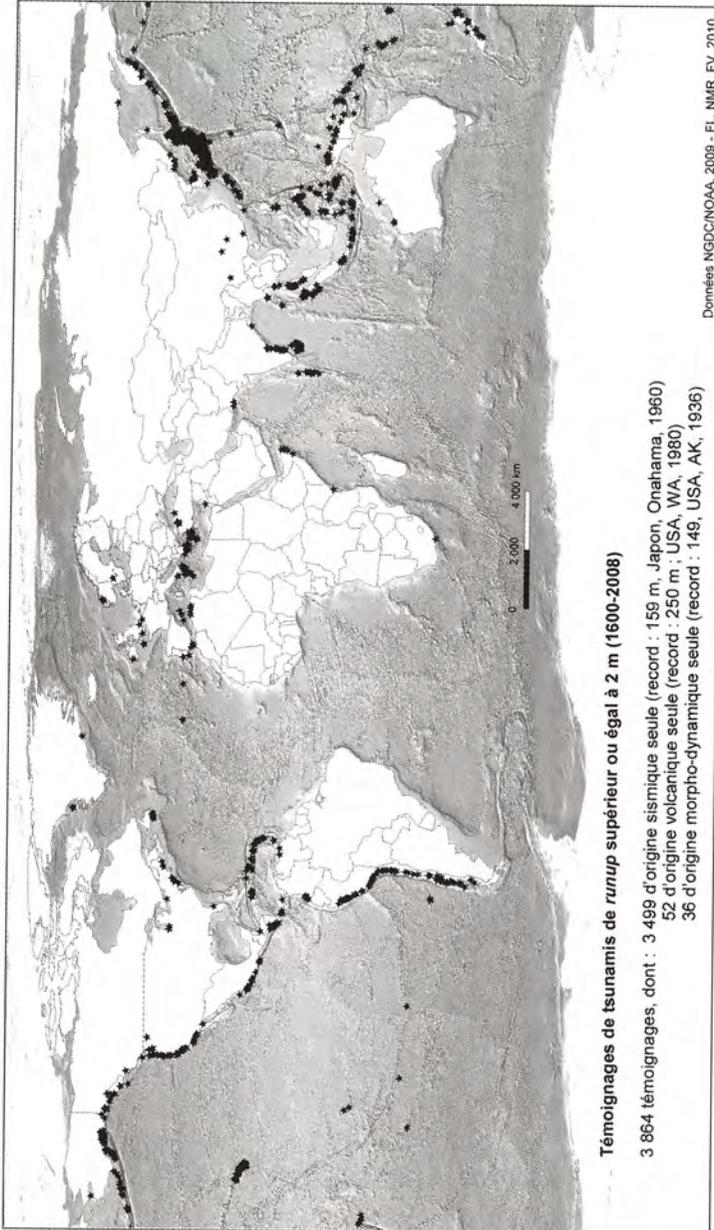
e – Les tsunamis

Un tsunami est créé lorsqu'une grande masse d'eau est déplacée. Cela peut être le cas lors d'un séisme important de magnitude généralement supérieure à 7, du fait du mouvement brutal du plancher océanique le long de la faille impliquée. La

cause peut être également un glissement de terrain côtier ou sous-marin, une éruption volcanique ou un impact météoritique. Un fort séisme ne produit pas nécessairement un tsunami. Tout dépend de la manière dont se modifie le niveau du plancher océanique aux alentours de la faille et dont la déformation est transmise à la colonne d'eau. En pleine mer, le déplacement d'eau se propage de proche en proche et crée un mouvement de grande longueur d'onde (quelques centaines de kilomètres) et de faible amplitude (un mètre). La vitesse de déplacement y est fonction de la seule profondeur d'eau, ce qui signifie par exemple qu'elle est de 943 km/h pour une profondeur de 7 km et de 504 km/h pour une profondeur de 2 km.

Certains tsunamis sont capables de se propager sur des distances de plusieurs milliers de kilomètres et d'atteindre l'ensemble des côtes d'un océan en moins d'une journée (on parle de télé-tsunamis). À l'approche des côtes, la vitesse du tsunami décroît mais son amplitude augmente avec la diminution de profondeur. Une partie de la vitesse d'oscillation de l'eau se transforme alors en un mouvement horizontal global pouvant générer des vagues de grande hauteur. Sur les côtes, c'est davantage ce mouvement horizontal et rapide (plusieurs dizaines de km/h) qui est la cause des dégâts plutôt que l'élévation du niveau de l'eau. Ainsi, un tsunami d'une hauteur d'1 ou 2 m peut s'avérer très destructeur, car la quantité d'eau qu'il transporte lui permet de déferler jusqu'à plusieurs centaines de mètres à l'intérieur des terres si le relief est favorable. La hauteur maximale atteinte par les flots sur les terres est nommée *runup*. Et l'arrivée du tsunami est bien souvent précédée d'un retrait rapide et inattendu de la mer. Le tsunami déclenché par le séisme du 26 décembre 2004 au large de l'Indonésie (9,3) a tué près de 224 000 personnes sur les côtes de l'océan indien. À cette occasion, des vagues de 20 m de haut, un *runup* record de 50 m et des pénétrations dans les terres de près de 5 km ont été mesurés sur la côte nord de Sumatra. À l'échelle mondiale, on recense près de 4 000 témoignages de tsunamis depuis le début du xvii^e siècle, avec une forte concentration dans la zone pacifique, dans la Caraïbe et en Méditerranée (figure 14).

Figure 14
Témoignages de tsunamis historiques (1600-2008)

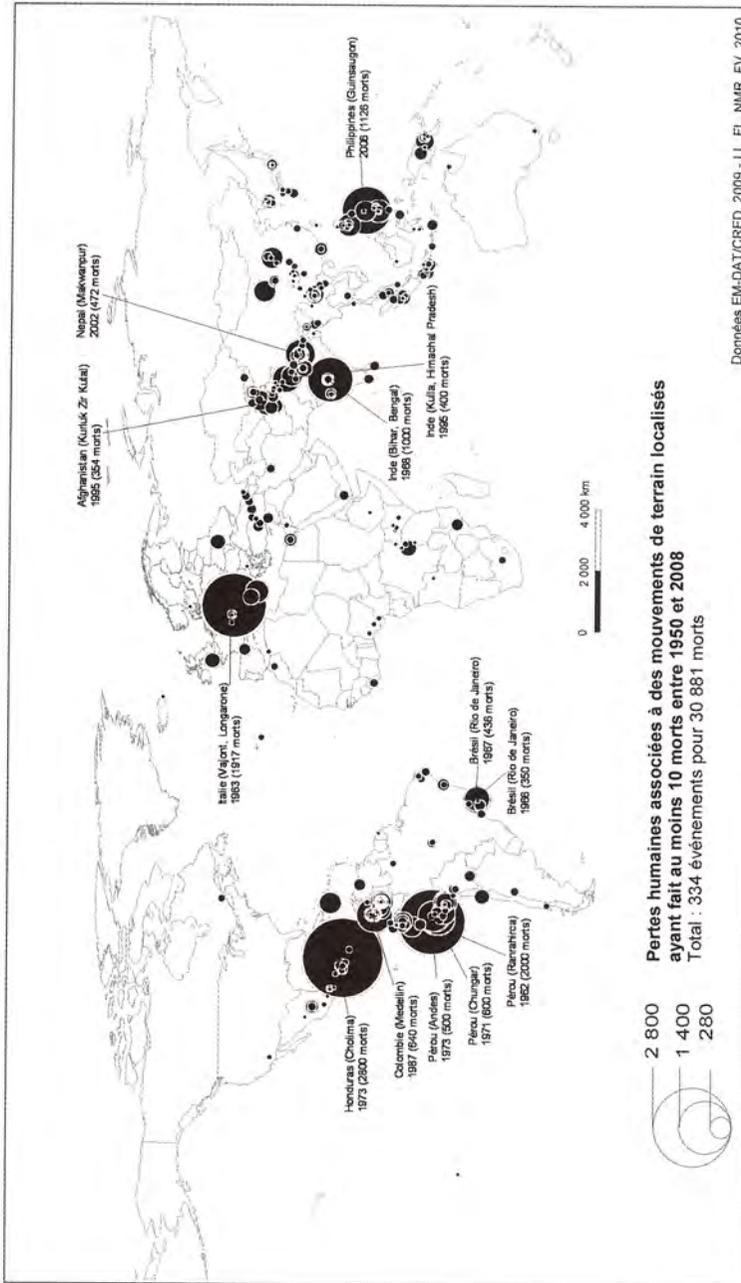


→ IV. Les mouvements de terrain

① Typologie et facteurs d'apparition

Sous la dénomination commune de « mouvements de terrain » sont regroupés des phénomènes gravitaires extrêmement divers et complexes qui impliquent le plus souvent une rupture et un déplacement simultané de matériaux. Ils mettent en jeu des mécanismes initiateurs et de propagation très variés, eux-mêmes liés à la complexité des comportements géotechniques des matériaux sollicités. Ils impliquent des volumes allant de quelques m^3 à plusieurs millions de m^3 (hm^3) et créent des dommages très inégaux (figure 15). Ce sont des phénomènes fréquents, pouvant être à l'origine d'une évolution discrète ou au contraire provoquer des déplacements en masse ou remaniés. Contrairement à l'opinion reçue, ils s'avèrent souvent meurtriers et les bilans socio-économiques de leurs impacts les placent dans la catégorie des phénomènes naturels les plus redoutés. Compte tenu de l'influence prépondérante de la gravité sur le déclenchement de la majorité de ces phénomènes, on les retrouve préférentiellement dans les zones à fortes pentes (régions montagneuses, littoraux à falaises). Une attention particulière doit être réservée aux mouvements de terrain de grande ampleur qui peuvent provoquer des phénomènes induits ou associés catastrophiques. Il peut s'agir d'effets de souffle précédant l'arrivée du mouvement, mais aussi de phénomènes hydrauliques : inondations par embâcle et ondes de submersion (débâcle) consécutives à l'obstruction d'un cours d'eau en fond de vallée, ou bien tsunamis liés à pénétration brutale d'une masse de terrain dans un plan d'eau artificiel ou naturel (lac, mer).

Figure 15
Principaux mouvements de terrain catastrophiques entre 1950 et 2008



Compte tenu de la grande diversité des phénomènes de mouvements de terrain, de nombreuses classifications existent à ce jour. Elles ont longtemps été fondées sur des critères morphologiques simples et s'appliquaient le plus souvent à une région donnée. Plus récemment, ces classifications se sont étendues en essayant de considérer un plus grand nombre de phénomènes, et ce, indépendamment du contexte régional. Elles reposent pour l'essentiel sur des critères, soit morphologiques et géométriques, soit géotechniques, soit cinématiques, soit d'une combinaison de plusieurs d'entre eux. Une classification simple basée sur la vitesse et le rythme des déformations permet de distinguer deux grandes familles de mouvements.

La première est celle des mouvements lents et continus, pour lesquels les déformations sont progressives et accompagnées de ruptures, mais sans accélération brutale. On y englobe :

- les tassements différentiels, par retrait suivi du gonflement de certains matériaux argileux, en fonction de leur teneur en eau (sécheresse géotechnique), ou bien par surcharge de certains terrains compressibles (vases, tourbes) ;
- les affaissements consécutifs à l'évolution de cavités souterraines naturelles ou artificielles. Leur évolution est amortie par le comportement souple des terrains superficiels ;
- les phénomènes de fluage de matériaux plastiques sur faible pente (solifluxion, reptation) ;
- les phénomènes de tassement de versants rocheux et fracturés, par dilatance, fauchage des couches ou poinçonnement ;
- les glissements lents, qui correspondent au déplacement en masse, le long d'une surface de rupture plane, courbe ou complexe, de sols cohérents (marnes et argiles).

La seconde famille est celle des mouvements rapides et discontinus. Ils peuvent être scindés en deux groupes, selon le mode de propagation des matériaux, en masse, ou à l'état remanié.

Le premier groupe (propagation en masse) comprend :

- les effondrements, qui résultent de la rupture brutale du toit de cavités souterraines naturelles ou artificielles, sans atténuation par les terrains de surface ;

- les chutes de pierres et de blocs provenant de l'évolution mécanique de falaises ou d'escarpements rocheux très fracturés ou altérés ;

- les écroulements de pans de falaises ou d'escarpements rocheux selon les plans de discontinuité préexistants.

Le second groupe (propagation en état remanié) comprend :

- les coulées de terre ou de débris qui résultent du transport de matériaux sous forme visqueuse sur de fortes pentes (torrents de montagne ou vallées de volcans actifs), ou qui proviennent de l'évolution du front des glissements de terrain argileux ;

- les coulées boueuses plus ou moins fluides, qui sont intimement mélangées à une quantité d'eau plus importante que dans les cas précédents et qui peuvent se propager sur de grandes distances.

Sur un plan géotechnique, le calcul du rapport des forces résistantes sur les forces motrices régissant l'équilibre d'une masse de terrain (un compartiment rocheux) conduit à la détermination d'un coefficient de sécurité. Pour garantir la stabilité du massif, ce coefficient doit être égal ou supérieur à 1. Hormis le rôle déterminant de la pesanteur et donc de la pente, certains phénomènes sont largement favorisés par la pression hydrostatique qui peut régner au niveau des surfaces de ruptures souterraines (force motrice).

Selon une démarche naturaliste plus adaptée à la cartographie de cet aléa, on a coutume de différencier les facteurs de mouvements de terrain en trois familles :

- **les facteurs permanents** (ou de prédisposition) : valeur et forme de la pente, nature lithologique, agencement tectonique, morphologie du terrain, fracturation, type de couvert végétal, etc. ;

- **les facteurs aggravants** (ceux pouvant évoluer lentement dans le temps) : teneur en eau des matériaux, érosion en bas de pente, affouillement de berges, activités et occupation anthropiques, certaines pratiques culturelles, déboisement, etc. ;

- **les facteurs déclenchants d'origine naturelle** (fortes pluies, fonte des neiges, effondrement de cavités, séisme,

cyclone, etc.) ou **anthropique** (surcharge en tête d'un talus ou d'un versant déjà instable, décharge en pied supprimant une butée stabilisatrice, rejets d'eau, explosions, etc.).

Sur un espace donné, ces facteurs peuvent être directement accessibles sous forme de paramètres physiques (pente, résistance mécanique, teneur en eau) ou bien être appréhendés indirectement sous forme d'indicateurs (type d'occupation du sol, distance à une route, indices de mouvements, densité de drainage) ou de résultats de modèles (accélération du sol en cas de séisme, coefficient de sécurité, trajectographie). Souvent, plusieurs causes interfèrent. Mais ce sont généralement les matériaux les plus fins (argiles et limons) qui posent le plus de problèmes de stabilité. Les cristaux lamellaires des argiles s'entourent parfois d'une pellicule d'eau qui leur permet de glisser les uns sur les autres. Ces roches sont dites plastiques et peuvent se déformer et glisser sous l'action de leur propre poids, même sur pente faible. L'augmentation de leur teneur en eau permet le passage vers une consistance plastique puis fluide. Elles se comportent alors comme un liquide et s'épanchent en coulée.

2 Les mouvements à évolution lente et continue

a – Les tassements de sols argileux par retrait-gonflement

Dans le cas des tassements par retrait, deux processus alternent : un retrait suivi d'un gonflement. Ils sont liés aux changements d'humidité des sols fins argileux et sévissent surtout en périodes de forte sécheresse. D'une façon générale, lorsqu'un sol argileux saturé perd de l'eau par évaporation, il diminue d'abord de volume, de façon sensiblement proportionnelle à la variation de teneur en eau, tout en restant presque saturé. Cette diminution de volume a lieu verticalement (tassement différentiel), mais aussi horizontalement (apparition de fissures de dessiccation). L'amplitude de ce tassement est d'autant plus importante que la couche de sol argileux concernée est épaisse et qu'elle est riche en minéraux gonflants (comme la smectite).

Par ailleurs, la présence de drains et surtout d'arbres (dont les racines pompent l'eau du sol jusqu'à 3 voire 5 m de profondeur) accentue l'ampleur du phénomène en augmentant l'épaisseur de sol asséché. Une sécheresse durable, ou simplement la succession de plusieurs années déficitaires en eau, sont nécessaires pour voir apparaître ces phénomènes.

b – Les tassements par compression

Ils sont liés à la diminution de volume de certains sols compressibles (vases, tourbes, marnes et argiles peu consistantes) sous l'effet des charges qui leur sont appliquées. Ces phénomènes peuvent atteindre une extension considérable, en particulier lorsqu'ils sont liés à des pompages de fluides souterrains (surexploitation d'aquifères, cas de la ville de Mexico) ou à des soutirages de matériaux fins. Le tassement s'accompagne d'une diminution de la porosité et, le cas échéant, d'une expulsion d'eau. Comme pour les retraits-gonflements, ces tassements différentiels se traduisent sur les constructions par des fissurations en façade, souvent obliques et passant par les points de faiblesse que constituent les ouvertures. Les désordres se manifestent aussi par des décollements entre éléments jointifs (garages, perrons, terrasses), ainsi que par une distorsion des portes et fenêtres, une dislocation des dallages et des cloisons et, parfois, la rupture de canalisations enterrées (ce qui vient aggraver les désordres car les fuites d'eau qui en résultent provoquent des gonflements localisés).

c – Les affaissements

Les affaissements résultent de l'évolution lente et progressive de cavités souterraines dont l'effondrement du toit est amorti par le comportement souple des terrains superficiels. L'affaissement se traduit par une dépression topographique sans rupture apparente, parfois en cuvette. Ces cavités peuvent être naturelles ou bien artificielles. La composante verticale du mouvement est prépondérante. Des efforts de flexion, de traction, de cisaillement et des tassements différentiels peuvent se manifester dans les zones

de bordure. Dans certains cas, les affaissements peuvent être le signe annonciateur d'effondrements.

d – Les glissements de terrain

Les glissements correspondent à des déplacements de masses de terrain cohérentes le long d'une surface ou de plusieurs surfaces de rupture qui peuvent être circulaires (glissements rotationnels ou circulaires), planes (glissements plans) ou mixtes (glissements complexes). Les profondeurs des surfaces de glissement sont très variables, de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres – voire une centaine de mètres –, ce qui implique parfois de très grands volumes (de plusieurs millions hm^3).

La vitesse de ces phénomènes est variable et va en général de quelques millimètres à quelques décimètres par an. Néanmoins, en phase paroxysmale, ces derniers peuvent progresser à des vitesses beaucoup plus élevées (quelques décimètres à quelques mètres par jour), voire se produire de façon instantanée, notamment dans le cas des glissements plans de type couche sur couche en massif rocheux.

Les glissements rotationnels affectent préférentiellement les formations meubles à forte cohésion, non stratifiées et peu litées, à base d'argiles et de limons. Ils se caractérisent par leur surface de rupture émergeant à l'amont avec une inclinaison proche de la verticale. La conséquence en est souvent la déstabilisation des terrains situés à l'amont, d'où une tendance régressive vers l'amont de ces glissements, selon un mécanisme rotationnel répétitif. La régression de l'instabilité peut ainsi gagner très rapidement ou progressivement des terrains éloignés de la rupture initiale. Morphologiquement, ces glissements s'identifient par la forme et la raideur de leur niche d'arrachement en tête et latérale, par la zone déprimée subhorizontale ou en contre-pente qui lui fait suite à l'aval, par les arrachements secondaires, par les crevasses et replats successifs de la zone médiane et par les bourrelets de freinage et d'accumulation de la zone ventrue de pied. D'autres indices caractéristiques peuvent être observés dans les glissements de terrain actifs : fissures, bourrelets, arbres basculés, zones de rétention d'eau, etc.

Si le mécanisme même du glissement n'engendre pas ou très peu de remaniements des matériaux dans la masse glissée, ce remaniement a cependant toujours lieu, dans un deuxième temps, dans le pied du glissement, dès que celui-ci déborde en aval la surface de rupture. Le remaniement des matériaux est d'autant plus grand que le transport de ceux-ci est plus important au-delà de la zone de rupture. Dans le cas limite, celle-ci peut être vidée de l'ensemble des matériaux glissés. Ces derniers peuvent se déplacer au-delà de la zone de rupture selon un mécanisme éventuellement autre que celui d'un glissement (coulée de boue, de débris, etc.).

Les glissements plans (ou translationnels) se produisent à la faveur d'une surface plane de discontinuité, de faiblesse ou de rupture préexistante. Cette surface peut être un niveau argileux de la couverture meuble, la surface de contact entre la couverture meuble (altérites) et la roche mère, un joint stratigraphique du massif rocheux orienté selon la pente du versant (glissement couche sur couche), une discontinuité tectonique, une faille ou un système de fractures prédominant. Les cas les plus fréquents sont les glissements couche sur couche (banc sur banc) ou ceux se produisant au contact d'un substratum altéré en surface. Un bel exemple est celui du Claps, survenu en 1442 dans la haute vallée de la Drôme. Le rôle de l'eau est très important également pour ce type de glissement : lubrification, effet sur les argiles, sous-pressions, forces de percolation. En zone tropicale, le contraste de perméabilité marqué entre la couverture meuble (épaisse et altérée) de surface et la roche mère sous-jacente favorise les circulations d'eau et la mise en place d'argiles de type smectite qui agissent comme une couche « savon ».

③ Les mouvements à évolution rapide et discontinue

a – Les effondrements

Ce sont des déplacements verticaux instantanés de la surface du sol qui résultent de la rupture brutale du toit ou des appuis

de ces cavités souterraines préexistantes. Contrairement au cas des affaissements progressifs qui procèdent de la même origine, cette rupture se transmet jusqu'en surface sans atténuation par les terrains formant couverture. Elle se manifeste par l'ouverture d'excavations grossièrement cylindriques, dont les dimensions en surface dépendent du volume des vides souterrains effondrés et des caractéristiques géologiques des terrains. On nomme ces ouvertures « dolines » dans les régions karstiques, et « fontis » dans les zones de marnières.

Hormis le cas de cavités d'origine strictement minière, deux causes naturelles peuvent être à l'origine des vides et des mouvements qui en résultent. Il s'agit de la disparition de matière soit par dissolution dans les calcaires et dans les gypses – c'est le phénomène de karstification (ouverture d'avens...) –, soit par l'entraînement des fractions fines d'une formation meuble par des écoulements souterrains (érosion interne) – c'est le phénomène de suffosion.

b – Les chutes de blocs et les écroulements

Ces phénomènes résultent de l'évolution d'escarpements plus ou moins abrupts, sous l'action de la gravité. On utilise généralement le terme de chute pour des pierres (volumes inférieurs à 1 dm^3) ou des blocs (volumes supérieurs à 1 dm^3) qui tombent isolément ou en groupe. On lui substitue celui d'écroulement quand il s'agit de la chute soudaine d'une masse rocheuse qui, se détachant d'une paroi ou d'un versant très raide, tombe en se désorganisant.

Les blocs peuvent rouler et rebondir, puis se stabiliser dans une zone dite d'épandage. La trajectoire la plus fréquente suit en général la ligne de plus grande pente, mais on peut observer des trajectoires très obliques résultant notamment de la forme géométrique de certains blocs (plaque roulant sur la tranche) et de petites irrégularités du versant. Les distances parcourues sont fonction de la taille, de la forme et du volume des blocs éboulés, de la pente du versant, de la nature du sol, et de la densité de la végétation.

Tous ces phénomènes se caractérisent par une rupture brusque, de très grandes vitesses de transport et un milieu de transport essentiellement aérien. Le terme d'écroulement peut être réservé à l'accumulation chaotique elle-même, appelée aussi parfois « éboulement ». On peut distinguer l'écroulement d'une masse rocheuse produit par le basculement d'un panneau ou de tout un rebord d'escarpement, de l'écroulement d'une corniche ou falaise en surplomb lié à un sapement mécanique de pied, sur un littoral par exemple.

Certains écroulements de grande ampleur peuvent mobiliser des volumes de matériaux atteignant plusieurs dizaines de millions de m³ et semblent obéir à des lois de propagation faisant intervenir des mécanismes complexes. Au sein de l'écroulement, la densité des matériaux en mouvement et l'énergie sont telles que les éléments progressent par chocs répétés entre eux et transmission de l'énergie cinétique de bloc à bloc. C'est ce processus qui explique les distances de transport considérables des plus grands écroulements connus tels que celui d'Elm (1881, Suisse), celui du mont Granier (1248, France) et ceux du mont Huascarán (1962 et 1970, Pérou).

c – Les coulées de débris et de boue

On peut regrouper sous cette appellation tous les phénomènes d'écoulement plus ou moins rapides à forte teneur en eau, accompagnés d'un fort remaniement des matériaux et présentant une consistance plus ou moins visqueuse. Les distinctions entre les différents types de coulées reposent sur la nature des matériaux (notamment la courbe granulométrique et la cohésion) et sur l'importance de la fraction liquide. Ces phénomènes s'amorcent en amont des versants dans une zone de départ par apport de matériaux et d'eau. Ils s'écoulent dans une zone de transit relativement canalisée et se délestent en matériaux dans une zone de dépôt en donnant un cône de déjection.

Les coulées de débris se produisent à partir de formations rocheuses bien stratifiées, en place ou préalablement disloquées. Ce sont des phénomènes se produisant sur des versants à pente assez forte à forte. Le déplacement des matériaux est égal à

plusieurs fois, voire plusieurs dizaines de fois, la dimension de la surface de rupture. Les vitesses sont généralement comprises entre 0,5 et 15 m/s. Le volume de matériaux concerné reste relativement limité, en règle générale inférieur au million de m³, encore que certains glissements géants puissent être assimilés à des coulées de débris extrêmement rapides (« *sturzstrom* »), comme à Mayunmarca au Pérou en 1974.

Les bassins torrentiels à fortes pentes des régions montagneuses présentent des phénomènes d'écoulement hyperconcentrés que l'on dénomme en France « laves torrentielles ». Ils se forment par enrichissement subit et considérable du débit d'un torrent en matériaux solides qui accroissent très fortement son pouvoir érosif. Par rapport aux autres coulées, les laves torrentielles se distinguent sur le plan morphodynamique par le transport de blocs pouvant atteindre de très grosses tailles (jusqu'à 200 m³), une concentration solide élevée (80 à 90 % du volume), des vitesses fortes (1 à 10 m/s), des débits élevés et des volumes considérables.

Les coulées de boue sont générées par la mise en mouvement de matériaux sans cohésion – ou l'ayant perdue dès la mise en mouvement – et qui sont intimement mélangés à une quantité d'eau (avant ou après la mise en mouvement). Les matériaux constitutifs d'une coulée boueuse peuvent être indifféremment tous ceux susceptibles de perdre leur cohésion. Il peut s'agir d'argiles, d'argiles limoneuses, de limons, de couche superficielle terreuse, de colluvions fines, de moraines diverses, mais aussi de roches argilo-limoneuses ou schisteuses décomposées, voire d'éboulis très fins. L'eau peut-être intégrée aux matériaux avant le déclenchement de la coulée (dans le cas d'argiles, de limons), soit apportée au moment de la rupture par une résurgence massive d'eau souterraine (dans le cas notamment des régions à régime karstique et des grands glissements latents) ou par une concentration d'eau de ruissellement.

Il existe deux types particuliers de coulées boueuses, propres aux reliefs volcaniques actifs. Les premières se dénomment lahars (terme d'origine indonésienne). Il s'agit de coulées fluides et rapides (plusieurs dizaines de km/h), empruntant leurs matériaux solides aux formations de cendres volcaniques fraîchement

déposées et sans cohésion. Les secondes sont les *jökulhlaups* (de l'islandais « course de glacier ») ou débâcles glaciaires. Les plus fréquentes se déroulent en Islande mais elles peuvent se produire dès qu'un volcan recouvert d'une calotte glaciaire ou d'un inlandsis entre en activité (c'est le cas en Alaska, États-Unis, Antarctique, Andes, etc).

4 Les phénomènes induits par les mouvements de terrain

Les mouvements de terrain de volume important (glissements, écroulements) peuvent provoquer des phénomènes induits de nature hydraulique dont les effets vont largement dépasser l'aire d'impact directe du mouvement. On peut distinguer deux configurations distinctes ayant provoqué dans le passé des catastrophes sans précédent.

a – L'obstruction d'un cours d'eau

Le barrage d'un cours d'eau situé en fond de vallée peut se produire lorsque le mouvement de terrain mobilise un volume important (plusieurs millions de m³). L'eau s'accumule alors en arrière de la retenue et inonde la vallée à l'amont (embâcle). Lorsque le niveau de la retenue atteint le sommet du barrage naturel – ou parfois avant –, il peut se produire une rupture partielle ou totale de celui-ci et une vidange accélérée du lac de retenue. La débâcle qui s'ensuit génère une onde de submersion qui peut alors balayer sur des dizaines de kilomètres la portion de vallée avale en détruisant tout sur son passage. La rupture peut intervenir très rapidement – lorsque la masse glissée ou écroulée offre peu de cohésion –, ou au contraire plusieurs mois ou années plus tard. La rupture peut être provoquée par la percolation en cas d'infiltration excessive dans le barrage. Un scénario de ce type est envisagé sur le site de Séchilienne dans la vallée de la Romanche au sud de Grenoble en Isère.

D'une façon générale, la rupture des barrages naturels dépend de leur taille, de leur géométrie et de leur composition

ainsi que du débit entrant de la rivière et de la présence ou non de contrôles rocheux. Le plus souvent, leur durée de vie est courte. Néanmoins, certains barrages naturels résistent et deviennent permanents, créant un lac de retenue qui persistera jusqu'à son remplissage par des apports alluviaux. Le plus grand glissement des temps historiques, celui d'Usoy au Pamir (2,5 milliards de m³), a créé un lac de retenue permanent de 53 km de long et 284 m de profondeur.

b – La pénétration d'une masse de terrain dans un plan d'eau

Un tel phénomène peut produire une vague déferlante (raz de marée ou tsunami) qui vient submerger les rives de ce plan d'eau. C'est par exemple ce qui s'est produit en 1958 dans la baie de Lituya en Alaska, consécutivement à un écroulement rocheux déclenché par un séisme. La lame d'eau générée, d'une hauteur estimée à 600 m, est venue tuer deux riverains et détruire de nombreux hectares de forêt. Dans certains cas, cette lame d'eau peut se propager vers l'aval lorsqu'elle affecte par exemple un lac artificiel. Cette configuration est à l'origine de la catastrophe du mont Toc, survenue dans les Alpes italiennes le 9 octobre 1963. Un glissement rocheux rapide (volume de 270 millions de m³ et vitesse maximale de 150 km/h), provoqué par la mise en eau du lac artificiel de Vajont, a produit au contact de ce lac l'éjection d'une lame d'eau de 300 m de haut qui s'est propagée vers l'aval, après avoir franchi le barrage-voûte (hauteur de 150 m). Celui-ci a résisté mais la vague est venue détruire le bourg de Longarone situé dans la vallée du Piave et tuer 2 117 personnes. Sur les littoraux volcaniques des Petites Antilles, des parties de flancs de volcans déstabilisés peuvent brutalement glisser vers la mer et générer également des tsunamis catastrophiques. De tels phénomènes se sont produits dans le passé, notamment en Guadeloupe et en Martinique.

→ Conclusion

Les menaces géologiques se caractérisent par une grande diversité de processus d'endommagement. C'est en particulier vrai pour le volcanisme et les mouvements de terrain dont les effets combinés sont très difficiles à anticiper et à modéliser dans une perspective d'évaluation des risques associés. La modélisation probabiliste prend habituellement en compte les intensités, ou les magnitudes maximales probables, sur une période de référence donnée, et les extensions spatiales associées. C'est notamment l'approche suivie pour le zonage sismique à l'échelle régionale. Une approche plus déterministe tend à reconstituer l'extension et l'intensité de phénomènes déjà produits dans le passé à partir de leurs témoignages (géomorphologiques, sédimentaires, mais aussi documentaires), en lien avec certains facteurs de prédisposition ou d'aggravation. Une autre caractéristique de certains aléas géologiques comme le volcanisme ou les glissements de terrain est la durée d'action qui peut se prolonger plusieurs années, voire au-delà pour certains glissements de terrain lents mais actifs, ce qui complique d'autant la gestion des risques ou des crises associés. *A contrario*, un autre aléa, d'origine extraterrestre avec les astéroïdes, peut avoir des effets immédiats aux conséquences irréversibles pour notre planète. On entre ici dans le champ des pires scénarios imaginables pour l'homme, mais heureusement à très faible probabilité. En effet, l'histoire humaine écrite ne relate que deux impacts de météorite sur Terre. L'énergie libérée lors de ces impacts peut entraîner la dispersion d'une quantité considérable de particules dans l'atmosphère, suffisante pour modifier brutalement et durablement le climat. Les astronomes dénombrent 900 objets volants potentiellement dangereux dont le diamètre est compris entre 1 et 10 km. Actuellement, 70 objets

d'une taille inférieure à 1 km pourraient s'approcher de la Terre au cours du prochain siècle. Ainsi, Apophis, un astéroïde de 270 mètres découvert en 2004, pourrait percuter la Terre le 13 avril 2036. Selon les experts, le risque de collision est de 1 chance sur 12 346 000, autrement dit quasiment impossible. Il a été dernièrement rétrogradé du niveau 4, puis 1 et enfin 0 de l'échelle de Turin. Ces données seront affinées dans les années à venir car elles sont toujours incertaines.

➔ TROISIÈME PARTIE

Les aléas d'origine hydroclimatique

- ➔ I. Les aléas climatiques directs
- ➔ II. Les aléas climatiques indirects
- ➔ III. Conclusion : risques d'origine
climatique et réchauffement
de l'atmosphère

Cette partie, dans la continuité de la précédente, présente les phénomènes naturels potentiellement destructeurs ayant une origine atmosphérique. Là encore, ces phénomènes qui caractérisent le système Terre sont étudiés par des disciplines spécialisées comme la météorologie, l'hydrologie, etc. Les géographes se situent souvent à l'interface entre ces disciplines et peuvent parfois proposer une démarche globale (approche hydrogéomorphologique des crues inondantes). Les deux types de classification, génétique et spatio-temporelle, présentés dans le premier chapitre de la partie précédente nous amènent à aborder successivement les aléas climatiques directs (liés au vent, à la grêle et à la neige, aux excès thermiques brutaux ou cumulatifs) puis les aléas climatiques indirects comme les avalanches, les inondations et les feux de forêt. L'émergence de nouveaux risques (risques diffus ou environnementaux) n'est pas abordée en tant que telle car le poids respectif des différents processus à l'œuvre, y compris naturels, est encore mal connu. Les considérer comme risques naturels à part entière est donc difficile (nuisances aviaires en ville, risques sanitaires). C'est donc en conclusion de cette partie que sera abordé à titre d'exemple le thème, d'actualité mais à nuancer, du lien entre changement climatique et risques naturels.

→ I. Les aléas climatiques directs

① Les aléas liés au vent : cyclones, tempêtes et tornades

Le terme « cyclone » désigne un objet météorologique dans lequel les vents sont en rotation autour d'un centre de basse pression. Il s'oppose en météorologie aux centres de haute pression que sont les anticyclones. Les cyclones tropicaux n'ont pas de discontinuité frontale et se développent dans l'air chaud. Les tempêtes des latitudes moyennes sont liées à des dépressions frontales. Si leur structure et leurs conditions de formation sont différentes, ces objets météorologiques sont potentiellement dommageables par les fortes vitesses de vents et parfois les précipitations intenses qui les accompagnent.

a – Les cyclones tropicaux

Ils sont extrêmement puissants et sont, avec les séismes, les phénomènes naturels les plus meurtriers et les plus dommageables à la surface du globe.

Lorsqu'ils sont en plein développement, les cyclones tropicaux mesurent environ un millier de kilomètres de diamètre (un cyclone tropical couvrirait largement la France entière). L'œil de quelques dizaines de kilomètres de diamètre est une zone relativement calme de basses pressions au centre du cyclone. En périphérie immédiate de cet œil, le mur constitue le cœur du phénomène dangereux avec de fortes précipitations et les vents les plus forts. Les masses nuageuses se répartissent en spirale autour de l'œil. On mesure leur développement et leur force par l'imagerie satellite. Un indice de puissance du cyclone est la température du sommet des nuages, qui est inversement propor-

tionnelle à leur altitude. On a mesuré sur le Pacifique des températures des sommets de nuage à -80 °C , ce qui suppose que ces nuages atteignent l'altitude de 17 000 m et crèvent parfois la tropopause.

Les vitesses de vents et la pression atmosphérique déterminent une gradation d'intensité qui débute par les dépressions tropicales puis les tempêtes tropicales (voir tableau 10 – *Classification des dépressions tropicales et des cyclones selon leur intensité* sur www.licence.puf.com). Au-delà, la tempête se transforme en cyclone. Les tempêtes tropicales sont baptisées par un prénom masculin ou féminin en alternance et successivement dans la saison par ordre alphabétique. Ainsi, dans chaque zone cyclonique (Caraïbe, Océan Indien, etc., voir figure 16) le premier cyclone de la saison commencera par A, le second par B et ainsi de suite. Le cyclone Katrina qui frappa la Louisiane à la fin août 2005 était donc le onzième de la saison dans l'aire caraïbe. Les cyclones sont classés selon la vitesse moyenne des vents mesurés sur une minute. On associe à ces classes des surcotes marines et les impacts potentiels.

La force du vent est proportionnelle au carré de sa vitesse. Lorsque cette dernière double, la puissance destructrice du vent est multipliée par quatre. Pour un vent de 50 km/h, la pression exercée par le vent sur une surface est équivalente à 13 kg/m^2 . Elle est de 51 kg/m^2 pour un vent de 100 km/h et de 204 kg/m^2 à 200 km/h.

Les cyclones requièrent trois conditions de formation :

- une température de surface océanique supérieure à 26 °C sur plusieurs dizaines de mètres de profondeur ;
- une couche d'air chaud et humide de plusieurs milliers de mètres d'épaisseur sans cisaillement de vent ;
- une distance suffisante par rapport à l'équateur d'au moins 5° de façon à ce que la force de Coriolis soit suffisante pour susciter la rotation des vents.

Les cyclones tropicaux naissent à l'est ou au centre des océans et se déplacent ensuite vers l'ouest. Il faut imaginer les cyclones comme des objets météorologiques autonomes portés

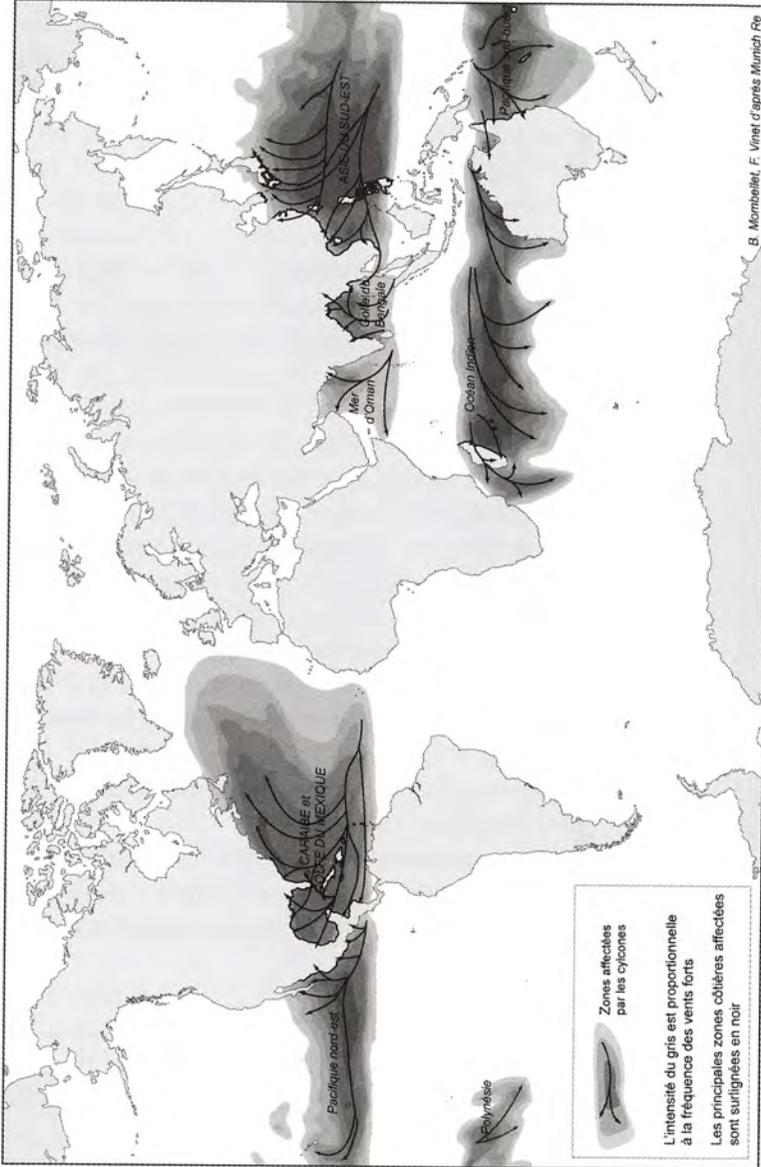
par le flux de l'alizé. Au cours de leur course sur les surfaces océaniques chaudes, les cyclones alimentés en énergie par la chaleur latente se renforcent. Ils terminent leur vie (8 à 10 jours après en moyenne) en pénétrant sur les continents ou en se déplaçant vers des mers plus froides où ils sont repris par la circulation d'ouest des latitudes moyennes. Quelques fortes tempêtes qui frappent à l'automne l'ouest de l'Europe sont ainsi d'anciens cyclones nés dans l'Atlantique équatorial. Ce cycle de vie des cyclones explique la géographie des zones exposées (figure 16).

Les côtes ouest des continents de la zone chaude sont les secteurs les plus exposés. Ouragans ou hurricanes dans la Caraïbe et au sud des États-Unis, les cyclones sont dénommés typhons en Asie du Sud-Est où ils touchent les pays côtiers depuis les Philippines jusqu'au Japon. Les cyclones se forment aussi dans le golfe du Bengale et plus rarement dans la mer d'Oman. Ils frappent l'Inde, le Bangladesh, la Birmanie. Même s'ils ne sont pas les plus puissants observés dans le monde, les dégâts sont souvent catastrophiques car ils touchent des côtes basses où vivent des populations nombreuses et vulnérables. Le cyclone Nargis qui a frappé la Birmanie (Myanmar) les 2 et 3 mai 2008 a engendré 138 366 morts et a affecté 2 millions et demi de personnes (source CRED). Le bilan a été aggravé par le manque de réaction des autorités et l'incurie des secours, le pouvoir militaire en place ayant refusé l'accès aux zones dévastées à l'aide internationale. L'Océan indien est également exposé : îles Mascareignes, Madagascar et Mozambique principalement.

En revanche, certaines zones tropicales sont épargnées, comme les côtes brésiliennes : elles le doivent à des remontées d'eau froides océaniques qui empêchent toute ascendance atmosphérique.

La saturation en vapeur d'eau de l'air chaud et les fortes ascendances dans les cyclones favorisent les précipitations intenses. Les cumuls de l'ordre de 200 à 400 mm en quelques jours sont courants au passage des cyclones. Lors du passage de Katrina, les précipitations ont dépassé 350 mm en cinq jours sur la Louisiane. Sur les reliefs, l'effet orographique renforce ces précipitations. Sur l'île de la Réunion, le passage du cyclone Colina s'est accompagné de records mondiaux de précipitations

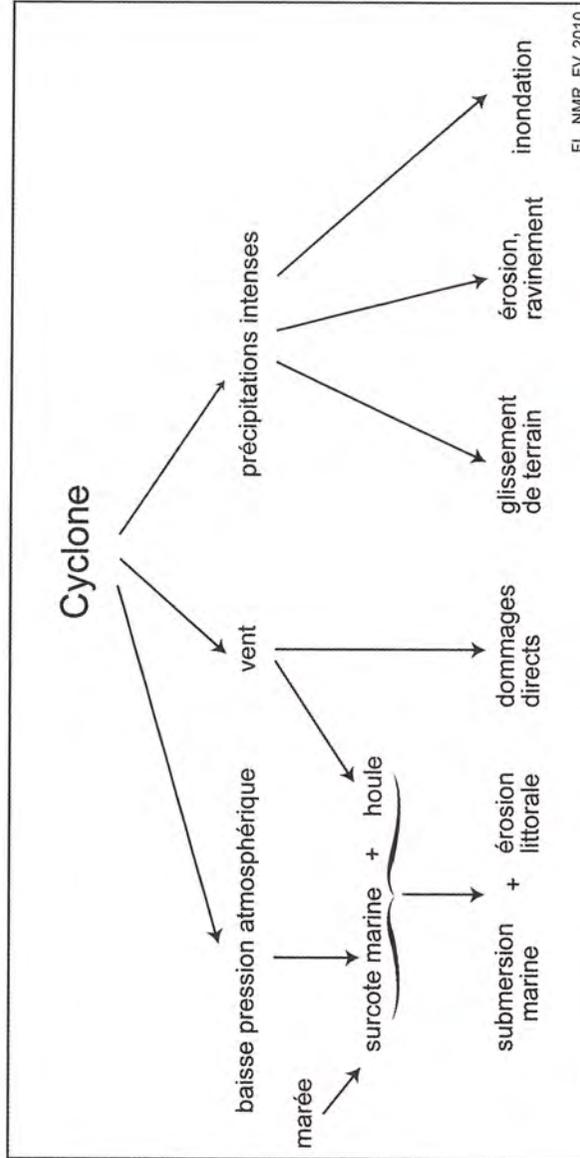
Figure 16
Espaces océaniques et littoraux exposés aux cyclones dans le monde



sur 24 heures à 15 jours avec 1 825 mm en 24 heures les 7 et 8 janvier 1966 et 6 083 mm en 15 jours en janvier 1980 lors du passage du cyclone Hyacinthe. Les forts épisodes pluvieux se traduisent par des coupures de routes, soit à cause de glissements de terrain sur les versants des cirques (cirque de Cilaos), soit par la crue des cours d'eau qui détruisent les radiers (passages à gué). La route littorale qui relie le nord au sud de l'île par l'ouest est régulièrement fermée à la suite ou en prévention de chute de blocs, ce qui entraîne de fortes perturbations du trafic dans l'île.

Enfin les cyclones se traduisent par des marées cycloniques, c'est-à-dire des augmentations du niveau de la mer qui, additionnées au déferlement de la houle, provoquent l'érosion des littoraux et parfois l'invasion des zones les plus basses par les eaux marines (submersion marine). La surcote marine est liée à des facteurs dynamiques – un vent d'afflux, la baisse de la pression atmosphérique – et à des facteurs statiques – comme l'orientation et la topographie des côtes et de l'avant-côte. Le vent, lorsqu'il souffle du large, pousse les eaux vers la côte. On estime en général qu'un km/h de vent se traduit par une augmentation du niveau de la mer d'un centimètre. Le deuxième facteur est la pression atmosphérique. Lors du passage d'une dépression, la pression, c'est-à-dire le poids de l'air sur l'océan, diminue. La surface de la mer se dilate d'environ un centimètre par hectopascal en moins. La configuration des côtes (tracé du trait de côte, orientation par rapport au vent) et la bathymétrie sont des facteurs locaux qui peuvent amplifier localement la surcote marine. Les sites en fond de baie, comme le Texas dans le golfe du Mexique, sont particulièrement exposés car l'énergie de la houle s'y concentre. S'ajoute à cela la marée qui peut aggraver le phénomène lorsque la marée haute correspond au passage du cyclone. Ces surcotes marines peuvent atteindre 4 à 5 mètres par rapport au niveau moyen de la mer pour des cyclones de classe 5. Associés à des vagues de parfois dix mètres, les passages de cyclones se traduisent sur les côtes meubles par des érosions voire des ruptures des cordons littoraux et des submersions des zones littorales situées à l'arrière.

Figure 17
Phénomènes dommageables associés aux cyclones



Finalement, les scénarios d'aléas associés aux cyclones peuvent être complexes. Cette complexité, cette imbrication des aléas génère parfois des catastrophes car si les aléas peuvent être bien connus, leur enchaînement voire leur cumul sont parfois ignorés. Le cas de Katrina est typique d'un aléa complexe qui a généré une crise de grande ampleur dans le sud des États-Unis en août/septembre 2005.

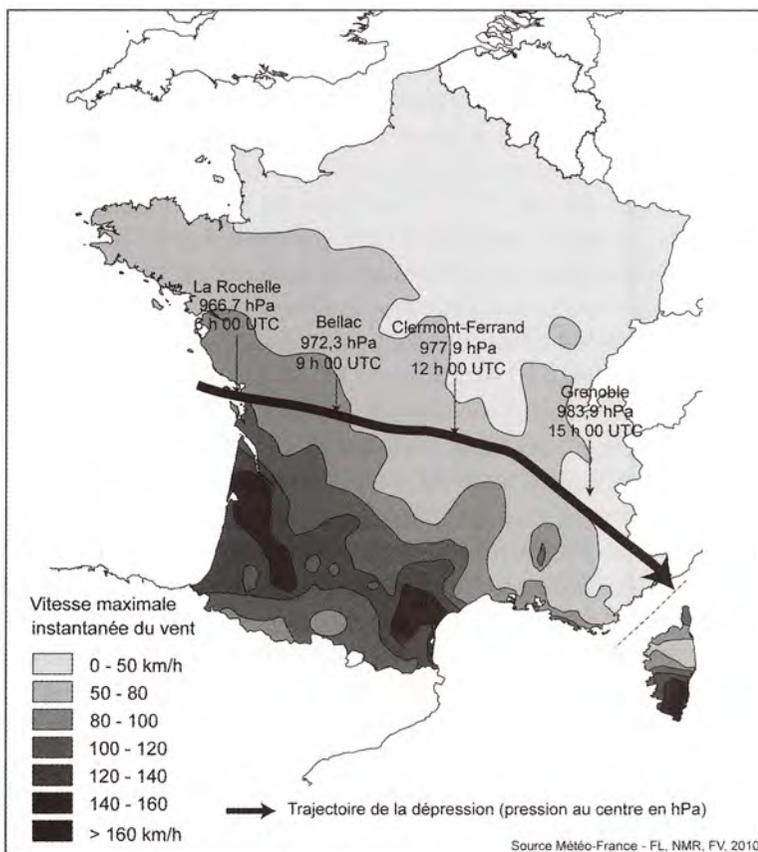
b – Les tempêtes

Contrairement aux cyclones, les tempêtes sont liées aux flux d'ouest des latitudes tempérées entre 45° et 65° de latitude. Dans l'hémisphère Sud, elles concernent surtout le domaine océanique des quarantièmes rugissants et des cinquantièmes hurlants des marins. Hormis les côtes du Chili et de Nouvelle-Zélande, les zones à enjeux sont peu peuplées. Dans l'hémisphère Nord, les tempêtes concernent les côtes ouest de l'Amérique du Nord mais c'est surtout l'Europe de l'Ouest qui est la zone la plus exposée. Ces tempêtes sont liées à des dépressions très creusées : la pression descend à moins de 980 hPa (pour une pression moyenne au niveau de la mer de 1 013 hPa). Plus la pression est basse, plus le gradient barométrique et les vents sont forts.

Les tempêtes ont une trajectoire ouest/est. Leur déplacement est de l'ordre de 30 à 50 km/h. On distingue la vitesse moyenne du vent (mesurée sur 10 minutes à 10 mètres au-dessus du sol) et la vitesse maximale instantanée. La vitesse atteinte lors des rafales est en général 50 % plus élevée que celle du vent moyen. Pour un vent moyen de 100 km/h, on peut s'attendre à des rafales de 150 km/h. La figure 18 montre les champs de vitesse de vents atteints lors de la tempête du 24 janvier 2009 dans le sud-ouest de la France. Les lignes reliant les points avec une même vitesse de vent sont les isotaches (prononcer « isotaque »). À l'intérieur des terres, les vitesses de vent s'atténuent au sol à cause de la rugosité du continent, et la pression au centre de la dépression augmente. Les vents les plus forts atteignent les zones situées au sud de la trajectoire de la dépression. Les zones côtières sont plus exposées car l'océan ne fait pas obstacle au vent. Les vents sont accentués dans les corridors montagneux (Lauragais, couloir rho-

danien) par l'effet Venturi. Globalement, en France, les dommages apparaissent dès 100 km/h à l'intérieur des terres alors qu'il faut des vents à 140 km/h pour observer des dommages conséquents sur les côtes.

Figure 18
Vitesses maximales du vent lors de la tempête
du 24 janvier 2009 en France



Les vents sont les principaux agents d'endommagement lors des tempêtes. La vitesse à partir de laquelle les vents peuvent engendrer des dommages est variable selon les régions. En

France, approximativement, les dommages notables apparaissent sur les côtes à partir de vitesses supérieures à 140 km/h. En revanche, à l'intérieur des terres, le seuil s'abaisse à 100 km/h. Les normes de construction traduisent la différence d'exposition des régions aux fréquences de vents forts. En réalité, la société, consciemment ou inconsciemment, a adapté son degré de résistance à la fréquence et à l'intensité des vents.

Si les effets directs du vent sont la principale cause de dommages, il existe des phénomènes associés comme les submersions marines. Suivant le principe expliqué plus haut pour les marées cycloniques, le vent du large provoque une remontée du plan d'eau à la côte. Le danger est maximal lorsque les plus forts vents d'afflux coïncident avec l'arrivée d'une crue et une marée haute de vives eaux. La configuration des côtes et des estuaires joue un rôle important. Ce type d'inondation associé aux tempêtes est coutumier dans les estuaires britanniques et les abers bretons (Quimperlé sur l'Odet) ou les côtes normandes (Dieppe). D'ailleurs, certains estuaires sont équipés de barrages anti-tempêtes comme celui de la Tamise à Londres. Un barrage de 570 m équipé de portes amovibles a été construit entre 1974 et 1980 pour éviter la remontée des eaux de la mer du Nord lors de vents d'afflux. De même, le cas de Venise est connu pour le phénomène des *acqua alta*. Lorsque le vent de sud souffle pendant plusieurs jours, il pousse les eaux de surface vers le nord de la mer Adriatique où se trouve Venise. Les niveaux de la mer et de la lagune augmentent, inondant la place Saint-Marc et différents quartiers de la ville. Des travaux sont en cours pour construire des portes qui fermeraient les passes de la lagune en cas d'augmentation du niveau de la mer.

Lors des tempêtes, les littoraux meubles et les falaises sont soumis à de fortes crises érosives : érosion des plages et des cordons dunaires, rupture des cordons dunaires et invasion d'eau de mer dans les zones basses de l'arrière-pays littoral. Les tempêtes correspondent à des moments d'érosion pour les falaises. Sur les côtes basses et meubles, le cordon littoral fragilisé rompt et l'eau marine se déverse dans les lagunes des lidos.

c – Tornades et trombes

Ce sont des phénomènes météorologiques d'ampleur plus restreinte que les tempêtes et les cyclones, mais d'une force destructrice comparable. Des tourbillons de vents appelés vortex se développent à la base de nuages convectifs à fort développement vertical, les cumulonimbus. Ils se matérialisent par un tube, une sorte d'entonnoir, qui relie la base du nuage au sol. L'ascendance dans les cumulonimbus est telle que des parachutistes largués trop près de ces zones d'ascendance se sont vus portés à 7 000 m d'altitude à l'intérieur du nuage. Sur les océans, les tornades prennent le nom de trombe.

Les vents estimés autour des vortex sont très puissants : plus de 300 km/h. Ils ont la capacité de soulever des voitures ou des mobile homes. Ces vitesses sont souvent déduites des dommages occasionnés car, d'une part, aucun anémomètre ne résiste à de tels vents et, d'autre part, les tornades sont des phénomènes très locaux qui passent au travers des mailles des réseaux de mesures. Elles sont classées suivant leur intensité. L'échelle de Fujita est la plus usitée. Les tornades sont liées à la thermoconvection nyctémérale. Elles naissent donc préférentiellement aux heures les plus chaudes de la journée entre 15 heures et 21 heures. Les conditions favorables à la formation des tornades sont :

- la présence de vents forts en altitude (courant-jet) ;
- une forte instabilité de l'air ;
- un fort gradient thermique latitudinal.

La zone touchée suit un couloir de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres de largeur. La longueur de la trace au sol varie de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres.

Les régions continentales des latitudes moyennes où les orages d'été sont nombreux sont les plus sujettes aux tornades : les États-Unis, la Chine, la Russie sont particulièrement exposés. Dans ces régions, les tornades ont plutôt lieu au printemps et en été. Aux États-Unis, la Tornado Alley (l'allée des tornades) est une

région à fort risque du Middle West américain. Au printemps, cette région est au contact des masses d'air froid qui descendent du Canada et des masses d'air chaud remontant du golfe du Mexique. La zone de contact qui correspond à de forts courants en altitude (courants-jets déjà évoqués pour les tempêtes) favorise l'instabilité de l'air. Les normes de construction sont particulièrement renforcées dans cette zone. La seule parade efficace est la protection dans des abris souterrains.

Même si elle est moins touchée, la France n'est pas exempte de ce phénomène. Les tornades frappent les régions du nord de la France mais aussi le sud-ouest (côte landaise) et les côtes méditerranéennes. 43 % des tornades ont lieu de juin à août d'après l'observatoire français des tornades et des orages violents.

En France, on a relevé dans l'histoire deux tornades d'intensité F5. Les tornades d'intensité F4 sont plus fréquentes. L'observatoire français des tornades et des orages violents en a recensé 14, la dernière en date ayant touché quatre communes du nord de la France le 3 août 2008. Cette dernière, qui a touché principalement la commune d'Hautmont (59), s'est traduite par un bilan lourd. La tornade est apparue vers 22 h 30 et a parcouru 12 km d'ouest en est. Les dégâts ont été importants : 3 morts et 18 blessés, 400 véhicules endommagés, 1 600 logements touchés dont 290 rendus inhabitables en l'état. Le coût des dommages a été estimé par les assureurs à 70 millions d'euros. Cet événement a été fortement médiatisé et ses conséquences ont été d'autant plus graves qu'il a touché une région vulnérable, marquée par le chômage et la précarité. Les familles sinistrées ont durement ressenti la perte de leur logement, ce qui a obligé le gouvernement français à intervenir en mettant à disposition des mobiles homes. On remarquera au passage le manque de préparation des pouvoirs publics à ce genre d'événement puisque les premiers mobiles homes ont été livrés le 19 août, soit 16 jours après la tornade. C'était pourtant une proposition du rapport du Sénat consécutif aux crues de la Somme de 2001 : « Proposition n° 23 : conclure avec des entreprises spécialisées des conventions de mise à disposition urgente de logements provisoires » (Deneux, 2001).

2 La grêle et les chutes de neige

La grêle est une précipitation solide qui cause des dommages graves sur les cultures, les automobiles, les bâtiments et parfois les personnes. Les grêlons sont de taille variable, allant de quelques millimètres de diamètre à la taille d'une balle de tennis. Les gros grêlons pesant plus d'un kilogramme sont le fruit de l'agglomération dans l'atmosphère de plusieurs grêlons de taille inférieure. Les grêlons se forment à des températures de -15 à -40 °C, soit environ 6 000 m aux latitudes moyennes. La grêle est liée à un type de nuage à développement vertical, le cumulonimbus. Ce nuage est associé à une forte instabilité de l'atmosphère qui génère des ascendances très fortes (plusieurs m/s). Le fort vent en altitude est aussi un facteur de son développement (Vinet, 2000). Les régions des latitudes moyennes soumises au courant-jet sont donc les principales zones de chutes de grêle mais sont aussi concernées les zones tropicales de montagne comme les Andes ou les montagnes d'Afrique centrale. En effet, les orages tropicaux, comme tous les cumulonimbus, recèlent de la grêle. À basse altitude dans les régions chaudes, les grêlons fondent avant d'atteindre le sol. Ce n'est pas le cas en montagne où les températures sont plus fraîches. Les « *granizadas* » sont de fortes averses de grêle qui font des dommages dans les villes andines comme Bogota ou La Paz et dans les zones agricoles où elles détruisent les cultures. Le 19 février 2002, la grêle qui est tombée sur la ville de La Paz a bouché les systèmes d'évacuation des eaux pluviales, aggravant ainsi le ruissellement de surface et provoquant une soixantaine de morts.

La grêle est principalement dommageable pour les cultures. En France, ce sont quelque 100 millions d'euros de dommages qui sont recensés en moyenne chaque année. Parfois, les grêlons affectent les automobiles. En 1993, les assureurs ont dû indemniser plus de 100 000 véhicules endommagés par la grêle dans la région lyonnaise et dans le sud-ouest de la France.

Associée aux orages, la foudre tue une cinquantaine de personnes et des milliers de têtes de bétail en France chaque année.

Ce risque naturel est l'un des plus meurtriers en France mais il est consenti par la société car les dommages sont très localisés et les décès sont individuels et acceptés au même titre que les accidents domestiques.

3 Les excès thermiques

a – Le gel et les vagues de froid

Ce sont des phénomènes qui affectent plutôt les latitudes moyennes soumises aux invasions alternantes d'air tropical ou d'air polaire. Il faut distinguer le gel d'hiver et le gel de printemps. Le gel d'hiver est un gel profond marqué par des températures basses et souvent associé à des précipitations neigeuses ou des pluies verglaçantes. Les vagues de froids historiques en Europe occidentale et en France sont récurrentes. Elles s'expliquent par la présence, pendant plusieurs semaines parfois, d'un anticyclone alimenté par de l'air arctique. Les vents d'est/nord-est (le Moscou-Paris) accentuent l'impression de froid : c'est le *wind chill* ou effet refroidissant du vent. Cet effet est bien connu en Amérique du Nord où, à l'approche d'un épisode de blizzard, les services météorologiques annoncent la température de l'air sous abri mais aussi la température ressentie compte tenu du vent.

La sévérité d'une vague de froid est bien sûr liée aux températures minimales atteintes exprimées en fonction des normales de saison mais elle peut être aggravée par la brutalité de la chute de température ou des précipitations. La France a connu des hivers très froids : 1956, 1963, 1985, 1987... En 1956, Les températures ont atteint -35 °C en Corrèze et -7 °C sur la côte d'Azur. Toute l'Europe de l'Ouest a été touchée, y compris les régions méditerranéennes. La brutalité de la baisse des températures a favorisé le gel des oliviers et précipité le déclin de cette culture méditerranéenne alors en crise. Lors des vagues de froid récentes, les dommages agricoles, autrefois au-devant de l'actualité, passent au second plan ; l'attention se concentre autour de la sécurité des personnes (SDF), la consommation électrique (records de consommation à cause du chauffage) et les difficultés de cir-

culution dues à la neige et au verglas. Cela confirme l'évolution des enjeux et des vulnérabilités de nos sociétés. Cette sensibilité des réseaux est attestée par les grands désordres provoqués par la tempête de verglas qui s'est abattue sur le Québec et le sud du Canada du 4 au 8 janvier 1998. Les pluies, en tombant sur un sol froid gelaient quasi instantanément, déposant une gangue de glace de 5 à 10 cm d'épaisseur sur les arbres, les habitations et les réseaux filaires aériens. Le réseau électrique a été profondément endommagé et un million de foyers ont été privés d'électricité.

Le gel de printemps n'est pas caractérisé par des températures extrêmes mais la date tardive du gel peut avoir des conséquences sur les cultures. Les cultures fruitières et viticoles sont régulièrement touchées – voire détruites – par ces gels de printemps, le mois d'avril étant en France le plus critique. Les vignobles du nord de la France comme le Champagne ou le Muscadet sont très sensibles au gel de printemps. Le 21 avril 1991, la température est descendue jusqu'à -5°C sur une bonne partie de la France. Le gel détruisit 80 % des récoltes dans le vignoble du Muscadet près de Nantes. Or, le muscadet n'est pas un vin de garde. Les viticulteurs ont perdu des marchés à l'étranger car, faute de stock, ils n'ont pas pu alimenter leurs clients.

Les régions subtropicales ne sont pas épargnées. Les vagues de froid font aussi des dommages lorsque les masses d'air polaires s'invitent dans la zone tropicale. Au Brésil, la zone de culture du café subit des gels tous les 10 ans environ à des degrés divers, suite à l'intrusion de masses d'air froid venant d'Argentine. Ce gel qui intervient en juillet/août se traduit par une hausse du cours du café, les acheteurs anticipant une diminution de la future récolte. En 1975, une vague de froid détruisit les deux tiers des plantations de café brésiliennes. Le cours du café fut multiplié par cinq en deux ans. Si elle n'était pas la seule cause, la vague de gel a été l'élément déclencheur qui a précipité la crise dans un marché du café déjà tendu.

De même, des vagues de froid causent tous les 3 à 5 ans des victimes au Bangladesh, dans les collines du Nord, mais aussi dans les basses plaines où les populations démunies et particulièrement vulnérables ne peuvent pas résister à des températures

qui pourtant descendent à peine à 0 °C. On saisit là la relativité de la notion de froid et surtout la vulnérabilité de populations pauvres, mal logées et peu habituées à ces extrêmes thermiques.

Même si le réchauffement climatique semble vouloir faire croire que ce type d'aléa sera moins fréquent, il ne faut pas exclure des vagues de froid comme on l'a vu en Chine en janvier 2008 où l'on a dénombré près de 200 morts. Par ailleurs, dans le cadre du réchauffement climatique, le gel de printemps est un risque qui peut croître car la végétation débouillant plus tôt (hiver doux), elle est plus sensible aux gels tardifs.

b – Les canicules

Comme les vagues de froid, les canicules ou vagues de chaleur font partie de la variabilité du climat. Les canicules se manifestent par une augmentation anormale et durable de la température. Elles durent en général une à trois semaines et s'accompagnent de phénomènes aggravants, comme la sécheresse ou la pollution atmosphérique (ozone). En Europe, populations et autorités ont été sensibilisées à cet aléa par la canicule d'août 2003 (Abenheim, 2003). Un épisode de forte chaleur a touché l'Europe occidentale entre le 4 et le 18 août 2003. Les températures ont dépassé les 50 °C en Espagne et les 40 °C en France (Bessemoulin *et al.*, 2004). La canicule a été sans précédent depuis au moins 1949. Elle s'est caractérisée par la permanence des températures maximales journalières supérieures à 35 °C : la température du mois d'août a été supérieure à la moyenne de 4 °C. La surmortalité¹ engendrée par la canicule de 2003 s'est élevée à 30 000 personnes en Europe occidentale dont 15 000 en France. Mais l'aléa « canicule » est plus complexe qu'il n'y paraît et la géographie des victimes n'est pas proportionnelle aux températures maximales atteintes. Lorsque l'on compare les cartes des températures et de la surmortalité, on constate que la mortalité, qui a concerné principalement les personnes âgées, n'a pas été proportionnelle aux températures maximales observées

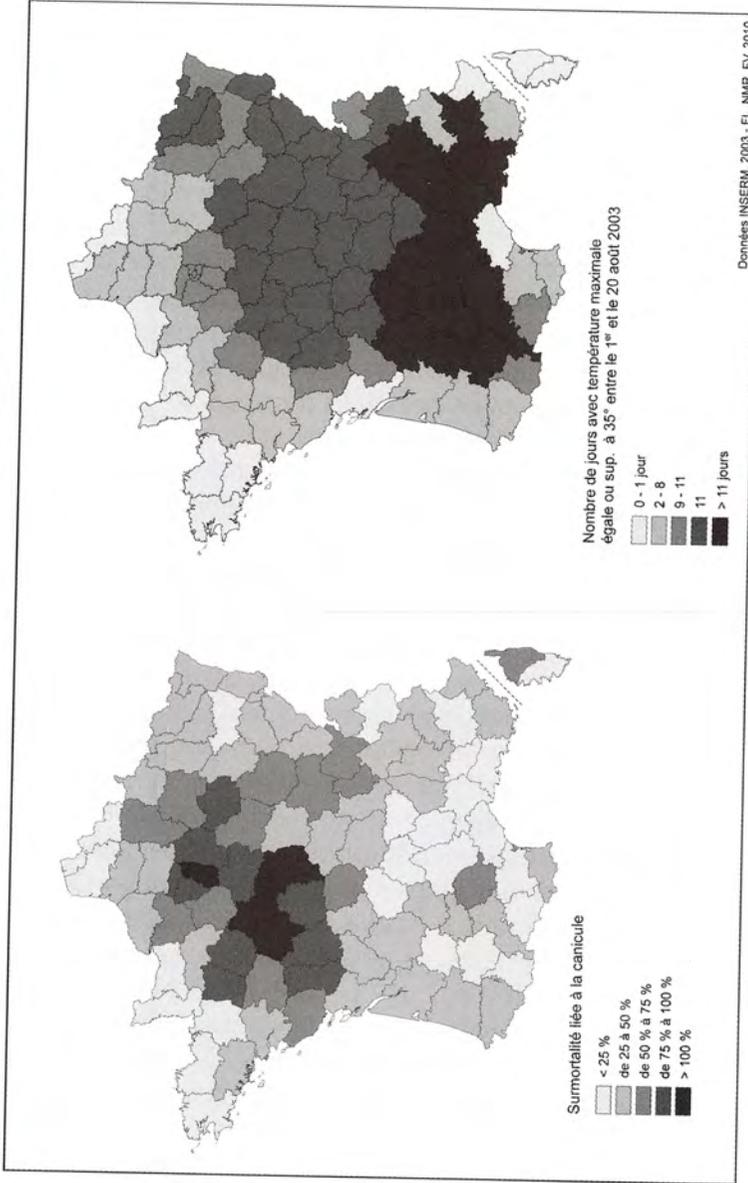
1. On appelle « surmortalité » le nombre de victimes supplémentaire engendré par la canicule par rapport à la mortalité moyenne sur la période considérée.

(figure 19). En effet, c'est à Corconne dans le Gard que l'on a mesuré la température record (43 °C). Or, dans le sud de la France, la surmortalité n'a été que de 10 %. En revanche, en Ile-de-France, où la température n'a pas dépassé 40 °C, la surmortalité a atteint 134 %. En réalité, les facteurs aggravants sont les températures minimales journalières atteintes en fin de nuit. Les 11 et 12 août à Paris, la température nocturne n'est pas descendue en dessous de 25,5 °C alors que dans l'arrière-pays méditerranéen les températures redescendaient aux alentours de 20 °C. Ainsi le corps des personnes les plus fragiles n'a-t-il pas la possibilité de récupérer. Cette chaleur nocturne est accentuée en ville où les bâtiments restituent la nuit la chaleur accumulée le jour, contribuant ainsi à l'existence d'un îlot de chaleur urbain bien mis en évidence par les climatologues.

Autre facteur aggravant, la pollution atmosphérique, favorisée par l'ensoleillement et l'absence de vent, a fragilisé les personnes souffrant de troubles respiratoires. Ainsi l'aléa « chaleur » n'est-il pas proportionnel aux températures maximales mesurées mais à l'écart entre les chaleurs et la température moyenne, à la valeur des températures nocturnes et à de nombreux facteurs locaux aggravants.

Le phénomène de canicule n'était pourtant pas inconnu des experts (Besancenot, 2002). On peut mentionner les vagues de chaleur du 14 au 20 juillet 1995 à Chicago où des températures supérieures à 40 °C ont entraîné 739 décès surnuméraires, ou bien la vague de chaleur et de pollution de juillet 1987 à Athènes qui aurait engendré plus de 2 000 décès. La vague de chaleur de l'été 1976 en France a entraîné une surmortalité de 6 000 décès. À l'époque, cette surmortalité avait été occultée par les problèmes liés à la sécheresse en agriculture.

Figure 19
 Surmortalité et températures maximales en France en août 2003



4 La sécheresse

La sécheresse est un risque à part. En effet, contrairement aux inondations, séismes ou incendies, elle ne se manifeste pas brutalement mais s'installe progressivement. C'est un phénomène cumulatif inverse. Les dommages apparaissent lors de franchissement de seuil. Dans les régions marquées par une sécheresse permanente, on parlera d'aridité ou de climat aride. La sécheresse météorologique intervient lorsque les précipitations restent inférieures aux normales de saison pendant une longue période. Elle se traduit par une sécheresse édaphique et hydrologique, c'est-à-dire une diminution des débits des cours d'eau et des nappes souterraines vers leurs niveaux d'étiage.

La sécheresse s'explique par une permanence des conditions anticycloniques qui empêchent la formation de précipitations. À court terme, les plantes non irriguées n'ont pas assez d'eau pour survivre. À moyen terme, le niveau des nappes souterraines s'abaisse tout comme celui des fleuves. En climat méditerranéen et tempéré océanique (Dubreuil, 2005), la sécheresse est avant tout liée à la faiblesse des précipitations en saison des pluies. L'été est en général déficitaire en eau et les quelques précipitations sont prélevées par la végétation ou l'évaporation. En revanche, les précipitations d'hiver sont essentielles au renouvellement des nappes souterraines. La grande sécheresse de l'été 1976 en Europe occidentale avait été précédée d'un hiver très sec.

Il existe de nombreux indices pour caractériser l'aridité d'un climat. En revanche, il est plus difficile de dire à quel moment et en fonction de quels paramètres météorologiques et hydrologiques on entre dans une période de sécheresse. De fait, la sécheresse apparaît lorsque les nuisances associées émergent. L'agriculture est le domaine le plus touché mais d'autres secteurs économiques souffrent également, comme la fourniture en eau potable ou la production hydroélectrique. En 2003, le niveau des cours d'eau étant descendu trop bas, les centrales nucléaires installées sur les grands fleuves français auraient dû ralentir leur production afin de ne pas trop réchauffer le milieu aquatique

ambient. Une dérogation leur a été accordée afin de ne pas pénaliser la production électrique qui devait répondre à une demande accrue de 10 % à cause du recours massif aux climatiseurs.

Cependant, la sécheresse est avant tout un problème d'adaptation entre l'exploitation humaine du milieu et les ressources en eau de ce milieu (Hellier *et al.*, 2009). Deux points sont cruciaux : d'une part, l'adaptation dépenses en eau/ressources en eau et d'autre part, les moyens mis en œuvre pour pallier le manque chronique d'eau : barrages, puits...

→ II. Les aléas climatiques indirects

① Les avalanches

L'aléa « avalanche » menace l'homme et ses activités depuis très longtemps dans les vallées montagnardes, en particulier au sein des grandes chaînes de montagnes d'Asie (Himalaya) d'Europe (Alpes, Pyrénées) et d'Amérique du Sud (cordillère des Andes). Avec l'essor sans précédent des sports d'hiver (ski) et des loisirs (alpinisme, trek) au xx^e siècle, ce risque a fortement augmenté, notamment dans les pays développés où de nombreuses stations de sport d'hiver ont vu le jour. On peut même se demander s'il s'agit toujours d'un risque naturel dans la mesure où le déclenchement est souvent dû aux skieurs et randonneurs eux-mêmes.

a – Caractéristiques de l'aléa

On appelle avalanche toute masse de neige (parfois mêlée à de la glace) qui, sous l'effet de la gravité et éventuellement d'une rupture brutale, glisse rapidement sur un versant montagneux. Le terme désigne souvent à la fois le processus (le mouvement gravitaire) et le résultat (la masse de neige accumulée en aval). Les caractéristiques de l'aléa sont complexes car les paramètres à prendre en compte sont nombreux. Quatre facteurs sont particulièrement importants :

- la pente : la valeur seuil minimale communément admise est de 22° mais des avalanches ont été observées sur des pentes de 6° en conditions très exceptionnelles. En général, les avalanches se produisent sur des pentes comprises entre 25 et 45° ;
- la cohésion interne du manteau neigeux ;
- l'épaisseur et la densité des couches de neige superposées ;

– les caractéristiques du plan de glissement (couche de vieille neige, roche, sol nu ou végétalisé).

Il existe quatre-vingts variétés de formes de cristaux de neige, chaque forme résultant de conditions de température et de sur-saturation particulières au moment de la formation et de la chute du flocon. Pour un usage courant, les météorologues ne retiennent que dix variétés, avec des numéros et des symboles normalisés (1 : plaquettes ; 2 : étoiles ; 3 : colonnes ; 4 : aiguilles, etc.). La densité de la neige est fonction de la forme et de la taille des cristaux, de la température au moment du dépôt et de la vitesse du vent au moment de l'accumulation. La forme et la taille des cristaux varient beaucoup au cours d'une même chute de neige. Un long épisode neigeux peut donc se traduire par l'empilement de couches plus ou moins épaisses aux caractéristiques physiques différentes. Avec le temps, la neige se densifie sous l'effet de mécanismes thermiques et de pression. Le processus de tassement mécanique domine durant les 48 heures qui suivent la chute ; au-delà de deux jours, ce sont les processus thermiques qui prennent le dessus, d'autant plus lents que la température de la neige est basse. On distingue la métamorphose d'isothermie et la métamorphose de gradient. La première s'observe lorsque les températures sont négatives et varient peu au sein du manteau neigeux : en une à deux semaines, sans vent, les cristaux deviennent particules reconnaissables, grains fins (0,5 mm) ou ronds (1 à 3 mm). La densité augmente, de 150 à 300 kg/m³. La métamorphose de gradient se caractérise par une différence de température entre la base (+ 1 °C par exemple) et la surface du manteau neigeux (– 25 °C par exemple). La métamorphose est d'autant plus rapide que cette différence est importante. Des échanges thermiques se produisent entre les couches de neige : certains grains grossissent et les petits disparaissent en engraisant les autres par sublimation. Se forment ainsi des cristaux dits en gobelet, petites pyramides creuses à base hexagonales, parfois grosses d'1 cm, et qui constituent une couche très instable, facilitant le mouvement gravitaire en cas de rupture ou de surcharge. Au terme de la métamorphose, la densité d'une neige évoluée atteint 500 kg/m³.

Des quatre facteurs évoqués plus haut dépendent la nature du mouvement (glissement en plaque ou masse informe, à blocs), sa vitesse et son volume (quelques dizaines de m³ à plus d'un million), son extension spatiale et ses effets géomorphologiques éventuels. On distingue ainsi les avalanches de surface et les avalanches de fond qui mobilisent tout le manteau neigeux et peuvent avoir un effet géomorphologique sur le versant en arrachant des matériaux fins ou grossiers au substrat. Mais le critère majeur retenu partout dans le monde pour classer les avalanches est la qualité de la neige, qui permet d'en distinguer trois types, même si, dans la réalité, les événements sont souvent mixtes.

La complexité de l'aléa physique tient aussi à la multitude des paramètres jouant sur le moment du déclenchement, lorsqu'il est naturel :

- les conditions climatiques des jours précédents, qui jouent un rôle majeur dans la métamorphose de la neige (la pire situation se rencontre lorsque les premières chutes de neige recouvrent un sol saturé d'eau et non gelé : le manteau se solidarise mal avec le terrain et une température positive à sa base entraîne le développement d'une structure en nid d'abeille (cristaux en gobelets), réduisant nettement le nombre de ses appuis au sol) ;
- l'orientation du versant par rapport au soleil et aux vents dominants ;
- la topographie et la rugosité du versant, la nature du couvert végétal éventuel ;
- l'état thermique et hygrométrique du sol, bien difficile à connaître.

Ces paramètres varient beaucoup sur de courtes distances et en très peu de temps (on parle d'hétérostasie du milieu montagnard) et sont souvent difficiles à reconstituer dans le cadre d'un retour d'expérience. Cette complexité explique aussi pourquoi les avalanches sont de plus en plus souvent déclenchées artificiellement afin de protéger les espaces fréquentés des incertitudes d'un déclenchement naturel.

b – Typologie et répartition

Les avalanches de poudreuse mobilisent une neige fraîche, pulvérulente (50 à 150 kg/m³), froide et sèche et se déclenchent en hiver par temps froid, en haute montagne, souvent après de fortes chutes de neige sans vent. Ce sont des avalanches de surface caractérisées par une vitesse très élevée (70 km/h au départ mais rapidement 200 à 400 km/h), la présence d'un aérosol (mélange d'air et de neige peu dense) et d'un effet de souffle (air comprimé à l'aval de l'aérosol) provoquant de spectaculaires dégâts. L'effet de souffle provoque des dégâts au-delà de la zone d'accumulation de la neige.

Les avalanches de plaque à vent. Le vent est un agent important de la métamorphose de la neige qui agit dès 5 m/s. Il provoque une densification mécanique par destruction des dendrites des cristaux de neige, ce qui conduit à une baisse de la porosité par réarrangement des grains (roulage) au moment du dépôt. Les cristaux transportés et déposés par le vent à proximité des crêtes et dans les secteurs abrités, sous le vent, deviennent des grains fins (0,5 mm) par métamorphose d'isothermie, consolidés ensuite en plaques de neige cassantes, dites plaques à vent. Ces avalanches mobilisent donc une neige soufflée, compacte (200 à 400 kg/m³) avec des vitesses de départ de l'ordre de 50 km/h qui augmentent rapidement. Les plaques sous le vent sont nettement plus instables que celles au vent car leurs points d'ancrage à la sous-couche sont beaucoup plus limités et car leur épaisseur peut dépasser un mètre. L'instabilité de ces plaques est fréquemment renforcée par la présence à la base du manteau neigeux d'une couche de vieille neige, dite givre de profondeur, dont la structure en gobelets est due à une métamorphose de gradient. Cette vieille neige, froide, poreuse, à cohésion faible, facilite le déclenchement d'avalanches importantes car elle joue le rôle d'un véritable lubrifiant.

Les avalanches de neige humide mobilisent de la neige fraîche humide et/ou de la neige évoluée à grains arrondis, assez

dense du fait de la présence d'eau liquide (200 à 600 kg/m³). Elles se déclenchent après un redoux hivernal ou au printemps. Ce sont généralement des avalanches de fond, très massives, sous forme de coulées limitées. La vitesse de ce type d'avalanche est plus lente mais sa masse est considérable. Les zones où se produisent ces avalanches sont les mieux connues, et ont été les premières cartographiées car les trajectoires sont généralement identiques d'une année à l'autre. De plus, ces avalanches de fond ayant une action morphogénique supérieure aux autres types d'avalanches, les trajectoires préférentielles sont plus faciles à repérer *a posteriori*, en été, à l'aide d'une étude des traces laissées dans le paysage.

L'aléa « avalanche » peut se rencontrer dans toutes les montagnes du globe possédant un manteau neigeux suffisant. Dans l'Himalaya centre-oriental, la mousson génère de violentes tempêtes de neige qui sont à l'origine de spectaculaires avalanches. De grandes avalanches de poudreuse peuvent ainsi concerner 2 000 à 3 000 m de versant, traverser des vallées de plusieurs kilomètres de large et remonter sur le versant opposé sur plusieurs centaines de mètres.

Les montagnes de la zone tempérée, où l'enneigement est saisonnier ou permanent (Alpes et Pyrénées, Appalaches et montagnes Rocheuses, montagnes japonaises), sont particulièrement concernées par le risque avalancheux du fait d'une forte vulnérabilité liée à l'essor des sports d'hiver au xx^e siècle à haute altitude. Mais ce risque est beaucoup plus ancien, remontant à l'installation de l'homme dans les montagnes, de manière temporaire ou permanente. Les premiers témoignages remontent à l'Antiquité : en 218 avant J.-C., le général carthaginois Hannibal aurait perdu 18 000 hommes, 2 000 chevaux et 25 éléphants en traversant les Alpes. Certains événements, particulièrement meurtriers dans la mesure où certains villages ont été rayés de la carte, ont longtemps nourri la mémoire locale des vallées alpines (Huez en 1749) ou pyrénéennes (Chèze et Saint-Martin en 1601).

Ce risque a cependant largement changé de nature en Europe. Jusqu'au xx^e siècle, il n'y avait pas d'habitat permanent au-dessus de 1 500 m dans les Alpes. Les alpages n'étaient

occupés que l'été, de mi-juin à fin septembre. Mais après un optimum démographique au XVIII^e ou XIX^e siècle, l'exode rural et les débuts de l'industrie transforment les modes de vie traditionnels, les reboisements (lois RTM de la fin du XIX^e siècle en France) et les paysages. À partir des années 1950, les usages de la montagne changent et le caractère naturel du risque d'avalanche devient très discutable. L'explosion des sports d'hiver crée un nouvel habitat permanent en altitude (1 500-2 000 m), la fréquentation devient saisonnière avec un pic hivernal, lié au séjour de vacanciers, souvent urbains et qui connaissent mal la montagne. Cette transformation quantitative et qualitative de la population exposée aux avalanches et les nouvelles pratiques conduisent à une forte hausse de la vulnérabilité.

c – Bilan humain des avalanches

Le risque avalancheux présente un certain paradoxe parmi les risques naturels. En effet, il est à l'origine de 500 décès par an en moyenne dans le monde : c'est un risque naturel peu meurtrier à l'échelle planétaire. Mais il concerne avant tout les pays riches où l'industrie des sports d'hiver s'est largement développée au XX^e siècle. Depuis les années 1950, les accidents de sports d'hiver ont beaucoup augmenté avant de se stabiliser ces trente dernières années. En France, le bilan annuel des avalanches oscille entre 20 et 60 morts par an selon l'enneigement et le taux d'occupation des stations, auxquels il faut ajouter un nombre équivalent de blessés (tableaux 11 et 12). Un tel bilan en fait un risque naturel particulièrement meurtrier en France ; même si, le nombre de victimes restant stable et le nombre d'usagers de la montagne étant toujours en augmentation (plus de 5 millions), on constate une diminution nette de la vulnérabilité humaine face à cet aléa.

L'essentiel des avalanches entraînant des victimes est déclenché par les skieurs ou randonneurs eux-mêmes. Pour l'hiver 1991-1992 en France, 22 des 28 victimes recensées avaient elles-mêmes provoqué l'avalanche qui les emporta. Le bilan des avalanches par activité (tableau 12) souligne à quel point ce risque évolue aujourd'hui en fonction de vulnérabilités

développées récemment : les loisirs de montagne, et en particulier le ski (hors-piste, de randonnée, ou associé à la pratique de l'alpinisme), totalisent plus de 90 % des victimes. Chaque événement fait assez peu de victimes, ce qui rend difficile la collecte des données et leur agglomération aux échelles internationales. Face à la forte hausse de fréquentation touristique de la haute montagne, au développement de domaines skiables transfrontaliers, les pays tentent d'améliorer individuellement et collectivement la prévention. Ainsi, en avril 1993, à Wildbad-Kreuth en Bavière, les pays de l'arc alpin (Allemagne, Autriche, France, Italie et Suisse) s'accordent pour adopter une échelle européenne de risque d'avalanche à cinq niveaux, destinée à mieux informer le public pratiquant la montagne hors des pistes balisées et ouvertes. Les pistes de ski sont régulièrement sécurisées par le déclenchement volontaire et organisé d'avalanches, en fonction des informations recueillies par les services locaux spécialisés. L'ANENA en France, mais aussi les stations de ski ou les organismes météorologiques diffusent de plus en plus d'informations préventives, parfois sous forme de cartes. Le site <http://www.avalanche.ca/> propose des bulletins d'avalanches pour tous les massifs des parcs nationaux montagneux du Canada.

Les avalanches de poudreuse et de plaques sont les plus meurtrières. Cela est notamment lié à leur localisation, beaucoup plus aléatoire que celle des avalanches de neige humide. Du fait de leur vitesse, elles sont particulièrement meurtrières pour les skieurs, randonneurs. Ceux-ci sont le plus souvent à l'origine des avalanches de plaque (80 % des avalanches dans les massifs skiables des pays développés). La corniche en surplomb, parfois de plusieurs mètres d'épaisseur, qui prolonge la plaque au vent est particulièrement dangereuse : sa rupture sous le poids d'un homme entraîne la mise en mouvement de la plaque sous le vent. Les avalanches de neige humide sont les seules dont la vitesse est parfois assez faible (inférieure à 30 ou 50 km/h) pour qu'un skieur expérimenté puisse lui échapper, mais en cas d'ensevelissement, la densité de la neige réduit encore plus vite les chances de survie des victimes.

Tableau 11
Bilan humain annuel des avalanches en France
entre 2000 et 2009

Saison avalancheuse (du 1 ^{er} octobre de l'année au 30 septembre de l'année suivante)	Accidents		Accidents mortels		Victimes décédées	
	Nombre total	%	Nombre total	%	Nombre total	%
2000-2001	58	11.0	20	9.7	28	10.2
2001-2002	39	7.4	18	8.7	29	10.5
2002-2003	41	7.8	22	10.7	26	9.5
2003-2004	53	10.0	21	10.2	26	9.5
2004-2005	71	13.4	20	9.7	25	9.1
2005-2006	106	20.0	50	24.3	57	20.7
2006-2007	54	10.2	16	7.8	20	7.3
2007-2008	37	7.0	15	7.3	29	10.5
2008-2009 (bilan au 26 juin 2009)	70	13.2	24	11.7	35	12.7
Total	529		206		275	
Moyenne	58.78		22.89		30.56	

Source : ANENA, 2009.

Tableau 12
Bilan humain par activité des avalanches en France
entre 2000 et 2009

Répartition par activité (9 saisons : 01/10/2000 au 26/06/2009)	Accidents		Accidents mortels		Victimes décédées	
	Nombre total	%	Nombre total	%	Nombre total	%
Randonnée	206	39.4	85	41.3	114	41.5
Hors-piste	251	48.0	91	44.2	111	40.4
Alpinisme	39	7.5	19	9.2	39	14.2
Piste	5	1.0	1	0.5	1	0.4
Habitation	1	0.2	0	0.0	0	0.0
Voies de communication	1	0.2	0	0.0	0	0.0
Déclenchement	4	0.8	2	1.0	2	0.7
Secours	1	0.2	0	0.0	0	0.0
Autre	15	2.9	8	3.9	8	2.9
Total	523		206		275	
Moyenne	58.11		22.89		30.56	

Source : ANENA, 2009.

En Suisse, l'IFENA (Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches) recense 1 886 victimes d'avalanches entre 1981 et 1998, dont 23 % de victimes décédées et 77 % blessées. Sur ces 1 886 victimes, 39 % étaient totalement ensevelies : parmi elles, 52,4 % sont décédées contre 4,2 % des victimes partiellement ou non ensevelies. Ce constat montre combien le danger majeur des avalanches pour l'homme est l'ensevelissement sous la neige. Le site internet de l'ANENA (Association nationale pour l'étude de la neige et des avalanches) propose une courbe de la probabilité de survie en fonction de la durée d'ensevelissement qui reprend les résultats de l'IFENA fondés sur l'étude d'un corpus de 638 personnes complètement ensevelies sous une avalanche. La courbe montre une probabilité de survie de plus de 90 % lorsque le temps d'ensevelissement ne dépasse pas 18 minutes, puis une forte baisse (à 35 minutes, la probabilité n'est plus que de 35 %), avant une diminution plus lente et par paliers pour atteindre 20 % entre 1 h 30 et 2 heures d'ensevelissement. Après 2 h 10 d'ensevelissement, les chances de survie baissent brutalement à 7 % où elles se stabilisent. Mais les médecins soulignent que l'ensevelissement n'est pas la seule cause de décès puisqu'ils évaluent à environ 20 % le nombre de victimes tuées au cours de l'écoulement de l'avalanche. Cette étude montre qu'une personne sur deux impliquée dans une avalanche est indemne, et que si l'écoulement neigeux lui-même ne tue pas la victime ensevelie, ses chances de survie sont proches de 100 % si elle est secourue durant le premier quart d'heure. C'est sur la base de ces constats qu'ont été développés de nouveaux outils et méthodes de prévention pour permettre aux membres d'un groupe de se porter assistance rapidement : équipements spécifiques (ARVA, sonde, pelle), formation et entraînement.

2 Les inondations

Les inondations sont un aléa multiforme : d'une part, toutes les inondations ne sont pas d'origine climatique ; d'autre part, dans les inondations d'origine climatique, le facteur topogra-

phique est déterminant dans la caractérisation et dans la localisation de l'inondation.

Il faut tout d'abord distinguer les crues des inondations. La crue se définit comme une montée du niveau et donc du débit d'un cours d'eau. Cette augmentation se caractérise par les paramètres descriptifs de l'aléa exposés dans la première partie (intensité, fréquence, durée, volume...). Ainsi la crue est-elle un phénomène purement hydrologique. En revanche, l'inondation fait référence au débordement d'un cours d'eau hors de son lit habituel. Elle désigne l'invasion par l'eau d'un espace habituellement exondé.

L'aléa hydrologique peut être assimilé à un continuum allant de la simple augmentation de quelques centimètres d'un petit ruisseau à des inondations généralisées durant plusieurs mois dans les grands bassins fluviaux du Yang Tsé Kiang ou du Mississippi (Bethemont, 1999 ; Parker, 2000).

La première classification est génétique, distinguant les inondations climatiques et non climatiques. Ces dernières sont liées à des phénomènes aussi divers que les tsunamis, des éruptions volcaniques sous-glaciaires, des ruptures de lac glaciaire ou de barrage. Il existe aussi des inondations d'origine climatique non pluviométrique liées à la fonte des neiges ou aux marées de tempêtes.

Pour les inondations d'origine pluviométrique, la classification habituelle résulte d'une combinaison entre les caractéristiques des précipitations (intensité, cumul, durée...) et les caractéristiques du bassin versant (pente, taille, lithologie...) (Cosandey, 2003).

a – Les inondations d'origine non climatique

- Les inondations naturelles non climatiques

Très diverses, elles peuvent être considérées comme des effets induits d'autres phénomènes naturels (partie 2). Le tsunami (partie 2.III) est le cas typique d'une inondation sans crue. L'inondation des zones côtières est très brutale et liée à un phénomène géophysique sous-marin (éruption volcanique, séisme,

mouvement de terrain...). Les glissements de terrain (partie 2.IV) sont parfois à l'origine d'inondations, soit par le démantèlement d'un lac de barrage naturel après qu'un glissement de terrain a obstrué une vallée, soit lorsqu'un glissement de terrain se produit dans un lac, comme en Italie le 9 octobre 1963.

Le terme islandais de *jökulhlaups* s'est généralisé pour désigner les débâcles glaciaires. Celles-ci résultent de la rupture d'un lac de barrage sous glaciaire ou de la vidange d'un lac morainique. L'eau accumulée dans une cavité est libérée soit par débordement du lac, soit par rupture du glacier ou du cordon morainique, soit par recul du glacier. Ce type d'aléa est particulièrement surveillé en montagne tempérée. Les éruptions volcaniques, en faisant fondre une masse importante de neige ou de glace, sont parfois à l'origine d'inondations brutales. Le lieu éponyme des *jökulhlaups* est le glacier du Vatna au sud de l'Islande. Les éruptions des volcans présents sous la calotte de glace provoquent la fonte partielle du glacier (1996). Ces inondations sont aggravées par la charge alluviale très importante, les matériaux volcaniques étant facilement transportés par les eaux de fonte. Par leur dynamique, ces inondations sont assimilées aux lahars (partie 2.II). On est ainsi à la limite entre la coulée de blocs, coulée de boue et inondation. La limite en termes de cinématique est souvent difficile à déterminer.

• Les inondations dues à des ruptures d'ouvrage

Les ruptures de barrage ont lieu au moins une fois par an dans le monde. Les barrages sont très hétérogènes dans leur conception, leur taille et leur utilisation. Certains sont en terre comme celui qui s'est rompu en août 2008 dans le Colorado, entraînant l'évacuation préventive de centaines de touristes dans le Grand Canyon. Les « grands barrages » (plus de 15 m de hauteur) sont conçus de façon à pouvoir résister à des crues de période de retour millénaire à décennales.

Les causes sont multiples : crue dépassant la crue de projet, glissement de terrain dans le lac réservoir, séisme mais aussi mauvaise conception de l'ouvrage, acte de malveillance, attentat. La vidange brutale d'un lac de réservoir de barrage entraîne une

onde de submersion qui se propage très rapidement vers l'aval. Si la rupture est brutale, elle laisse peu de chance de survie aux personnes situées à proximité. Le risque de rupture est encore peu connu du public en France mais commence à être pris en considération dans les plans particuliers d'intervention (PPI) « barrage ».

De même, les ruptures de digues ne sont pas un type d'inondation en soi mais un facteur aggravant des inondations fluviales (partie 5).

b – Les inondations d'origine pluviale

Les hydrologues cherchent d'abord à caractériser les crues. Ces dernières se définissent par une équation de base : $Q = S \times V$ où Q représente le débit instantané, S la surface de la section hydraulique et V la vitesse moyenne de l'eau dans cette section mouillée.

Les crues sont mesurées en des points précis du cours d'eau à partir d'échelle de crues en général accompagnées de limnigraphes. Les limnigraphes enregistrent en temps réel la hauteur de l'eau dans le cours d'eau. De temps en temps sont effectués des jaugeages, c'est-à-dire des mesures réelles du débit. La vitesse est mesurée en différents points de la section mouillée à l'aide de différents outils. Ces jaugeages sont longs et difficiles, surtout sur les cours d'eau à écoulement torrentiel. Ils permettent toutefois de construire des courbes de tarage qui lient la hauteur d'eau aux débits à un endroit donné (voir figure 20 – *Courbe hauteur/débit au pont romain de Sommières sur le Vidourle* sur www.licence.puf.com).

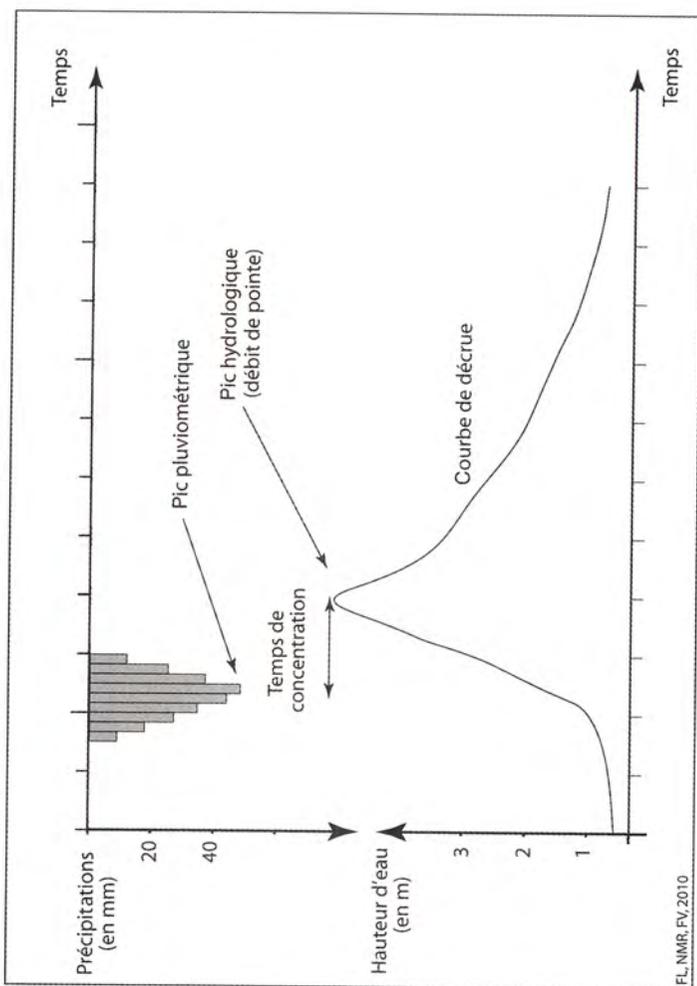
La comparaison entre l'abondance des crues dans différentes régions du globe se fait par le débit spécifique exprimé en $\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ qui met en rapport le débit du cours d'eau en un point avec la superficie du bassin versant à l'amont de ce point. Le débit spécifique est inversement proportionnel à la taille du bassin versant. Les petits bassins versants des régions montagneuses tropicales peuvent débiter jusqu'à $20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$. Pour la Somme (bassin versant : $5\,530 \text{ km}^2$), cours d'eau de plaine aux excès fortement atténués par les nappes souterraines, le débit en crue

« centennale » est de $110 \text{ m}^3/\text{s}$ soit 20 l/s/km^2 . Pour le bassin versant de l'Aude, dont la superficie ($5\,340 \text{ km}^2$) est sensiblement la même, le débit a atteint $4\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ lors de la crue historique du 13 novembre 1999, soit près d' $1 \text{ m}^3/\text{s/km}^2$.

Le déroulement d'une crue est reconstitué par un hydrogramme présentant l'évolution du débit au cours de l'épisode. Sa forme permet de distinguer les crues rapides (hydrogramme « pointu ») des crues lentes (hydrogramme plus aplati). Le hyéto-gramme (évolution des précipitations) montre les relations entre l'épisode pluviométrique et hydrologique. Le temps de concentration (figure 21) entre le pic pluviométrique et la pointe de crue est d'autant plus réduit que le bassin versant est petit et que la pente est forte. Il dépend aussi des formations superficielles et de leur état de saturation en eau juste avant l'événement.

La configuration topographique explique la cinématique des crues. Les vallées se caractérisent par des profils en long et des profils en travers variés. Dans les parties amont, le profil en travers est en V. Les vallées sont étroites, encadrées par des versants à forte pente. La forte pente des thalwegs induit des crues de types torrentiels : forte vitesse, débit spécifique élevé, forte charge alluviale grossière. Vers l'aval, les vallées s'élargissent. Les lits s'individualisent plus ou moins nettement : lit mineur toujours en eau, lit moyen et lit majeur périodiquement ou rarement inondés. Un troisième type de profil, dit « en toit », se rencontre plutôt dans les basses vallées : le lit mineur est surélevé de quelques mètres par rapport à la plaine alluviale qui s'étend parfois sur plusieurs kilomètres de largeur. Cette disposition (figure 22) s'explique par la progradation due au tri granulométrique décroissant des alluvions au fur et à mesure que l'on s'éloigne du lit mineur. Lors des crues débordantes, les sédiments fluviatiles les plus grossiers se déposent à proximité immédiate du lit mineur. Les rives du fleuve ont tendance à s'exhausser, dominant ainsi de quelques mètres les points bas, situés parfois à plusieurs kilomètres du lit mineur. Ce fonctionnement explique que beaucoup de personnes non averties (nouveaux habitants, étrangers) soient surprises par l'arrivée des eaux en période de crue car les zones les plus fréquemment et

Figure 21
L'hydrogramme : un outil de base pour comprendre les crues



duement inondées ne sont pas situées à proximité du cours d'eau.

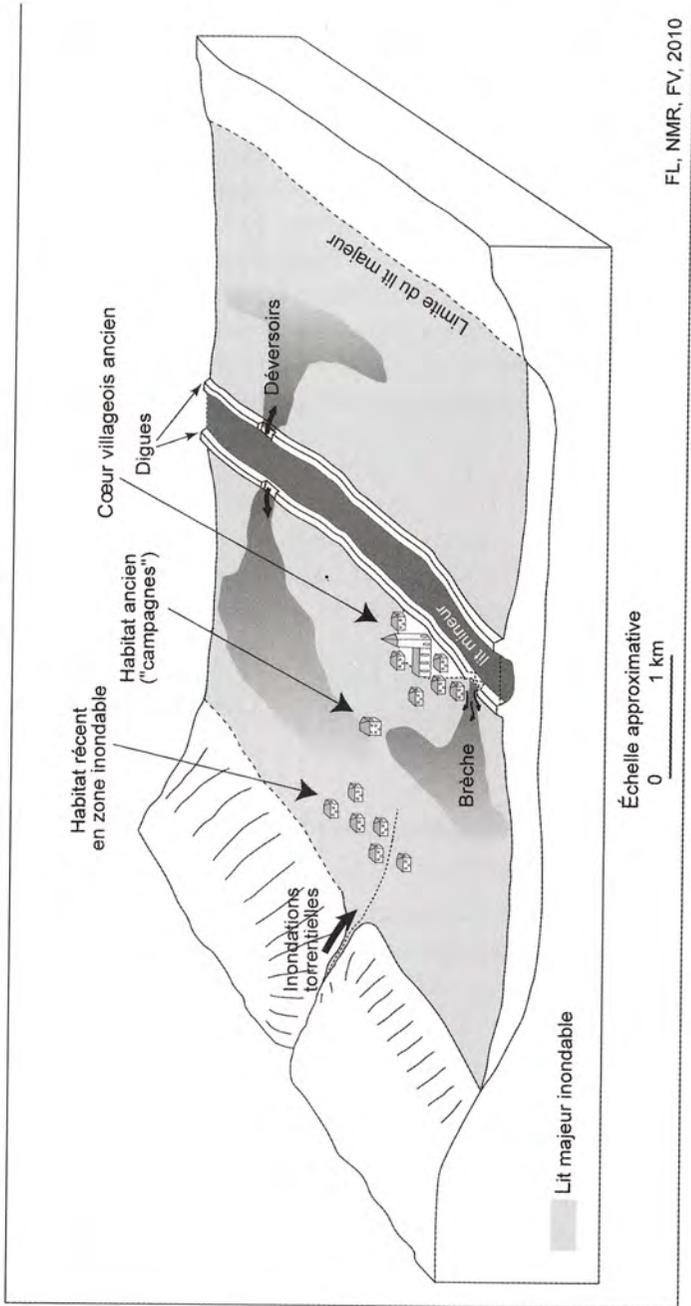
L'habitat traditionnel s'est implanté sur les sites plus élevés, soit sur des éminences naturelles de la plaine, soit sur le bourrelet de berge derrière les digues ou au contact entre la plaine inondable et les collines encaissantes. Ce type de disposition se rencontre dans la plupart des grandes vallées fluviales (Mississippi aux États-Unis, Pô en Italie, les grands fleuves chinois), mais aussi sur des cours d'eau riverains de la Méditerranée. La fixation du lit mineur par des aménagements aggrave cette différence altitudinale. Sur le Huang He (fleuve jaune en Chine), le lit mineur endigué domine parfois d'une vingtaine de mètres la plaine alentour. Cette situation est à l'origine des défluviations majeures de ce fleuve qui en 2000 ans a changé plus de 26 fois son cours sur des centaines de kilomètres en passant au nord ou au sud de la péninsule du Shandong (Doulet et Gervais-Lambony, 2000, p. 61). On a affaire alors à des crues de volume car ce qui détermine les surfaces inondées ce n'est pas le débit de pointe mais la durée de dépassement de la crue débordante. Dans ces basses plaines, le contrôle anthropique des crues s'exerce par les déversoirs qui répartissent géographiquement les débordements.

- **Méthodes et sources pour la caractérisation de l'aléa « inondation »**

Pour reconstituer les inondations, leur cinématique et leur emprise spatiale, les hydrologues disposent d'outils et de méthodes divers. Il s'agit de modèles qui tentent de reconstituer l'écoulement des cours d'eau à partir de données hydrométriques ou pluviométriques complétées par des données sur l'état de surface du bassin versant.

À l'amont, on utilise des modèles pluie-débit qui déduisent des débits à partir d'une lame d'eau précipitée. Les modèles débit-débit sont des modèles de transfert ; ils cherchent à déduire à partir d'un débit donné à l'amont son évolution vers l'aval. Dans les parties inférieures des cours d'eau, les modèles à casiers prennent en compte la complexité des plaines. Compte tenu des

Figure 22
La disposition en toit des basses plaines



nombreux obstacles (routes, digues, canaux) que l'eau rencontre sur ces espaces peu pentus, l'écoulement de la crue est modélisé comme le remplissage itératif de bassins ou casiers.

Ces modèles ont besoin de supports topographiques les plus fins possibles : profil en long et en travers et si possible modèles numériques de terrain. Les données hydrologiques sont issues des mesures de terrain (limnigraphes, jaugeages effectués par les services gestionnaires des cours d'eau). Mais souvent les séries limnimétriques sont trop courtes et lacunaires et les jaugeages trop rares pour les crues majeures (figure 20, sur www.licence.puf.com). Afin de caractériser au mieux les périodes de retour des débits, il faut des séries de mesures les plus longues possible ; aussi les hydrologues ont-ils recours aux données historiques pour retrouver les niveaux d'eau atteints par les crues passées. Les archives écrites contiennent des renseignements intéressants (partie 4.II.1) qui complètent les repères de crues sur les rives des cours d'eau et les relevés de hauteur des laisses de crue effectués après chaque crue majeure.

Les approches modélisatrices sont complétées par une approche plus naturaliste dite approche hydrogéomorphologique. Elle consiste à identifier les différents lits qui composent la plaine alluviale d'un cours d'eau. Cette identification permet ensuite de déterminer l'importance de l'inondabilité associée à chacun de ces espaces. Elle a été définie par des géographes-géomorphologues d'Aix-en-Provence (Masson *et al.*, 1996 ; Chave, 2003) et de Toulouse (Lambert *et al.*, 2001). Cette méthode a été adoptée par le MEEDDAT. Elle complète les méthodes classiques de détermination de l'aléa hydrologique (modélisation hydraulique) en proposant une approche globale du cours d'eau, considéré dans son fonctionnement amont-aval. La mise en œuvre de cette méthode est particulièrement bien adaptée aux secteurs à faible enjeu ou/et lorsque les zones à couvrir sont vastes.

Cette approche applique aux vallées les principes et méthodes de l'analyse géomorphologique pratiquée par les géographes depuis longtemps. L'analyse de photographies aériennes permet un premier zonage fonctionnel de l'espace complété par des levés de terrain (profils transversaux et longitudinaux, étude

des dépôts alluviaux...). Le rendu cartographique distingue la zone non inondable (l'encaissant), et la zone considérée comme inondable, qui prend le nom de plaine alluviale fonctionnelle (ensemble des lits fluviaux). On distingue entre deux et quatre lits fluviaux en fonction du régime du cours d'eau : le lit mineur où s'écoulent les eaux pérennes, le lit moyen qui est le lit où se répandent les premiers débordements (inondé tous les 5 à 15 ans), le lit majeur ordinaire et le lit majeur exceptionnel qui permet l'évacuation des eaux des crues les plus rares. Chacun de ces lits est séparé par un talus qui marque la transition entre les différentes unités de la plaine alluviale fonctionnelle. D'autres critères peuvent aider à l'identification des formes fluviales, comme la végétation (ripisylve, espèces hygrophiles et pionnières), les paysages et le type de culture. Même si la méthode comporte des limites, notamment dans les zones basses soumises à des défluviations, les cartes produites reconstituent la fonctionnalité de l'hydrosystème : chenaux de crues, ripisylve, rupture de pente, zone d'accumulation ou d'érosion... Elles sont appréciées des gestionnaires de bassin versant.

• Les facteurs déterminant les crues

Ainsi la cinématique des crues dépend des caractéristiques intrinsèques de chaque bassin versant, dont :

- la superficie du bassin versant ;
- l'orographie ;
- l'orientation du bassin versant par rapport aux flux humides ;
- l'état de surface du bassin versant : végétation, imperméabilisation par des constructions ;
- les formations superficielles, la géologie et les conditions hydrogéologiques : présence de karst ou, au contraire, roches imperméables, formations superficielles permettant de stocker une part des précipitations... ;
- la morphologie de la vallée fluviale : zones d'expansion des crues naturelles... ;
- les aménagements (barrages, digues, chenalisation...).

Cette cinématique dépend également de facteurs conjoncturels liés aux précipitations (intensité et cumul, répartition et déplacement, état de saturation initial des formations superficielles et géologiques, présence d'une couche de neige). Enfin peuvent intervenir d'autres facteurs conjoncturels liés aux variations saisonnières de la couverture végétale naturelle ou cultivée et à la gestion des aménagements anthropiques (barrages).

Comme exemple de conditionnement des crues par l'état de surface, on citera le cas des précipitations de printemps dans les zones de grande culture en région parisienne. La période mai-juin est favorable à la formation de crues éclaircies car, à cette date, les bassins versants ne sont pas protégés par une couverture végétale continue. De même, en zone tropicale, les premières averses de la saison des pluies sont plus efficaces car, après plusieurs mois de saison sèche, elles tombent sur un sol qui n'est pas protégé par un tapis herbeux.

- La complexité des scénarios pluvio-hydrologiques

La diversité des facteurs énoncés ci-dessus explique qu'une crue ressemble rarement à une autre. Le cas des deux épisodes de pluies consécutifs dans le Gard en septembre 2005 illustre la complexité des scénarios pluvio-hydrologiques (voir figure 23 – *Précipitations et crues dans le bassin du Vistre en septembre 2005* sur www.licence.puf.com). Début septembre 2005, deux événements pluviométriques ont affecté le Languedoc à deux jours d'intervalle. Le bassin versant du Vistre a été affecté par les deux événements. Lors du premier épisode, le 6 septembre, les précipitations ont dépassé 300 mm sur le bassin versant (191 mm au Cailar). Elles ont été à peine supérieures à 200 mm lors du second épisode du 8 septembre (145 mm au Cailar). Sur l'hydrogramme du Vistre, la seconde pointe de crue est supérieure à la première. Les pluies du 6 septembre étaient les premières de la saison après un été sec. Une partie a été stockée par les sols et les formations karstiques. En revanche, les pluies du 8 septembre sont tombées sur des sols et des karsts saturés. Le coefficient d'écoulement a donc été plus efficace.

Ainsi les crues ne sont-elles pas proportionnelles aux précipitations. L'efficacité hydrologique des précipitations (coefficient d'écoulement) est tributaire de l'état de saturation du bassin versant (Cosandey, 2003, p. 72).

c – Typologies des inondations d'origine climatique

On distingue couramment les inondations en fonction de la vitesse de montée des eaux. Les trois paramètres essentiels sont l'intensité des précipitations, la pente et la taille du bassin versant.

Tableau 13
Typologie simplifiée des inondations

Type d'inondation	Caractéristiques	Principales zones concernées	Exemple
Inondation en zone urbaine et périurbaine	Due à des pluies locales de forte intensité. Petits bassins versants. Montée des eaux très rapide , pratiquement concomitante du pic pluviométrique, renforcée en zone urbaine par la présence de surfaces imperméabilisées .	Zones urbaines avec fortes pentes sous climat à précipitations intenses.	Bab el Oued, Alger, novembre 2001 Nîmes, octobre 1988
Crue torrentielle	Bassins versants de taille moyenne (100 à 5000 km ²) des secteurs collinaires. Pente forte Vitesse de l'eau > 2 m/s. Propagation de l'onde de crue entre 5 et 15 km/h.	Zones collinaires et montagneuses sous climat à précipitations intenses (tropical, méditerranéen, continental).	Big Thompson floods (Colorado), 31 juillet 1976 Biescas (Espagne), 1996 Crues du Gard, 2002

Inondation par submersion marine	Provoquée par des invasions de la mer lors des tempêtes après rupture du cordon littoral et surcote marine.	Côte basse, côte à lido, estuaires.	Pays-Bas, 1953 Lagune de Venise
Les crues par remontée de nappe	Montée des eaux très lentes (1 à 10 cm/jr). Crues conditionnées par la géologie. Durées de submersions longues (plusieurs mois parfois). Souvent associées à des inondations de plaine.	Plaines basses à formations géologiques perméables.	La Somme, 2001
Inondation de plaine	Partie basse des bassins versants. Faible pente. Écoulement et montée de l'eau lents sauf rupture d'ouvrage. Durée de submersion parfois longue (plusieurs jours à plusieurs semaines). Vastes zones inondées.	Cours d'eau des régions à pluviométrie peu intense et faibles pentes. Plaine alluviale des grands fleuves. Débâcles des fleuves de climat à hiver froid.	Crues de la Tamise, Loire, Seine, 1910. Crue des fleuves sibériens

Source : d'après F. Vinet, 2003.

• Les inondations lentes

Les inondations lentes sont caractérisées par des débits six à dix fois supérieurs au module et des montées du niveau de l'eau de l'ordre du centimètre à l'heure. Cette lenteur est due à la faible pente du lit, à sa largeur, qui permet l'expansion des eaux, et à la faible intensité des précipitations. Ces inondations sont assez universelles et touchent par exemple les grands bassins versants de l'Europe du Nord (Elbe, 2002, crues de la Loire, de la Tamise) ou de l'Amérique du Nord (Mississippi). Malgré la lente montée des eaux, ce type d'inondation est responsable de très lourds bilans humains liés à l'ampleur des zones touchées et aux dommages

aux cultures vivrières. Les défluviations du Huang He firent plus d'un million de victimes en 1887 comme en 1938.

- **Les inondations par remontée de nappe**

Les inondations lentes par excellence sont les inondations par remontée de nappe. Le bassin de la Somme a connu en 2001 des inondations qui ont sinistré plusieurs milliers d'habitations et coûté 80 millions d'euros de dommages. Le réseau hydrographique de la Somme s'écoule sur la nappe de la craie, formation géologique très perméable qui fonctionne comme une véritable éponge. En période d'étiage, la nappe phréatique à son niveau le plus bas alimente le lit mineur de la Somme. Après des précipitations abondantes sur plusieurs mois voire plusieurs années, le réseau souterrain ne peut plus évacuer l'eau précipitée ; la nappe se met en charge, son niveau monte jusqu'à déborder en surface par des sources temporaires. La Somme dont la pente est très faible est de plus ralentie dans sa partie inférieure par les marées. Lorsque la marée est haute, les eaux ne peuvent s'évacuer, ce qui aggrave l'inondation.

L'examen du film des précipitations sur le bassin de la Somme montre bien qu'il s'agit d'un phénomène cumulatif (et non instantané comme les crues torrentielles). Les crues de la Somme ont eu lieu en avril 2001. Or les hivers précédents avaient été plus pluvieux que la moyenne. L'hiver 2000-2001 lui-même avait connu un cumul de pluie extraordinaire puisque tous les mois d'octobre à avril (sauf février) ont été excédentaires. Enfin, alors que les nappes et les sols étaient gorgés d'eau, le « coup de grâce » est venu d'un mois de mars très pluvieux (330 % des précipitations moyennes à Abbeville).

- **Les inondations de type torrentiel**

La vitesse de montée des eaux est beaucoup plus brutale que dans les inondations précédentes. Le niveau de l'eau peut monter de plus d'un mètre à l'heure. La vitesse de l'eau qui peut atteindre 7 m/s ne doit pas être confondue avec la vitesse de propagation de l'onde de crue qui est de l'ordre de 10 à 15 km/h

(20 km/h dans les gorges de l'Ardèche). Les débits peuvent être plus de 600 fois supérieurs au module.

Les crues torrentielles concernent les petits bassins versants des régions associant fortes pentes et averses de forte intensité liées aux nuages à développement vertical (partie 3.1). Elles connaissent une saisonnalité différente selon les zones : saison des pluies ou période cyclonique en régions tropicales, automne en régions méditerranéennes, printemps et été en régions à climat continental.

Les dommages sont liés à la brutalité de l'arrivée des eaux mais aussi aux débris transportés qui génèrent des embâcles, c'est-à-dire l'obstruction des ponts par des branchages, troncs d'arbres et autres carcasses de voiture. La charge solide transportée est importante, ce qui contribue à la destruction des cultures par engrèvement. Les limons déposés altèrent les biens mobiliers et immobiliers. En France, sur les vingt dernières années, les crues méditerranéennes ont entraîné les deux tiers des dommages globaux dus aux inondations (source : CCR).

• Les inondations en zone urbaine

Les inondations en zone urbaine ne constituent pas un type d'inondation mais plutôt un risque croissant compte tenu du développement des zones urbaines dans le monde (partie 4.1.2). Les inondations s'apparentent à des crues torrentielles mais la présence d'une zone urbanisée amplifie le risque (Desbordes et Noyelle, 1994). On distingue les inondations périurbaines (pour lesquelles le danger vient des cours d'eau affluents qui convergent vers une agglomération) des inondations urbaines *stricto sensu* (le réseau d'évacuation des eaux pluviales est pris en défaut et ne peut évacuer l'eau précipitée à l'aplomb de la ville).

Parkings, toitures, routes augmentent le taux d'imperméabilisation et donc le coefficient de ruissellement. Lorsque la part du bassin versant ainsi imperméabilisée devient significative, le temps de concentration et le temps de propagation des crues sont raccourcis.

De plus, la géométrie du réseau d'évacuation des eaux pluviales intervient. Sa pente est augmentée et sa longueur réduite afin de réduire le diamètre des buses d'évacuation et limiter l'ensablement. Les zones d'expansion des crues sont réduites ; enfin, l'urbanisation crée des obstacles à l'écoulement. Les obstacles transversaux comme des chaussées surélevées ou des remblais de voie de chemin de fer créent des retenues artificielles à l'amont et aggravent localement le risque d'inondation. Les obstacles parallèles aux flux canalisent les eaux et accroissent localement la vitesse d'écoulement.

Le problème majeur reste l'inadaptation des capacités hydrauliques des cours d'eau urbains. La ville d'Alger a connu une inondation torrentielle meurtrière le 10 novembre 2001. Les précipitations de l'ordre de 200 mm ont provoqué des ruissellements très rapides sur le bassin versant de l'oued Lazhar très urbanisé. Faute d'un réseau d'évacuation souterrain efficace, les eaux et la boue se sont répandues dans le quartier de Bab El Oued causant la mort de 800 personnes.

• Les submersions marines

Les inondations littorales sont dues à l'invasion d'eau de mer dans les basses terres proches des côtes. Elles sont liées à une augmentation anormale du niveau de la mer due à un vent d'afflux lors des tempêtes et cyclones (partie 3.I).

On le voit, l'aléa « inondation » correspond en réalité à des phénomènes très divers dans leurs causes et leurs manifestations : phénomènes brutaux et quasi-instantanés comme les tsunamis ou les crues torrentielles, ou phénomènes cumulatifs comme les remontées de nappe. L'approche de leur gestion est évidemment très différente. Pour les phénomènes lents, les nuisances sont liées à la durée de submersion mais il n'y a en général pas de danger pour la vie humaine. En revanche, les phénomènes brutaux sont beaucoup plus dangereux, bien que certains soient prévisibles. La prévention doit s'adapter au contexte socio-économique et au type d'aléa (Parker, 2000 ; Andjelkovic, 2001), comme précisé en partie 5.

3 Les feux de forêts

La définition d'un feu de forêt dépend des pays touchés mais aussi de ce que l'on entend par forêt (type de végétaux, superficie...) ou des critères retenus pour collecter l'information (lieu d'éclosion et distance par rapport à la forêt, type de propriété, taille du feu). Au sens strict, il est possible de distinguer le feu (allumé et contrôlé par l'homme, notamment dans le cadre de pratiques agricoles de type brûlis) de l'incendie (feu jamais maîtrisé par l'homme ou dont il a perdu le contrôle). Mais l'expression « feu de forêt » reste largement utilisée pour désigner les incendies non contrôlés. Depuis 1973, la base de données Prométhée (encadré n° 2) a favorisé l'adoption d'une terminologie homogène en France. Auparavant, les statistiques divergeaient sensiblement selon les acteurs faute de définitions communes : en 1971 dans les Bouches-du-Rhône, les forestiers comptabilisaient 250 incendies de forêt alors que les pompiers en retenaient 1 500. Par « feu », on entend aujourd'hui « une combustion qui se déroule sans contrôle dans le temps et dans l'espace » (*Guide méthodologique PPRif*, 2002) et l'on parle de « feu de forêt méditerranéenne » lorsque l'incendie a atteint, et ce quelle que soit la surface parcourue, des forêts, landes, garrigues (formation végétale basse et plutôt ouverte développée sur des sols calcaires), ou maquis (formation végétale basse, dense et fermée, développée sur des sols siliceux) d'une superficie d'au moins un hectare d'un seul tenant. Le terme « atteint » signifie que les étages arbustifs ou arborés sont partiellement ou totalement détruits.

a – Les caractéristiques de l'aléa

Pour qu'un incendie se déclenche et se propage, trois conditions doivent être réunies. La présence de combustible (végétation forestière) et de comburant (oxygène) est nécessaire, de même qu'une source de chaleur comme déclencheur (étincelle d'origine naturelle comme la foudre ou d'origine anthropique

comme un mégot de cigarette ou le passage d'un train). Volontaires ou non, 95 % des départs de feu dans le monde sont dus à l'homme. En forêt, le risque de propagation dépend d'abord de l'état du peuplement (entretien, densité, teneur en eau, disposition des strates de végétation...) et ensuite de la composition floristique. Les massifs forestiers peuvent être classés en fonction de leur sensibilité au feu, évaluée en fonction de leur susceptibilité à provoquer des éclosions (inflammabilité) et/ou à renforcer la puissance d'un feu existant (combustibilité). Les formations végétales les plus sensibles sont les formations boisées adultes, denses, avec une stratification bien développée. Les formations basses méditerranéennes sont très inflammables mais sont moins combustibles que d'autres car le volume de matériaux à brûler est moindre.

– **L'inflammabilité** correspond à la facilité avec laquelle s'enflamment les végétaux. L'éclosion et la rapidité de développement des feux en dépendent. Elle est mesurée à travers le temps que met le combustible pour s'enflammer sous l'effet de la chaleur.

– **La combustibilité** correspond à la puissance de feu (énergie calorifique exprimée en kilocalorie par mètre carré). Elle dépend de la structure et des espèces dominantes, ainsi que de la saison : la forêt boréale canadienne présente une combustibilité élevée en fin d'été.

La vulnérabilité des forêts dépend aussi des conditions météorologiques. De fortes températures et une humidité relative faible dessèchent les végétaux par évapotranspiration. De faibles précipitations et une faible capacité de rétention en eau du sol aggravent le phénomène. Le vent joue un rôle important car il augmente ce dessèchement du sol et des végétaux, accélère la combustion par apport d'oxygène et propage l'incendie en favorisant les sautes de feu. Le relief, enfin, agit en interaction avec les autres facteurs. Sur les versants au vent le feu accélère, tandis qu'il ralentit sur les versants sous le vent. Les sautes de feu sont plus faciles sur ces derniers car les brandons poussés par le vent propagent l'incendie sur le versant opposé.

ENCADRÉ N° 2

La base de données Prométhée (<http://www.prométhée.com>)

La base de données Prométhée sur les incendies de forêt a été créée en 1973 et rassemble des données sur les incendies de la zone de défense Sud, soit les 15 départements des 4 régions du sud-est de la France (Corse, Languedoc-Roussillon, PACA, Rhône-Alpes). Elle se présente sous la forme de fiches feu, créées par un SDIS lors du traitement d'un feu de forêt, avec des champs d'information à renseigner, certains obligatoirement (département, commune, coordonnées DFCI, date, heure d'alerte, surface parcourue par le feu, dates et heures de début et de fin d'intervention). Ces données peuvent ensuite être complétées par d'autres services comme les forestiers, gendarmes, policiers. La précision des données peut donc être assez variable d'une fiche à l'autre.

Les progrès technologiques réalisés depuis 1973 dans la collecte des informations ont permis d'en améliorer d'année en année la précision, la fiabilité et la localisation. Le site internet de Prométhée est créé en 1997 et entraîne des améliorations importantes : chaque acteur (pompier, forestier, gendarme, coordinateur « Prométhée ») accède directement aux données et peut modifier et compléter les fiches feu. En particulier, depuis 1997, les forestiers peuvent renseigner les causes de feu (ce qu'ils font très majoritairement dans l'Hérault et en Corse) alors qu'auparavant, seuls les gendarmes le pouvaient. Depuis 1997, le taux de renseignement des causes augmente pour atteindre le record de 90 % dans l'Hérault en 2005 (ce taux n'était que de 10 à 20 % entre 1973 et 1992). La connaissance de la cause devient un élément clé de la prévention des incendies, mais les enquêtes sont souvent difficiles. La saisie de certaines causes n'apparaît que très récemment. Ainsi, dans l'Hérault, la « malveillance » comme cause de départ de feu n'est jamais saisie dans la base avant 1997, mais représente pour la période 1997-2005 la première cause dans ce département avec près de 50 % des causes supposées, probables ou connues. Dès lors, avant 1997, la fiabilité du renseignement de la cause apparaît comme discutable et biaisée. La classification des causes des feux dans Prométhée est actuellement organisée en cinq familles, elles-mêmes subdivisées en classes et sous-classes (tableau 14). Depuis 30 ans, la base Prométhée joue ainsi un rôle majeur dans l'évolution des stratégies et des techniques de prévention, prévision et lutte contre les feux de forêts en France.

Tableau 14
Typologie des causes de feux de forêts
codées dans la base Prométhée

1. Naturelle	2. Accidentelle liée aux installations	3. Malveillance origine humaine intentionnelle	4. Involontaire lié aux travaux professionnels	5. Involontaire lié aux particuliers
11 Foudre	21 Lignes électriques	31 Conflit	41 Travaux forestiers	51 Travaux
	211 rupture	311 occupation du sol	411 machine-outil	511 machine-outil
	112 amorçage	312 chasse	412 feux végétaux sur pied	512 feux végétaux sur pied
	22 Chemin de fer	32 Intérêt	413 feux végétaux coupés	513 feux végétaux coupés
	23 Véhicule	321 occupation du sol	42 Travaux agricoles	52 Loisirs
	231 échappement, freins	322 cynégétique	421 machine-outil	521 jeu d'enfants, pétards...
	232 incendie	323 pastoralisme	422 feux végétaux sur pied	522 feu d'artifice
	24 Dépôts d'ordures	33 Pyromanie	423 feux végétaux coupés	523 barbecue, feu loisirs...
	241 officiel		424 feu pastoral	53 Jets d'objets incandescents
	242 clandestin		43 Travaux industriels	531 mégot de promeneur
			431 machine-outil	532 mégot par véhicule
			432 feux végétaux sur pied	533 fusée de détresse
			433 feux végétaux coupés	534 déversement cendres chaudes
			44 Reprise incendie	

Source : Prométhée.

b – Répartition géographique

Les incendies sont avant tout provoqués par les activités humaines. En ce sens, comme dans le cas des avalanches, ce risque a évolué dans le temps pour être aujourd'hui un véritable risque anthropique, même si des processus naturels interviennent dans sa réalisation. Chaque année, les feux de forêt brûlent 5,1 milliards de tonnes de biomasse, 95 % de ces incendies étant d'origine humaine. L'Afrique subsaharienne (où plus de 170 millions d'hectares brûlent chaque année) et l'Australasie représentant 80 % des surfaces incendiées. En 2000, plus de 350 millions d'hectares de forêts ont brûlé, soit l'équivalent de la superficie de l'Inde. La FAO considère que la fréquence et l'intensité des feux augmentent et montre du doigt l'expansion incontrôlée de l'agriculture et du tourisme. La gravité des conséquences des feux (voir figure 24 – *Nombre de morts liés aux feux de forêts dans le monde sur 30 ans (1979 à 2008)* sur www.licence.puf.com) est soulignée lors de manifestations comme la 4^e Conférence internationale sur les feux de forêt (Séville, 13-17 mai 2007) qui a rassemblé 1 500 experts de plus de 80 pays. Les risques induits y sont également rappelés : érosion des sols et glissement de terrain.

Au Canada, 8 500 à 10 000 feux brûlent en moyenne 2,5 millions d'hectares par an. Les surfaces brûlées varient beaucoup : en 1978, le bilan atteignait 0,3 million d'hectares, contre 7,5 millions en 1989 (à comparer au million d'hectares de terre cultivés). Les causes principales sont l'activité humaine et la foudre. En moyenne, la foudre est responsable d'un tiers des feux au Canada, mais ceux-ci brûlent 90 % de la superficie détruite par incendie. Ceci s'explique par le fait que ces feux dus à la foudre se situent dans des régions du Nord peu habitées, où la détection est plus difficile. Les feux causés par l'activité humaine sont beaucoup plus nombreux mais plus petits. La forêt boréale canadienne subit de grands feux, notamment à l'ouest, du fait de sa composition (conifères), du climat et de l'immensité de l'espace boisé. Les feux font partie de l'équilibre de l'écosystème : la reproduction de certains arbres (pin gris) dépend du feu qui ouvre les

cônes et permet aux graines de tomber sur un sol fertilisé par les cendres. Les graines de séquoias géants, dans l'ouest américain, ne peuvent germer qu'après le passage d'un feu, et l'exceptionnelle teneur en tanin de leur écorce épaisse permet aux individus adultes de bien résister au passage de ces incendies naturels récurrents. Enfin, le feu favorise la biodiversité en créant des clairières permettant à des espèces pionnières de se développer en pleine lumière. Le feu assure également une certaine autorégulation puisqu'après son passage, la quantité de combustible ayant fortement diminué, l'aléa est lui aussi réduit. Ainsi, même si la majorité des feux est combattue au Canada, dans certains parcs nationaux et dans les régions peu fréquentées du Nord, on laisse les feux brûler tant que des enjeux ne sont pas directement menacés.

ENCADRÉ N° 3

Principales causes de départ de feux dans les zones rurales du monde selon la FAO

- Le déboisement agricole pratiqué (dans le cadre d'une agriculture itinérante par exemple) sans un savoir-faire suffisant pour maîtriser le feu.
- L'incinération des résidus et déchets.
- La chasse et la collecte de miel.
- Les activités récréatives et touristiques qui sont en forte augmentation.
- L'exode rural, qui conduit à un moins bon entretien de la forêt, une réduction du pâturage et de la collecte de bois de chauffe.
- Les travaux routiers et liés à la voirie.
- Les incendies criminels, les activités militaires et les conflits fonciers.

c – Bilans économiques et humains

Le coût des dommages directs (destruction des forêts) et indirects (biens publics et privés détruits) et le coût de la lutte contre les incendies sont estimés par la FAO à plusieurs milliards de dol-

lars par an. Pour reprendre l'exemple canadien, les dépenses opérationnelles (extinction des incendies, prévention, brûlage dirigé), supportées par les gouvernements provinciaux, territoriaux et par Parcs Canada, coûtent en moyenne 400 millions de dollars par an (1990-2001). Les dommages directs aux biens (sans compter la perte liée à la valeur marchande du bois brûlé) dépassent en moyenne 10 millions de dollars par an. Le dernier feu ayant fait des victimes civiles au Canada est celui du canton de Dance (Ontario) en 1938 qui a fait 20 morts. Mais entre 1986 et 2005, ce sont 34 employés impliqués dans la lutte contre les feux qui y ont laissé la vie.

L'Asie du Sud-Est est particulièrement touchée par les feux de forêt, notamment lors de la crise de 1997-1998. La combustion de centaines de milliers d'hectares affecta la santé de 70 millions de personnes et perturba le trafic aérien et maritime. La convergence de facteurs naturels et humains explique cette situation. En 1997, conséquence d'el Niño, l'Asie du Sud-Est subit la plus importante sécheresse de ces cinquante dernières années, liée au retard des pluies de mousson. En Indonésie, les incendies d'août 1997 au Kalimantan sont favorisés par un substrat riche en tourbières et en veines de charbon (lignite) affleurantes et sub-affleurantes : le feu couvait depuis 1982-1983, années où 3,5 millions d'hectares ont brûlé, les pluies de mousson ne suffisent pas pour éteindre les foyers. Au Sarawak (Malaisie) l'état d'urgence est décrété le 19 septembre 1997. 2 millions d'habitants doivent se calfeutrer chez eux pour échapper aux fumées. En avril 1998, l'Amazonie brésilienne, les Philippines (Palawan) et le Mexique sont également touchés. Mais la cause principale de ces incendies est humaine, liée à la pratique traditionnelle du brûlis et surtout aux évolutions économiques de l'exploitation forestière et agricole. Le manque d'eau, les difficultés d'accès, l'insuffisance des moyens de lutte favorisent la propagation des feux. En Indonésie, 500 000 à 700 000 ha de forêts ont été transformés en plantations (palmier à huile, eucalyptus, cocotiers) en 15 ans : le feu permet aux exploitants d'éliminer rapidement les arbres sans valeur et de planter des essences rentables sur un sol enrichi par les cendres. Les lois et règlements

contre les feux ont été durcis, mais beaucoup d'enquêtes n'aboutissent pas. Au Brésil, c'est la politique de colonisation de l'Amazonie par des agriculteurs sans terres venus du sud et du nord-est du pays qui explique la situation. Allumer des feux est plus efficace, plus rapide et moins cher pour la mise en culture que d'utiliser des bulldozers... et permet également aux populations pauvres de contourner une réglementation contraignante.

En Europe aussi, les conditions politico-économiques expliquent parfois la recrudescence des incendies. En Grèce, la mafia brûle la garrigue et la forêt pour y installer un habitat illégal (il y a aujourd'hui environ 150 000 habitats illégaux en Attique) qui est ensuite légalisé sous la pression des habitants ; l'État grec restant impuissant à maîtriser ces trafics. Les incendies de 2007 firent 70 morts, 5 400 sinistrés et 1 750 millions de dollars de dommages (données CRED-EMDAT) et le bilan des incendies de 2009 n'est pas encore connu.

→ Conclusion : risques d'origine climatique et réchauffement de l'atmosphère

Le changement global (*global change*) lié au réchauffement du climat recouvre une réalité complexe qui comprend le réchauffement de l'atmosphère et ses conséquences, la plupart envisagée comme catastrophiques et nuisibles pour l'homme. La problématique s'est répandue dans la littérature scientifique dans les années 1980 puis a gagné la scène médiatique et politique dans les années 1990 pour occuper une place croissante dans les enjeux politiques internationaux actuels. Nous ne reprendrons pas ici en détail les caractéristiques du changement climatique. La littérature est extrêmement abondante (Le Treut, 2009 ; La Documentation française, 2009 ; Deneux, 2002) et accessible notamment par les rapports de l'IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, <http://www.ipcc.ch/>).

La communauté scientifique est globalement unanime à constater le réchauffement du climat. Le GIEC-IPCC prévoit une augmentation de 2 à 4 °C de la température moyenne de l'atmosphère d'ici 2100.

Cependant, le lien entre un réchauffement de l'atmosphère et une éventuelle augmentation des risques liés aux climats n'est pas évident. L'évolution d'un système, fut-il naturel, n'est pas univoque. Les effets du réchauffement climatique ne seront pas tous catastrophiques et seront même bénéfiques dans certaines parties du globe. Deux questions se posent. Le réchauffement de l'atmosphère s'est-il traduit et se traduira-t-il par une augmentation des phénomènes météorologiques intenses (cyclones, tempêtes, inondations, sécheresse...) ? Deuxièmement, comment intégrer cette évolution (avérée ou non) dans la prévention des risques ?

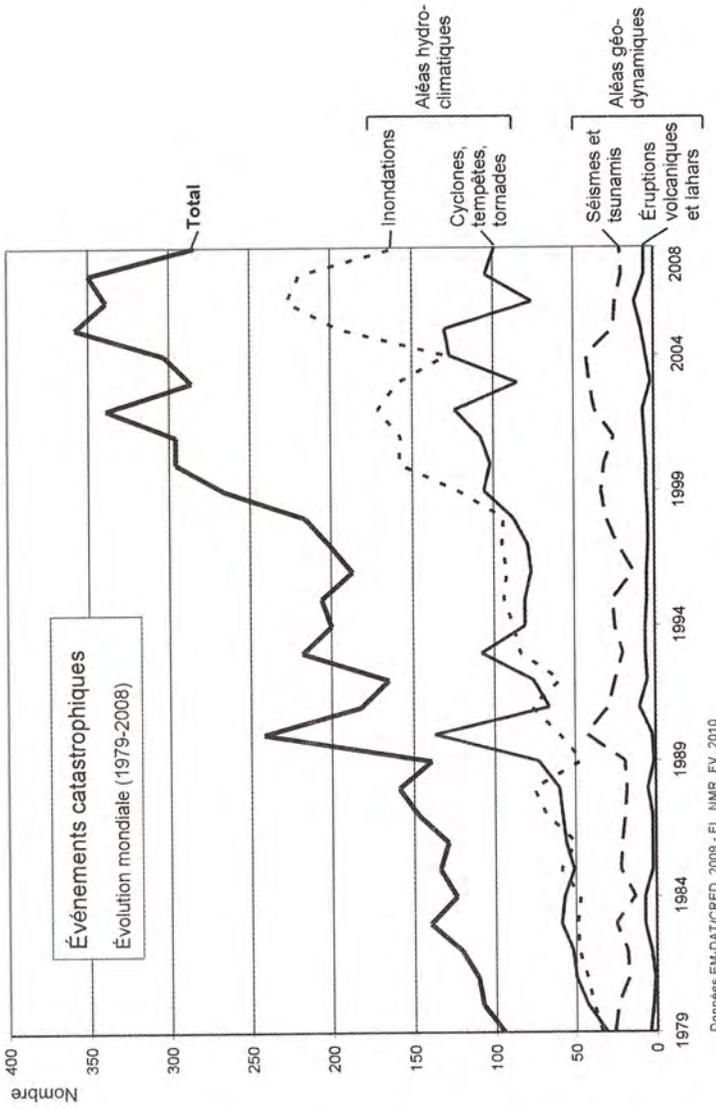
Depuis trente ans, les courbes d'évolution du nombre de catastrophes montrent une tendance à la hausse significative pour les phénomènes hydrométéorologiques comparés aux événements géodynamiques internes dont l'évolution reste globalement stable sur cette même période (figure 25). Cette augmentation traduit certainement une amélioration des méthodes et des réseaux de collecte des informations alimentant la base de données EM-DAT du CRED utilisée. Compte tenu du caractère invariable des critères de sélection des événements, elle peut aussi être interprétée comme une conséquence du changement climatique mondial. Cependant, lorsqu'il s'agit de relier cette augmentation des catastrophes avec une augmentation des aléas, les rapports des scientifiques sont moins affirmatifs que sur l'augmentation de la température moyenne.

À l'échelle mondiale, les rapports du GIEC prévoient une augmentation des phénomènes extrêmes mais les évolutions à l'échelle régionale ne sont pas décrites précisément. En réalité, si l'on admet le réchauffement de l'atmosphère, certaines conséquences sont probables, d'autres beaucoup plus incertaines.

Pour la bande sahélienne, les résultats des recherches sont contradictoires. Il est souvent fait état d'une augmentation des sécheresses mais l'évolution du climat africain au Quaternaire tendrait à associer les périodes chaudes avec une recrudescence de la pluviométrie au Sahel. Si l'on prend l'exemple du risque inondation en France, les projections évoquent une augmentation de cet aléa mais les chroniques hydrologiques historiques ne montrent pas d'augmentation du débit des cours d'eau au cours du siècle dernier malgré le réchauffement du climat (Lang et Renard, 2007).

En revanche, l'augmentation de certains risques est quasi-certaine, en particulier ceux liés à la remontée du niveau de la mer. Un exhaussement du niveau de la mer de l'ordre de 40 à 50 cm est prévu à l'horizon 2100 (Paskoff, 2001). L'augmentation du niveau de la mer n'est pas un risque en soi mais plutôt un facteur aggravant. Pour un cyclone ou une tempête d'une intensité donnée, les effets sur les littoraux (érosion des côtes, submersion marine) seront amplifiés si le niveau moyen de la mer monte (Ullmann, 2008). De même, les risques liés à la déglaciation des

Figure 25
Évolution différenciée du nombre de catastrophes naturelles depuis 30 ans dans le monde



régions polaires ou montagnardes (mouvements de terrain, ruptures de poches d'eau sous-glaciaires) devraient devenir plus fréquents. Pour les cyclones, la théorie voudrait que l'aléa augmente mais la question d'une augmentation de leur fréquence ou de leur intensité ou des deux à la fois n'est pas tranchée. Enfin, on remarquera que le risque de vague de froid devrait logiquement diminuer dans les décennies à venir.

En conclusion, il faut se garder d'une réponse générale quant à la relation entre réchauffement de l'atmosphère et augmentation des phénomènes climatiques intenses. Le réchauffement de l'atmosphère n'est pas un risque en soi ; il peut être un facteur d'aggravation de certains aléas. L'évolution future des aléas naturels est sans doute nuancée et doit être considérée selon chaque type d'aléa et pour chaque zone climatique du globe. La question du changement climatique ne doit pas non plus occulter d'autres problèmes. Certains géographes (Brunel, 2004 ; Gaillard, 2007) dénoncent la mise en exergue systématique des questions climatiques qui évite de poser les véritables problèmes de développement et de déséquilibre Nord-Sud, eux-mêmes facteurs de risques (voir partie suivante).

➔ QUATRIÈME PARTIE

Les vulnérabilités au cœur des risques naturels

- ➔ I. Contrastes géographiques
- ➔ II. Risques et histoire : le poids
des héritages
- ➔ III. Conclusion

L'étude des risques naturels en géographie a longtemps mis l'accent sur les aléas, présentés dans les deux précédentes parties. Mais depuis quelques décennies, les bilans humains et économiques des catastrophes rappellent combien la dimension humaine du risque est fondamentale. C'est dans ce domaine des vulnérabilités que les travaux récents des géographes renouvellent le plus l'approche des risques dits naturels.

Cette quatrième partie propose, sans être exhaustive, quelques thèmes majeurs d'analyse. Les contrastes économiques et humains de la géographie des catastrophes et des risques montrent combien les disparités de développement pèsent lourd à l'échelle mondiale. À d'autres échelles, les bouleversements récents du monde contemporain (étalement urbain, processus de métropolisation et de mondialisation) modifient profondément les enjeux et les vulnérabilités. Ces transformations ne sont pas seulement quantitatives (concentrations urbaines de populations et d'activités) mais également qualitatives. De nouveaux enjeux apparaissent (réseaux de communication...); de nouvelles vulnérabilités, notamment dans les grandes métropoles, doivent être identifiées et analysées pour une bonne évaluation des risques.

Cette évolution des vulnérabilités n'est pas nouvelle et le recours à l'histoire remet en perspective ces évolutions récentes, tout en précisant le contexte socioculturel qui permet de penser les risques naturels comme un objet d'étude à part entière. L'utilité des archives historiques est largement reconnue et intégrée dans les dispositifs réglementaires de gestion des risques d'aujourd'hui (PPR notamment). Mais le poids culturel des héritages politiques et administratifs dans la gestion et la représentation des risques est encore souvent méconnu. Il convient donc de le définir et de préciser de quelle manière il peut affecter les dispositifs de gestion des risques et les jeux d'acteurs. Ces derniers seront abordés dans la dernière partie de l'ouvrage.

→ I. Contrastes géographiques

① Risques du Nord, risques du Sud

a – Les enseignements des bilans mondiaux

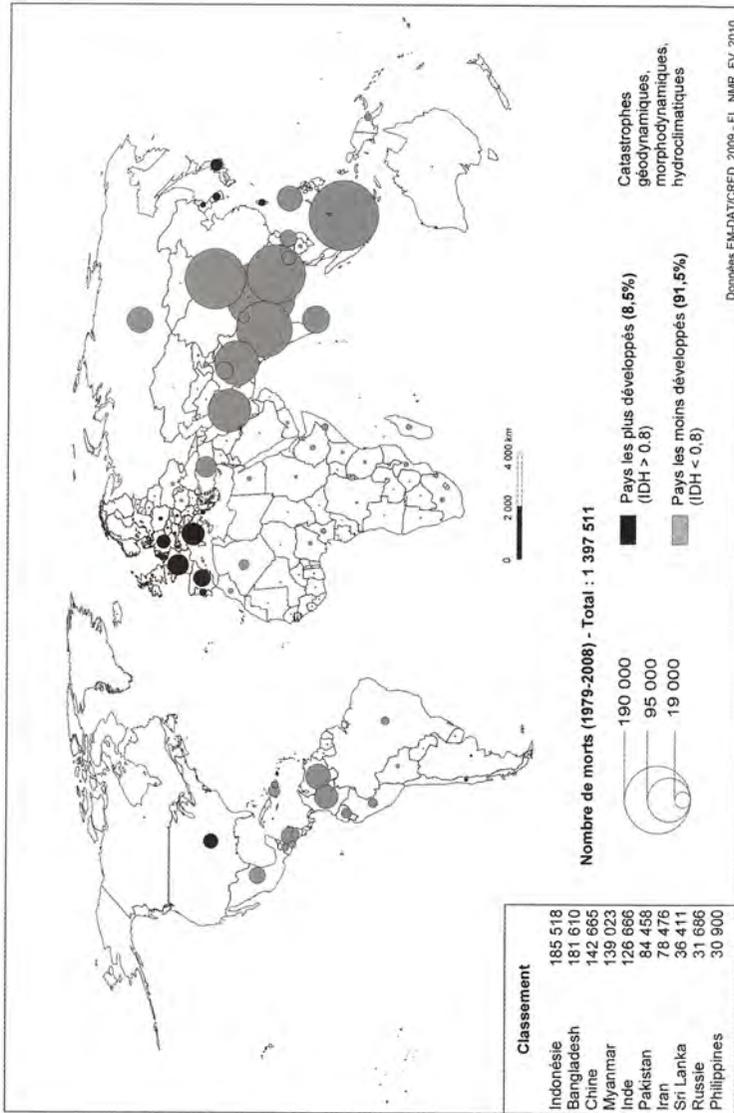
- Des pertes humaines majoritaires dans les Suds

L'ampleur des dommages générés par le tsunami du 26 décembre 2004 autour de l'Océan Indien, du séisme du Sichuan en Chine et du cyclone Nargis au Myanmar en 2008 nous a récemment rappelé que les pays du Sud sont les plus touchés par des catastrophes déclenchées par des phénomènes naturels. Selon la base de données EM-DAT du CRED, 76 % des catastrophes (99,8 % des victimes) recensées durant l'année 2008 se sont produites dans un pays dont l'indice de développement humain (IDH)¹ ne dépasse pas 0,8, soit le seuil fixé par les Nations unies entre « développement humain moyen » et « développement humain élevé ». Ces désastres ont touché avant tout les pays d'Asie et d'Océanie, d'Afrique, d'Amérique latine et de la Caraïbe.

L'ampleur des catastrophes naturelles dans les pays du Sud est accentuée par l'importance des pertes humaines. Les pays les moins développés ont enregistré depuis trente ans (1979-2008) 91,5 % des décès (figure 26) alors qu'on y recense 70 % des témoignages d'événements dommageables (figure 2). Les treize pays les plus touchés sur cette période appartiennent au monde

1. L'IDH est un indicateur composite calculé chaque année depuis 1990 par le 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 (i.e. le PIB par habitant après transformation).

Figure 26
 Contraste Nord-Sud des pertes humaines imputables à des catastrophes naturelles depuis 30 ans (1979-2008)



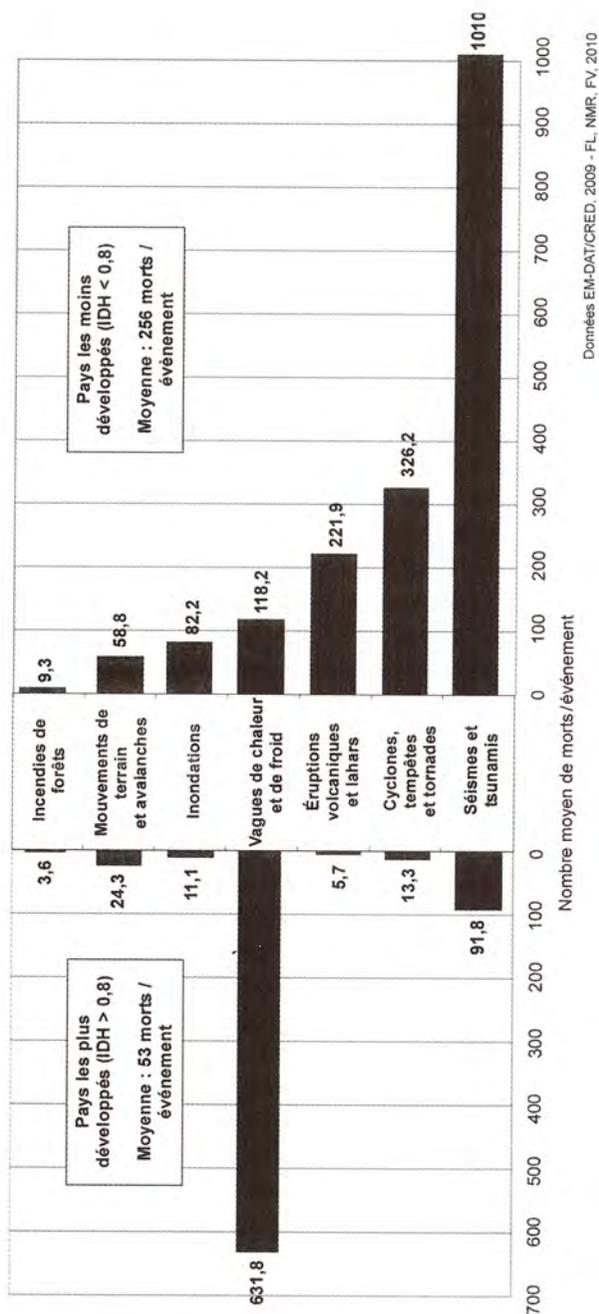
en développement : Indonésie, Bangladesh, Chine, Myanmar, Inde, Pakistan, Iran, Sri Lanka, Russie, Philippines.

Dans le détail (figure 27), on peut voir que les cyclones, tornades et tempêtes frappent plus durement les pays en développement où l'on recense en moyenne 326 morts par événement contre 13 pour les pays riches. Depuis trente ans, les séismes et les tsunamis associés ont fait en moyenne 1 010 victimes par événement dans les pays en développement contre 92 dans les pays développés. Les éruptions volcaniques y ont fait en moyenne 221 morts par événement contre 13 pour les pays riches. Les seuls phénomènes pour lesquels ces tendances s'inversent sont les vagues de chaleur et de froid, qui ont fait en moyenne 632 morts dans les pays développés contre 118 dans le monde en développement.

• Des bilans économiques à relativiser

En termes de coûts, cette cartographie du monde est globalement inversée. D'après le CRED, et hormis le cas de la Chine fortement impactée par le séisme de 2008, les bilans économiques les plus élevés concernent les pays développés (IDH > 8,0). Les pertes économiques mondiales cumulées sur trente ans s'approchent de 1 630 milliards de dollars, dont 64 % pour les pays développés. Les pays les plus concernés sont les États-Unis et le Japon, suivis dans des proportions dix fois inférieures par l'Italie, l'Inde, l'Allemagne, le Royaume Uni, la France et la Russie (figure 28). D'après Munich Re, il apparaît que parmi les 40 catastrophes d'origine naturelle les plus coûteuses en terme de dommages assurés, 38 ont concerné des pays développés (figure 31, p. 222). Les deux plus coûteuses ont frappé les États-Unis (cyclone Katrina en 2005 et séisme de Los Angeles en 1994) et 38 sont le résultat de phénomènes hydrométéorologiques. Précisons que ces bilans économiques n'intègrent le plus souvent que les pertes directes liées à l'endommagement des infrastructures (coût de remplacement) et qu'ils ignorent, tout comme les bilans concernant les victimes, les conséquences indirectes de ces événements sur le moyen terme et *a fortiori* sur le long terme. Ces bilans témoignent de l'importance des enjeux économiques et matériels dans les pays riches,

Figure 27
 Comparaison Nord/Sud (pays développés/en développement) du nombre moyen de victimes de catastrophes naturelles par événement et par phénomène, depuis 30 ans (1979-2008)



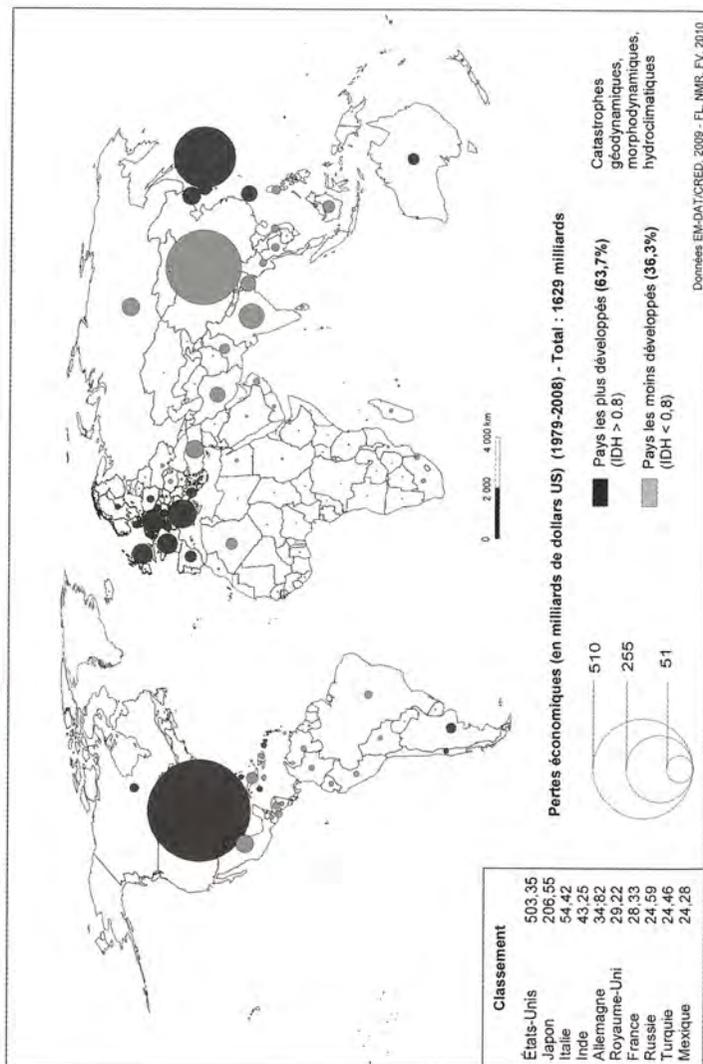
mais aussi et surtout de leur capacité à recenser des dommages sur des systèmes de production et des infrastructures majoritairement assurés. Dans les pays du Sud, seules quelques grandes sociétés bénéficient d'une couverture en cas de dommages importants et les individus sont très rarement assurés pour leurs biens propres. Si on prend l'exemple du séisme du Sichuan de 2008 (Chine), sur 85 milliards de dollars de pertes totales, seulement 300 millions portaient sur des biens assurés (0,3 %), alors que pour le cyclone Katrina de 2005 aux États-Unis, 49 % du coût total de la catastrophe correspondaient à des biens assurés.

Mais ce contraste économique des catastrophes naturelles doit être nuancé et relativisé. En effet, rapporté aux ressources des États concernés, il est beaucoup plus sévère au Sud qu'au Nord et beaucoup plus pénalisant en terme de développements futurs. J. Abramovitz (2001) note ainsi que le total des pertes économiques des pays du Sud pour la période 1999-2001 dépasse 13 % du PIB des États concernés contre seulement 2 % pour les pays du Nord. Si l'on prend le cas du cyclone Nargis du Myanmar de 2008, l'impact économique direct a approché les 4 % du PNB du pays. Par ailleurs, le développement très rapide de pays comme la Chine ou l'Inde laisse augurer un alourdissement des bilans des catastrophes.

- Quelques variables explicatives des contrastes

Certains de ces contrastes mondiaux éclairés par les bilans humains peuvent s'expliquer par une suractivité des phénomènes naturels dans les pays du Sud. On constate par exemple que les zones d'activité cyclonique du Pacifique, de l'Océan indien ou de l'Atlantique affectent essentiellement des territoires à faible IDH, excepté les côtes du sud-est des États-Unis, du Japon et du nord de l'Australie, et quelques dépendances comme les DOM-COM français (figure 16). L'activité sismique moyenne à forte se manifeste davantage sur ces mêmes pays qui ont enregistré 73 % des séismes de magnitude supérieure ou égale à 5 depuis trente ans. L'activité volcanique est quant à elle presque autant présente dans le monde en développement (60 % des volcans actifs) que développé (40 %).

Figure 28
 Contraste Nord-Sud des pertes économiques imputables à des catastrophes naturelles
 depuis 30 ans (1979-2008)



Certains territoires peuvent cumuler presque toute la gamme des aléas naturels à impacts élevés, surtout en Asie du Sud-Est (Indonésie, Philippines), en Amérique latine et dans la Caraïbe (sismicité, tsunamis, volcanisme, cyclones). De rares situations analogues se présentent aussi dans des pays riches comme le Japon qui compte 108 volcans actifs, une forte exposition aux tsunamis due à la longueur de ses côtes, et dont le territoire est à 95 % concerné par un aléa sismique fort à très fort. Les milieux insulaires tropicaux sont de loin les plus menacés en termes d'emprise spatiale des aléas naturels et de contraintes de développement associées. À titre d'exemple, la moitié du territoire de la Martinique est exposée au moins à un aléa naturel élevé de type mouvements de terrains, effets d'amplification locale des séismes, volcanisme, inondations et submersion marine (dont les tsunamis et les houles cycloniques) (Leone, 2002).

Globalement, ces contrastes d'exposition Nord/Sud sont donc marqués par une plus grande activité des principaux phénomènes naturels et par des pertes humaines (totales et par événement) plus importantes dans les pays en développement. Inversement, les pertes économiques sont plus importantes dans les pays du Nord, car les dommages y sont mieux recensés et davantage assurés. Sur le plan des victimes, on peut être tenté d'expliquer les différences constatées par la présence d'enjeux humains plus importants dans les pays en développement (environ 80 % de la population mondiale). Mais en fait, seulement 40 % des pays à plus fortes moyennes de densités humaines (plus de 200 hab./km²) et les plus exposés aux menaces géodynamiques et hydroclimatiques (au moins une catastrophe depuis 30 ans) appartiennent au monde en développement ($IDH < 0,8$). Par contre, 80 % des populations situées à moins de 50 km des volcans actifs ayant connu une activité historique appartiennent à des pays à faible $IDH (< 0,8)$. De même, 76 % des villes de plus de 20 000 habitants du bassin méditerranéen exposées à un aléa sismique fort à très fort appartiennent à des pays en développement. Cependant, il apparaît bien difficile d'expliquer l'ampleur, notamment humaine, des catastrophes à l'échelle mondiale par les seules fréquences des aléas et l'importance des enjeux présents. D'autres causes sont à rechercher, en particulier d'origine

socio-économique et institutionnelle, qui tendent à démontrer que la catastrophe est bien une construction sociale contrôlée par différents facteurs de vulnérabilité, au premier rang desquels figurent la croissance urbaine, la pauvreté et l'exclusion. Cette croissance urbaine, souvent alimentée par un exode rural encore actif dans certains pays en développement et/ou en guerre, a contribué à urbaniser de plus en plus des sites à risque. Dans ces conditions, les secteurs dangereux (à fortes pentes ou proche d'un cours d'eau par exemple) récupèrent les laissés-pour-compte, en marge des zones d'urbanisation contrôlées et soumises à la spéculation foncière. Depuis 1950, le nombre de villes de plus d'un million d'habitants est passé de 83 à près de 400 aujourd'hui et sera probablement proche de 530 en 2015. Le fait le plus marquant depuis le début des années 1970 est un transfert du processus d'urbanisation vers les pays en développement. De 44 en 1950, le nombre de ces villes passera à 398 en 2015, soit près de 76 % du total (voir figure 29 – *Évolution comparée du nombre de villes de plus d'un million d'habitants dans le monde depuis 1950 et projections pour 2015* sur www.licence.puf.com). On estime par ailleurs que 40 des 50 grandes villes à la plus forte croissance urbaine se trouvent dans des zones fortement sismiques et appartiennent pour la majorité à ces pays en développement. C'est par exemple le cas, pour la période 1995-2000 (Chester *et al.*, 2001), de La Paz, Guayaquil, Asunción, Lima, Caracas, Bogota ou Mexico. Comme nous le verrons dans la partie 4.1.2, cette tendance exponentielle à l'urbanisation des pays les moins développés accroît l'exposition et la vulnérabilité des populations, en particulier dans les quartiers les plus pauvres.

b – Des pays en développement plus propices aux catastrophes naturelles

Il est possible, dans un but expérimental, de hiérarchiser les pays du monde selon leur propension aux catastrophes naturelles. Cette opération repose sur le croisement de trois indicateurs, conformément à la définition analytique du risque – qui est le produit d'un aléa et d'enjeux affectés d'un certain degré de

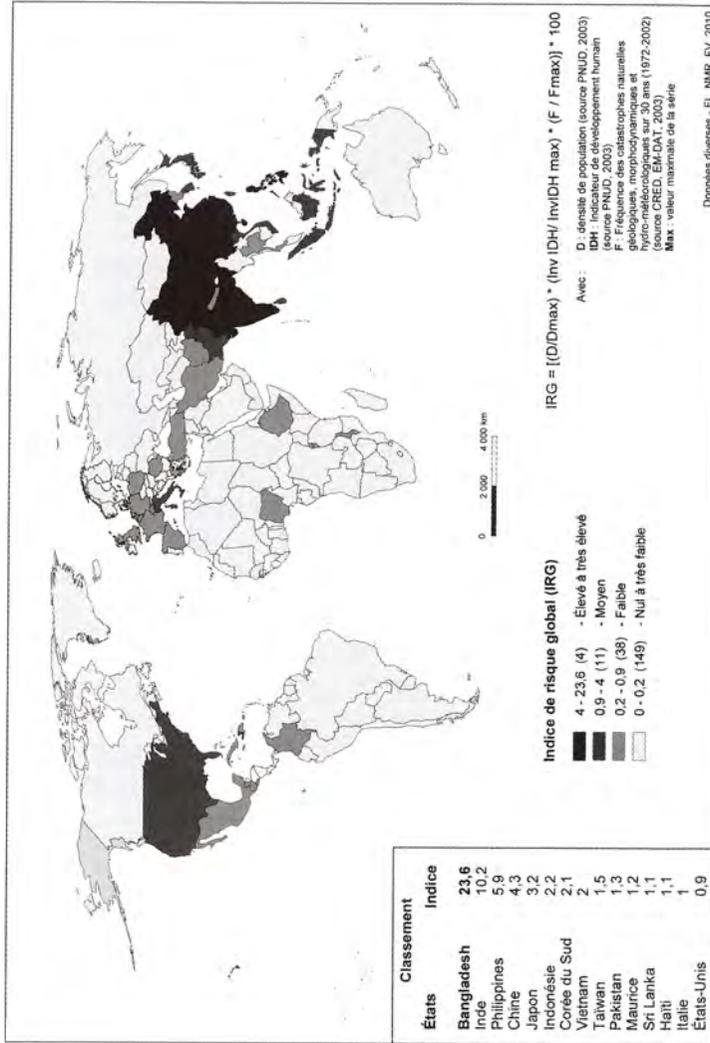
vulnérabilité. On débouche sur un indice de risque global (IRG) établi à l'échelon national. La vulnérabilité y est estimée à travers l'IDH qui peut en traduire certains aspects, comme la capacité de réponse face à un événement dommageable (moyens économiques et structurels) ou le niveau d'information des populations (taux d'alphabétisation). D'autres macro-indicateurs 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. Cela se vérifie surtout dans des pays à très faible IDH.

Les enjeux humains sont pris en compte à travers les densités moyennes de population. La composante aléa est établie à partir des fréquences de catastrophes d'origine naturelle depuis trente ans (période 1973-2002) fournies par la base de données EM-DAT. Cette considération probabiliste de l'aléa est établie sur une fenêtre d'observations courte qui peut exclure des événements de forte intensité et faible fréquence. La carte obtenue (figure 30) montre que les indices de risque les plus élevés concernent essentiellement l'Asie et le monde en développement. Parmi les quinze pays les plus concernés, deux font figure d'exception au regard de l'importance des risques de catastrophes encourus : le Bangladesh et l'Inde. Ils sont suivis des Philippines et de la Chine. Le Japon, l'Italie et les États-Unis sont les trois premiers grands pays industrialisés les plus prédisposés sur la base de ces critères d'évaluation.

c – Des facteurs quotidiens de vulnérabilité exacerbés dans les pays du Sud

D'une façon générale, les contrastes sociogéographiques en matière de pertes humaines s'expliquent principalement par des conditions de vulnérabilité différentes, en nature et en intensité, suivant les niveaux de développement. Les conditions de vulnérabilité aux catastrophes naturelles sont plus marquées dans le monde en développement et y sont enracinées dans des diffi-

Figure 30
Carte de prédisposition au risque de catastrophe naturelle basée sur la construction
d'un indice de risque global par pays



cultés chroniques liées à la pauvreté, à la faiblesse des institutions et aux héritages historiques (Gaillard, 2007) : difficultés d'accès aux ressources et aux espaces hors de danger, pénurie alimentaire, précarité de l'existence quotidienne, manque de préparation, fragilité des constructions... Il s'agit d'autant de facteurs socio-économiques, culturels, historiques, démographiques, institutionnels, organisationnels, politiques, conjoncturels, techniques ou psychologiques, qui contribuent à la fragilité des populations au quotidien.

Les catastrophes touchent en premier lieu des laissés-pour-compte de l'ordinaire ou des oubliés du développement, ce qui représente bien souvent la majorité des habitants des pays du Sud. Les victimes de catastrophes sont vulnérables car elles sont marginalisées :

- géographiquement car elles habitent des secteurs menacés par des phénomènes naturels ;
- socialement car elles sont très souvent issues de groupes minoritaires ;
- économiquement car elles sont bien souvent pauvres ;
- politiquement car leur parole n'est pas reconnue sur la scène politique.

Un faisceau d'indicateurs cristallise la vulnérabilité des victimes de catastrophes (Cannon, 1994 et 2000). Celles-ci sont le plus souvent des femmes, des enfants et des personnes âgées, des handicapés, des prisonniers. Les catastrophes frappent aussi plus souvent les individus aux revenus limités et fragiles (faibles salaires, emplois informels, absence d'épargne) qui limitent la protection contre les aléas naturels (localisation du domicile, type d'habitat, connaissance des moyens de protection). La vulnérabilité résulte également d'une protection sociale insuffisante et d'un capital social réduit.

La vulnérabilité s'inscrit donc dans des contraintes sociales, historiques, et politico-économiques entremêlées. Les contraintes sociales incluent le difficile accès à la terre et aux ressources d'une population en forte croissance. En Asie comme en Amérique latine, des milliers de paysans sans terre en quête de sécu-

rité alimentaire s'installent sur des espaces exposés à des aléas naturels pour échapper à des systèmes agraires féodaux. Pour se nourrir au quotidien, on accepte de s'exposer à une éruption volcanique décennale ou à un typhon saisonnier plutôt que de reverser 75 % de sa récolte aux propriétaires des bonnes terres. De même, les conflits armés et les guérillas forcent des milliers de victimes à s'établir dans des secteurs menacés par des phénomènes naturels. La menace d'un tsunami « centennal » pèse moins lourd que la violence quotidienne. À ce titre, il n'est pas anodin que les deux régions les plus touchées par le tsunami du 26 décembre 2004 ont été frappées par des conflits armés multi-décennaux (Aceh et la côte est du Sri Lanka).

Les déséquilibres d'accès aux ressources sont souvent hérités des époques coloniales qui ont façonné les systèmes politiques de nombreux pays du Sud autour d'une élite resserrée contrôlant les activités économiques et le pouvoir, cloisonnant ainsi les victimes de catastrophes dans une situation de pauvreté chronique. L'orientation croissante de l'économie des pays du Sud vers les cultures d'exportation a également contribué à l'accroissement de la vulnérabilité en fragilisant l'accès aux ressources et en affaiblissant la sécurité alimentaire des victimes de catastrophes. Le cas des paysans du Sahel que l'on a poussé à délaisser leurs cultures de subsistances traditionnelles et un système agricole adapté aux conditions naturelles pour travailler dans des plantations fragiles face aux aléas climatiques est symptomatique.

Aux contraintes sociales et aux héritages historiques s'ajoute le contexte politico-économique. L'économie basée sur les cultures de rente mise en place par les gouvernements coloniaux successifs s'est traduite par une forte dépendance vis-à-vis du contexte économique mondial au travers d'une relation centre-périphérie classique. Quand les prix des matières premières se sont effondrés sur les marchés internationaux dans les années 1970 et 1980, les pays du Sud n'ont eu d'autres choix que de recourir à des prêts massifs pour financer le développement économique et acquérir des produits pétroliers. Dans beaucoup de pays du Sud, le remboursement de la dette, promulgué par la Banque mondiale et le Fonds monétaire international au travers des Programmes d'ajustements structurels,

monopolise à lui seul plus de 10 % du PIB alors que les investissements dans les domaines de la santé et de l'éducation ne dépassent pas 2 % chacun.

La prévalence d'intérêts particuliers au détriment des besoins collectifs est un autre facteur majeur de vulnérabilité dans les sociétés du Sud. Les stratégies et décisions politiques sont traditionnellement des affaires élitistes qui se déroulent au sommet de l'État. De plus, la corruption détourne une partie importante des budgets nationaux au détriment de la réduction de la vulnérabilité.

Ces causes structurelles de la vulnérabilité sont indéniablement liées les unes aux autres et interagissent de manière systématique sur le mal-développement des sociétés du Sud et la vulnérabilité des populations exposées à des aléas naturels. Les racines de la vulnérabilité se confondent en effet avec les causes d'autres crises traversées par les pays du Sud : crises sociales liées à la pauvreté, crises économiques liées à la difficile insertion dans le système-monde et crises politiques révélées par les nombreux conflits armés qui secouent cet hémisphère. Dans le cas du Bangladesh, Wisner *et al.* (2004) ont montré comment l'ampleur des catastrophes successives déclenchées par des inondations tient à un inégal accès à la terre et aux ressources, accentué par les méfaits des héritages coloniaux et des stratégies politiques contemporaines élitistes. De ces causes structurelles découlent un nombre important d'individus vivant en zone inondable, des revenus fragiles et limités n'assurant pas la sécurité alimentaire des victimes ainsi que l'absence de protection sociale et d'investissements dans les infrastructures sanitaires.

② Des enjeux et des vulnérabilités accrus dans un monde de plus en plus urbanisé

Nous venons de voir combien le niveau de développement est important pour apprécier la vulnérabilité et combien ce paramètre explique les disparités fortes observées dans la géographie des risques. Mais on ne peut comprendre ces disparités sans

introduire un autre thème : la question de la croissance des villes et du développement urbain.

a – La ville : lieu de danger ou de sécurité ?

À différentes échelles, locale comme mondiale, la concentration des enjeux dans les zones de danger apparaît comme un facteur majeur d'augmentation de la vulnérabilité. Ce processus, très rarement réversible, est lié à l'attractivité de territoires exposés directement ou indirectement au risque : ils offrent un certain nombre d'aménités immédiates alors que la probabilité de réalisation de l'aléa peut être faible ou perçue comme lointaine. En effet, la ville a longtemps été perçue en Occident comme un espace de sécurité en tant que lieu de civilisation par opposition à la nature sauvage ou aux espaces ruraux mal maîtrisés. On y mangeait mieux et on y mourait moins qu'à la campagne... du moins en l'absence de grandes épidémies. Encore aujourd'hui, cette représentation positive et protectrice existe notamment dans des villes du Sud : l'exode rural est le moteur principal de la croissance car la ville apparaît comme plus sûre que l'espace rural environnant, tant du point de vue alimentaire que sanitaire ou professionnel, ce qui favorise en retour un accroissement naturel important par diminution de la mortalité (notamment maternelle et infantile).

Dans le passé, les villes ont cependant été longtemps concernées par trois grands types d'aléas plus ou moins naturels : les épidémies, les famines et les incendies. Les fortes densités et la structure urbaine (maisons mitoyennes longtemps construites en bois, rues étroites, rareté de l'eau) expliquent largement pourquoi les villes étaient plus vulnérables que d'autres espaces à ces aléas. Mais même dans ce cas, les risques urbains ne doivent pas être déconnectés de la campagne environnante : la vulnérabilité urbaine est en partie issue des campagnes, d'où est originaire une partie de la population urbaine, souvent la plus fragile, venue tenter sa chance en ville mais dont les conditions de vie, d'habitat, d'éducation, de sociabilité, sont bien souvent précaires.

Parallèlement à une image de la ville comme espace sûr, d'autres représentations, plus négatives, circulent. Cette ambiguïté s'enracine d'abord dans la dualité du message chrétien sur la ville. À l'image de la Jérusalem céleste, ville sûre car haut lieu de l'alliance entre Dieu et les hommes, s'oppose l'image de la ville comme lieu de perte et de corruption (Sodome ou Babylone) où les aléas naturels sont commandés par Dieu pour punir ses créatures. Les inondations, séismes, mouvements de terrain traduisent ainsi la colère divine, et non la réalisation d'un risque. Le siècle des Lumières voit également revenir un discours négatif sur la ville, en contrepoint de celui sur une nature bonne et favorable à l'homme (mythe du bon sauvage chez Rousseau). Mais c'est également à cette époque, à l'occasion du fameux séisme de Lisbonne du 1^{er} novembre 1755, que se développe un discours scientifique sur la catastrophe. Ce séisme sous-marin, dont l'épicentre se situait au sud-ouest des côtes portugaises, d'une magnitude estimée à 8,5, détruisit la ville et provoqua des incendies qui brûlèrent une semaine durant. Ressenti jusqu'en Écosse, ce séisme provoqua un tsunami qui ravagea quelques heures plus tard le port de Lisbonne et surprit les survivants tentant de fuir par la mer. 15 000 habitants de Lisbonne périrent et l'événement eut un retentissement international, notamment grâce aux gazettes et à la controverse fameuse entre Voltaire et Rousseau. La catastrophe ayant eu lieu le jour de la Toussaint, et de nombreuses victimes ayant été tuées dans l'effondrement des églises, l'interprétation de l'événement comme une punition divine s'en trouvait renforcée et Voltaire (1756) s'en fit l'écho dans son « Poème sur le désastre de Lisbonne » :

Quel crime, quelle faute ont commis ces enfants
Sur le sein de leur mère écrasés et sanglants ?
Lisbonne, qui n'est plus, eut-elle plus de vices
Que Londres, que Paris, plongés dans les délices ?
[...] Ou l'Homme est né coupable et Dieu punit sa race
Ou ce maître absolu de l'être et de l'espace,
Sans courroux, sans pitié, tranquille, indifférent
De ses premiers décrets suit l'éternel torrent [...].

Dans sa lettre du 18 août 1756, Rousseau (1756) répond à Voltaire en jetant les bases d'une première distinction entre aléa et vulnérabilité :

La plupart de nos maux physiques sont encore notre ouvrage. Sans quitter votre sujet de Lisbonne, convenez par exemple, que la nature n'avait point rassemblé là vingt mille maisons de six à sept étages, et que si les habitants de cette grande ville eussent été dispersés plus également et plus légèrement logés, le dégât eût été beaucoup moindre, et peut-être nul. [...] Vous auriez voulu (et qui n'eût pas voulu de même ?) que le tremblement de terre se fût fait au fond d'un désert plutôt qu'à Lisbonne. Peut-on douter qu'il s'en forme aussi dans les déserts ? Mais nous n'en parlons point parce qu'ils ne font aucun mal aux messieurs des villes, les seuls hommes dont nous tenions compte ; ils en font peu aux animaux et aux sauvages qui habitent épars dans des lieux retirés, et qui ne craignent ni la chute des toits, ni l'embrasement des maisons. Mais que signifie un pareil privilège ? Serait-ce donc à dire que l'ordre du monde doit changer selon nos caprices, que la nature doit être soumise à nos lois, et que, pour lui interdire un tremblement de terre en quelque lieu, nous n'avons qu'à y bâtir une ville ?

Cet événement conduisit beaucoup de savants de l'époque à s'interroger sur les causes du désastre et à approfondir les recherches en géologie en rejetant les interprétations religieuses. Ce changement d'attitude face aux risques s'exprime aussi à travers la décision du Premier ministre portugais, le marquis de Pombal, qui expulsa les jésuites de Lisbonne. Mais l'ambiguïté demeure, puisque la ville fut reconstruite rapidement et la catastrophe fut ainsi l'occasion de mener à bien un projet urbanistique de grande ampleur et très novateur pour l'époque, qui nourrit encore aujourd'hui l'attractivité de la ville, notamment à travers le tourisme. La vulnérabilité ne s'en trouva donc pas réduite.

Au XIX^e et au début du XX^e siècle, les profondes mutations sociales et urbaines liées au développement de l'industrie en Europe et en Amérique du Nord (exode rural, pollutions...) alimentent un discours négatif sur la ville et font évoluer sa vulnérabilité. Cette dernière augmente par la concentration d'enjeux humains et économiques, mais diminue en terme sanitaire et social avec les progrès de la médecine et de l'hygiène, le déve-

loppement des réseaux d'égouts et d'eau potable, notamment après les grandes épidémies urbaines de choléra au cours des années 1830. Les progrès des techniques et matériaux de construction réduisent nettement la vulnérabilité du bâti face aux incendies.

La population mondiale était de 1 milliard au début du XIX^e siècle, 2 milliards au début du XX^e siècle, 6 milliards en 2000 et plus de 9 milliards prévus pour 2050. Cette augmentation accélérée au cours des dernières décennies se double d'une concentration importante sur des espaces réduits (2/3 de la population mondiale se concentre sur 10 % des terres), en particulier sur des territoires urbains. En un siècle, la population urbaine a été multipliée par 20 alors que la population mondiale augmentait d'un facteur 4. On parle parfois d'explosion urbaine car les citadins étaient 14 % en 1900, 28 % en 1950, et sont aujourd'hui plus de 51 %, dont 4 % vivent dans des mégapoles de plus de 10 millions d'habitants. Ces chiffres généraux cachent d'énormes disparités géographiques puisque plus de 75 % de la population est urbaine en Amérique latine, aux Caraïbes ou en Europe (plus de 90 % en Belgique) alors qu'elle est encore rurale à près de 60 % en Afrique ou en Inde. La croissance urbaine est d'abord le fait des pays en développement, où elle atteint 4 et 5 % par an (Asie, Afrique) contre 0,8 % en Europe. Caracas, au Venezuela, a vu sa population doubler entre 1987 et 2003, avec un taux de croissance de 3,1 % par an et des densités urbaines allant de 6 000 hab./km² dans les quartiers aisés à 25 000 hab./km² dans les bidonvilles.

On comprend dans ces conditions que la question des risques naturels en ville s'envisage d'abord sous l'angle d'une aggravation des effets des aléas liée à la concentration d'enjeux (humains, économiques, sociaux, culturels) sur un espace exigu. Plusieurs millions de personnes vivent dans des zones sismiques et au pied de volcans actifs dans de grandes villes comme Mexico, Kagoshima ou Naples. Le risque y est particulièrement fort à cause d'une vulnérabilité très élevée, liée à l'exposition physique d'un grand nombre de personnes et de biens matériels à l'aléa, le plus souvent aggravée par des systèmes sociaux et organisationnels inadaptés en cas de crise.

b – Villes, métropoles et mégapoles : des vulnérabilités spécifiques

La croissance urbaine, qui se traduit par un étalement de la ville sur les espaces ruraux périphériques, peut également conduire à l'apparition de nouveaux aléas : par exemple, la présence et le poids de nouveaux bâtiments peuvent générer un aléa « retrait-gonflement de sol », voire « mouvement de terrain », et entraîner des dommages imprévus sur des espaces urbanisés récemment, surtout en cas de sécheresse estivale marquée. C'est ainsi que le nombre de dossiers CatNat liés à un retrait-gonflement de sol a fortement augmenté ces dernières années dans le sud de la France, dans des lotissements récents installés sur des versants autrefois agricoles.

Selon A. Dauphiné (2001), ou J. Dubois-Maury et C. Chaline (2004), on recense environ une cinquantaine de catastrophes urbaines d'origine naturelle par an dans le monde. La matérialisation du risque naturel en ville et l'ampleur des dommages (comme ceux liés au passage du cyclone Katrina à la Nouvelle-Orléans en août 2005 qui inonda 80 % de la ville) interroge la nature même du risque : fait-il partie de la ville elle-même en tant que concentration d'enjeux ou est-il le révélateur d'un déséquilibre du système urbain lié au décalage entre les évolutions rapides des modes de vie, des pratiques des citoyens (la mobilité par exemple) et les adaptations toujours plus lentes des formes et des structures urbaines à ces nouveaux besoins (maillage des rues, réseaux de transport...), comme l'envisagent J. Dubois-Maury et C. Chaline (2004) ?

Le développement urbain au xx^e siècle est tel que les mesures de protection, bien qu'importantes et efficaces, ne suffisent pas à compenser l'accroissement de la vulnérabilité, notamment économique, structurelle (liée au développement des réseaux) et organisationnelle. Déjà, en 1858, à la suite des dommages liés aux grandes inondations de 1856 en France, la loi interdit la construction de digues en amont des grandes villes comme Lyon ou Paris : les espaces agricoles en amont doivent permettre le cas échéant d'amortir l'inondation avant qu'elle ne touche les

espaces urbains qui seront, eux, protégés. La grande inondation de 1910 à Paris conduit à la mise en place de nombreuses mesures pour réduire le risque, dont la construction de plusieurs barrages-réservoirs (Cosandey et Robinson, 2000, p. 275-278 ; Bravard, 2000, p. 160). Pourtant, on estime que l'ensemble des mesures de réduction des risques actuellement en place en amont de Paris réduiraient aujourd'hui le niveau de l'eau dans la capitale de 1,10 m (dont 60 cm grâce aux barrages) et les dommages de 4 à 4,5 milliards d'euros environ : effet significatif, mais qui ne suffit pas pour éviter une catastrophe dont le coût dépasserait sans doute 10 milliards d'euros.

Le zonage du risque, lorsqu'il existe dans un cadre réglementaire comme en France avec l'outil PPR, reflète souvent en ville non pas l'état des connaissances sur l'aléa ou la vulnérabilité (cela est particulièrement visible avec le PPR de Paris intra-muros) mais l'espace accordé au risque par la société, le risque considéré comme acceptable par les acteurs en présence. La rapidité des évolutions urbaines peut dès lors conduire à des modifications fréquentes du zonage, liées au jeu des acteurs, aux évolutions politiques et des mentalités comme le montre N. Dupont (2005) à travers des exemples sur le bassin de la Vilaine (Bretagne). Les zones inondables intégrées dans les documents d'urbanisme à Pont-Réan sont régulièrement modifiées et présentent toujours un étranglement au niveau des espaces urbains, en contradiction avec l'extension maximale des inondations historiques (Dupont, 2005, p. 186), signe d'une moins grande acceptation du risque en zone urbaine qu'en zone rurale.

L'étalement urbain, le développement de banlieues résidentielles dans les pays développés et de périphéries urbaines à l'habitat informel et illégal dans les pays en développement, la redistribution des populations entre centres et périphéries sont liés à des changements importants dans les mentalités et les modes de vie depuis un siècle. Ces évolutions tant quantitatives que qualitatives de la ville conduisent les spécialistes à faire la différence entre « la ville » et « l'urbain ». Le terme « urbain » veut ainsi souligner que la définition démographique, morpho-

logique, sociospatiale et fonctionnelle de la ville ne suffit plus : il faut y ajouter l'étude des modes de vie et des comportements, des interactions sociales entre individus ou groupes d'individus, du rapport entre espace public et espace privé, des perceptions. L'urbanité se définit donc aussi à travers l'organisation des objets sociaux présents dans l'espace urbain et susceptibles d'interagir les uns avec les autres, donnant naissance à de multiples « cultures urbaines » étudiées par tous les champs disciplinaires des sciences humaines. Cette « urbanité » ne doit pas être négligée dans l'étude des vulnérabilités urbaines, certains aspects pouvant aggraver ou au contraire réduire les conséquences des catastrophes.

Cette urbanisation sans précédent à l'échelle mondiale se traduit par le développement de villes géantes comme Tokyo, New York, Mexico, Séoul, São Paulo, Los Angeles... Aujourd'hui, 25 aires urbaines dépassent 10 millions d'habitants (dont 18 dans les pays du Sud). Ces mégapoles, définies essentiellement à partir de critères quantitatifs, sont généralement aussi des métropoles, c'est-à-dire des villes aux fonctions de commandement importantes, et présentant une organisation particulière de l'espace en relation avec la polarisation qu'elles ont générée au-delà de leurs limites propres. Les processus de métropolisation, largement liés à la mondialisation des échanges et de l'économie, conduisent, à la fin des années 1990, Dollfus (1997) à définir « l'archipel mégapolitain mondial, formé des villes qui contribuent à la direction du monde ». La concentration des activités d'innovation, de recherche et de commandement dans ces mégapoles, associée à l'essor des échanges mondiaux (flux d'informations, de marchandises et de personnes), se traduit par une mise en réseau de ces villes dont les échanges les unes avec les autres sont beaucoup plus importants qu'avec l'arrière-pays qui les entoure.

La concentration de fonctions et services de très haut niveau renforce la performance économique et stratégique de ces centres qui se caractérisent également par une forte augmentation des inégalités et de la ségrégation sociospatiale. Ainsi, les évolutions des systèmes urbains contemporains ne sont pas seulement quantitatives mais qualitatives et induisent souvent de nouvelles organisations, priorités entrant davantage en conflit

avec une bonne gestion des risques. La vulnérabilité augmente et change également de nature : en 1910 à Paris, il y avait en moyenne un seul niveau de cave/sous-sol, aujourd'hui ce sont cinq niveaux d'activité qui sont recensés en moyenne sous la surface... Par ailleurs, des réseaux électriques peuvent résister au séjour dans l'eau comme ce fut le cas en 1910, si le courant est coupé à temps et les opérations de séchage/réparation menées correctement après l'événement ; mais aujourd'hui, le matériel électronique doit impérativement être retiré avant la montée des eaux pour être préservé, le séjour dans l'eau endommageant irrémédiablement ce type d'équipement. Dans les pays en développement, les retours d'expérience menés après les alertes volcaniques de Quito (Équateur) en 1998-1999 et l'éruption du Pinatubo en 1991 mettent en lumière la fragilité des systèmes urbains (politiques et sociaux) et l'émergence de facteurs ou d'éléments vulnérables insoupçonnés.

Les vulnérabilités spécifiques des très grandes villes et des métropoles sont ainsi mises en évidence, en relation avec les caractéristiques de ces systèmes urbains, en termes de structure, de réseaux et d'organisation fonctionnelle. Cette complexité rend très insuffisante la démarche analytique d'évaluation des vulnérabilités et des risques. À travers l'exemple de la métropole parisienne, M. Reghezza (2006) montre ainsi le caractère original de la vulnérabilité de très grandes villes aux fonctions de commandement importantes et très difficilement remplaçables ou transférables ailleurs en cas de crise. La distinction entre trois niveaux de vulnérabilité (et donc de risques) – matérielle, structurale et fonctionnelle – s'avère nécessaire pour appréhender la complexité systémique des risques urbains et mieux mettre en évidence le rôle de facteurs aussi divers que l'organisation du travail des entreprises, le maillage des réseaux de transport, les modes de prise en charge sociale des personnes fragiles (système de santé, Sécurité sociale ou assurances...) (voir tableau 15 – *Complexité des niveaux de risques urbains métropolitains* sur www.licence.puf.com).

Cette approche des risques urbains met en évidence le caractère discontinu des territoires du risque : les enjeux vulnérables ne sont plus seulement ceux physiquement exposés aux

aléas ou proches d'enjeux directement exposés, mais peuvent être très éloignés de l'espace initialement touché par le phénomène naturel, par le biais des effets dominos et des conséquences économiques et sociales d'une perturbation de grande ampleur. Les sinistrés d'une inondation à Paris peuvent être des PME installées à 800 km de la capitale, travaillant en sous-traitance pour des entreprises franciliennes et incapables de faire face à une longue interruption des commandes ou de réorienter leur activité dans un contexte de crise. Les perturbations fonctionnelles dues à la catastrophe affectent ainsi des territoires qui ne sont pas contigus les uns des autres et s'expriment à des échelles beaucoup plus vastes. Cela amène également à s'interroger sur les éléments fonctionnels vitaux (« les enjeux majeurs ») « susceptibles d'engendrer et de diffuser leur vulnérabilité à l'ensemble d'un territoire, provoquant des effets qui peuvent perturber, compromettre, voire interrompre son fonctionnement et son développement » (D'Ercole et Metzger, 2009). Ces auteurs soulignent, à travers des exemples pris au sein du district métropolitain de Quito, abritant 2 millions d'habitants, qu'il s'agit d'un « véritable mécanisme de transmission de la vulnérabilité, de lieux particuliers vers des ensembles territoriaux plus vastes ». Des ruptures de canalisation ou de réseau électrique « montrent comment la perturbation de quelques enjeux ou espaces-enjeux limités en surface – mais majeurs et vulnérables – [peut] affecter le fonctionnement d'une grande ville » (*id.*).

L'échelle d'application des réglementations actuelles, souvent nationales, n'est pas toujours adaptée à cette nouvelle échelle du risque qui concerne des « territoires en archipels ». De plus, le fait que ces réglementations se fondent généralement sur un zonage de l'aléa ne permet pas de mettre au centre des problématiques de gestion le lien fonctionnel entre les territoires, de préférence à proximité spatiale.

→ II. Risques et histoire : le poids des héritages

L'étude des risques, par la complexité de l'objet d'étude, sa dimension sociale et politique, ne peut aujourd'hui se passer d'une mise en perspective historique. Le recours au passé est indispensable pour disposer de chroniques d'événements dommageables les plus longues possibles, afin notamment de mieux évaluer le temps de retour des catastrophes majeures. La géomorphologie, l'archéologie, les recherches dans les documents d'archives permettent souvent de caractériser des catastrophes anciennes (date, extension géographique, indicateurs de magnitude, ampleur des dommages), même si ces informations ne peuvent être mélangées aux données récentes sans précautions méthodologiques (estimation des marges d'erreur, critique des sources et interprétation à la lumière du contexte sociétal qui les a produits...). Le recul historique est également nécessaire pour connaître la manière dont les sociétés passées appréhendaient le risque et y faisaient face (ou non !). Ce que l'on nomme aujourd'hui aléa et vulnérabilité sont interprétés en fonction de représentations culturelles et sociales qui varient d'une société et d'une époque à l'autre. Il est ainsi possible de mieux comprendre l'évolution de la vulnérabilité des enjeux en reconstituant l'histoire des politiques de gestion qui se sont mises en place, parfois depuis plusieurs siècles. Mieux connaître les processus et les choix d'aménagement anciens permet de remettre en perspective les situations actuelles, de mettre en évidence les cultures locales du risque, sans oublier les jeux d'acteurs passés. La géographie travaille aussi sur la perception que les sociétés ont du risque et du territoire du risque. Ainsi, un même territoire peut-il être perçu ou non comme à risque, indépendamment de la réalité objective du danger. Ces perceptions, qui relèvent de la culture des

groupes sociaux ou des individus, se traduisent par des usages spécifiques de l'espace qui débouchent sur des logiques d'organisation spatiale différentes. À l'heure d'internet et de la multiplication des publications scientifiques, il n'est pas inutile de rappeler l'immense richesse que constituent bon nombre de travaux datant de quelques décennies et souvent trop négligés dans les bibliographies contemporaines – ce qui ne dispense pas d'une critique des sources et d'une mise en perspective. Dans sa thèse de 1934 sur le val de Loire, R. Dion montre comment la prise en compte du risque d'inondation a conduit à différents modes de gestion des territoires dès l'époque médiévale.

❶ L'utilité des archives pour définir le risque

De nombreux travaux (Favier et Granet-Abisset (dir.), 2000), montrent la richesse des apports de l'histoire au service de la gestion actuelle des risques. Les archives françaises et de la plupart des pays européens sont extrêmement riches (tableau 16). De nombreux documents relatent les événements dommageables du passé à travers des plans d'ingénieurs, relevés de hauteurs d'eau, rapports liés aux reconstructions d'édifices endommagés tels que ponts et routes, dossiers de demande d'indemnisation.

La crédibilité des sources historiques est souvent mise en doute alors que la plupart de ces documents se prêtent bien à une saisie synthétique sous forme de base de données permettant de réaliser des traitements statistiques ayant un minimum de représentativité (Meschinet de Richemond, 2003). N. Vassalo (2002), qui a particulièrement étudié la gestion des catastrophes naturelles dans les régions alpines dépendantes de la maison de Savoie avant 1860, souligne la richesse et la fiabilité des procès-verbaux de visite post-catastrophe, tout en regrettant le peu d'intérêt de l'historiographie pour ce type de sources. La valorisation de cette richesse au service de la prévention des risques se heurte à deux difficultés majeures. La première réside dans l'apport très inégal de ces différentes sources archivistiques selon

la recherche poursuivie (étude qualitative, collecte de données chiffrées, etc.). L'intérêt de ces documents est très variable d'une série ou d'une commune à l'autre (voir tableau 17 – *Classement archivistique et type d'information sur les événements naturels dommageables en France* sur www.licence.puf.com). On peut aussi souligner – hier comme aujourd'hui – le rôle clé joué par des individualités remarquables dont les travaux versés dans tel ou tel fond d'archive demeurent, des décennies ou siècles plus tard, indispensables pour l'étude des catastrophes passées. Par exemple, en Ardèche, le rapport sur les crues de l'Ardèche (1860) de l'ingénieur des Ponts et Chaussées P. de Mardigny reste incontournable, de même que les écrits (1778) de l'ingénieur Kolly de Montgazon pour les cours d'eau des Pyrénées orientales (Desailly *in* Broc *et al.*, 1992, p. 194).

La deuxième difficulté majeure réside dans le temps et donc le coût nécessaire à la réalisation des recherches. Les archives de services techniques (Ponts et Chaussées, RTM, etc.) sont souvent très utilisées et bien connues, les archives privées, les collections de cartes postales peuvent se révéler une mine d'informations locales. Mais les responsables de services d'archives soulignent que beaucoup de documents conservés dans les fonds ne sont pas identifiés comme en rapport avec les risques (documents fiscaux, correspondance privée, dossiers de travaux routiers, etc.) alors même qu'ils peuvent contenir des informations utiles. Faute d'une indexation systématique, on ne peut alors les découvrir qu'au prix d'un très long et fastidieux travail de dépouillement. Là encore, on rejoint des questions de méthode puisque les archivistes, en tant qu'acteur, ont conçu la conservation des documents en fonction de leurs propres compétences (archivistiques, paléographiques) et de leurs propres logiques de préservation et de classement (chronologique et par type/origine des fonds) afin d'en permettre la consultation, mais non en fonction des usages (très divers) que peuvent en faire ceux qui sont amenés à les consulter (recherches généalogiques, recherches historiques, recherches thématiques au service de la gestion des risques par exemple). Ainsi, un recensement exhaustif et une valorisation des sources anciennes utiles pour l'étude des risques naturels restent à faire, même si certains ouvrages ont commencé ce long travail

(Corvol (dir.), 1999) et si certains services d'archives proposent des outils en ligne pour faciliter les recherches. Les archives départementales de l'Isère proposent ainsi un index des ressources de la série S des Ponts-et-Chaussées permettant d'accéder facilement aux cotes des documents concernant les inondations et la défense ou l'entretien des berges (<http://www.archives-isere.fr/7347-instruments-recherche-en-ligne.htm>).

Les informations tirées des archives sont très utiles pour améliorer la connaissance des phénomènes physiques. Disposer d'informations sur plusieurs siècles permet de mieux estimer les magnitudes des phénomènes et de calculer avec plus de précision les temps de retour d'événements rares. Dans un monde où les efforts de prévention conduisent à faire disparaître les événements dommageables de petite, voire moyenne ampleur, mais restent sans effets sur les catastrophes les plus graves – voire les aggravent (partie 5) –, il est capital de recenser toute information disponible sur les grands événements anciens. Il s'agit d'allonger les séries statistiques disponibles en enrichissant et précisant les bases de données existantes. Utiliser ces informations archivistiques au service de la gestion opérationnelle des risques nécessite de traiter, critiquer et mettre en forme les données afin qu'elles se présentent sous une forme utilisable pour les acteurs opérationnels (ingénieurs, pompiers...). Dans le cadre du projet européen SPHERE (2000-2003) consacré à la connaissance historique des inondations (Cœur *et al.*, 2003), une équipe pluridisciplinaire composée d'hydrologues, d'informaticiens et d'historiens a engagé une réflexion méthodologique sur la mise au point d'un système d'information pour la collecte, le traitement et la restitution des données. Les recherches ont porté sur plusieurs bassins en France et en Espagne : l'Ardèche et la moyenne vallée de l'Isère à l'amont et à l'aval de Grenoble, le Segre, le Llobregat et le Ter en Catalogne. La collaboration avec des géologues pour l'étude des paléocrues (étude stratigraphique et géomorphologique des dépôts de crue) permet pour chaque bassin de reconstituer, pour le dernier millénaire, la liste hiérarchisée des inondations et leur extension spatiale, ainsi que les dommages enregistrés.

Tableau 16
Diversité des sources d'information sur les événements naturels dommageables en France

Type de sources	Échelle, classement	Localisation ou nature des informations
Archives privées à caractère technique	International à local	Archives de bureaux d'étude, de géomètres, d'exploitant minier, de grandes entreprises (EDF, RATP, France Télécom, réseaux d'eau et d'assainissement, SNCF)
Archives privées d'associations spécialisées	International à local	Associations de défense du patrimoine, de l'environnement, clubs cartophiles
Archives privées	Local	Érudits locaux, historiens, habitants riverains du site à risque
Archives militaires	National à local	
Archives d'organismes techniques	National à départemental	BRGM, CETE, Cemagref, Météo France, RTM, ONF
Archives administratives	National, régional, départemental ou communal	DREAL, DRE, DRAC, DRIRE, DDAF, préfectures
Archives de presse, des médias	National, régional, local	Journaux nationaux, régionaux, locaux, presse généraliste ou spécialisée, INA, chaînes télévisées privées
Archives de musées	National, régional, local	
Archives des SDIS	Départemental	CRSS : compte rendu de sortie de secours
Archives de compagnies d'assurance	National à local	Dossiers de sinistres matériels et corporels, bilans consolidés

FL, NMR, FV, 2010.

O. Payrastre (2005), qui a travaillé sur les crues historiques des affluents de l'Aude, montre l'utilité d'une recherche approfondie dans les fonds d'archives locaux pour évaluer les débits des crues extrêmes de petits cours d'eau méditerranéens au cours des deux derniers siècles. La prise en compte des données historiques à grande échelle (quelques dizaines de km²) réduit considérablement les marges d'erreur. Celles-ci sont très importantes lorsqu'on ne dispose que d'ajustements statistiques sur des séries trop courtes (1955-2000). Les informations sur les catastrophes majeures du passé sont très rarement en cohérence avec ces ajustements et soulignent le saut qualitatif existant entre événement moyen et exceptionnel. La hiérarchisation des événements passés permet alors l'élaboration d'échelles de gravité et améliore la définition des événements extrêmes servant de référence au dimensionnement des aménagements.

Ces données historiques sont également utiles pour crédibiliser des expertises techniques ou des modélisations, ce qui peut faciliter les discussions entre les acteurs grâce à une approche pragmatique et systémique du risque. Les travaux de Brice Martin l'ont bien montré à Vars, dans les Hautes-Alpes (Martin, 2006), depuis 1996 : c'est non seulement le résultat (la recherche historique met au jour des informations importantes qui sans cela resteraient inutilisables par les acteurs de la gestion actuelle des risques), mais aussi l'ensemble du processus (la collaboration et l'implication des acteurs locaux qu'il nécessite) qui sont profitables. La démarche améliore la concertation et favorise la réappropriation du territoire par les acteurs locaux dont la mémoire est valorisée et améliore finalement la gestion effective des risques.

Enfin, il importe de souligner qu'en l'absence d'archives écrites, d'autres types de recherches permettent une contextualisation du risque particulièrement utile face à la menace de catastrophes majeures. Ainsi, les travaux de J.-C. Gaillard menés aux Philippines à la suite de l'éruption du Pinatubo en 1991 ont montré combien les fouilles archéologiques, l'étude des toponymes et le recueil de témoignages oraux (légendes des populations locales actuelles) apportaient d'informations sur la

précédente éruption cataclysmale du volcan, intervenue entre 800 et 500 B.P. Ces travaux de terrain montrent un certain nombre de points communs entre les deux éruptions, tant du point de vue de la cinétique de l'aléa que de ses conséquences humaines. La phase éruptive de 800-500 B.P. a vraisemblablement provoqué l'abandon de villages proches du volcan et conduit les populations installées sur le versant est à migrer vers les littoraux où les lahars avaient élargi la bande côtière. La connaissance de ces reconfigurations territoriales aurait été d'une grande utilité pour anticiper la crise de 1991 si la mémoire orale et les recherches historiques n'avaient pas été négligées par les gestionnaires et les experts.

② Histoire et vulnérabilités

L'attitude fataliste et l'inertie face aux risques sont un cliché trop souvent associé aux sociétés traditionnelles (passées ou actuelles), alors même que de nombreuses études montrent aujourd'hui l'ancienneté et la complexité des efforts fournis pour limiter une vulnérabilité qui ne dit pas encore son nom. Le recours à des causes divines pour expliquer des phénomènes incompréhensibles à une époque donnée n'est pas synonyme de passivité ou de désintérêt vis-à-vis de mesures de prévention ou de protection. Nous voudrions insister sur la complexité qu'il y a à appréhender la vulnérabilité passée et sur le fait qu'elle a beaucoup évolué dans le temps et dans l'espace. Son étude pose donc certaines difficultés et soulève quelques questions.

Un certain nombre de précautions méthodologiques sont nécessaires : un même événement ne sera pas considéré comme catastrophique selon les sociétés et les époques. Il est donc important de préciser si l'on s'intéresse à la vulnérabilité telle qu'elle aurait été définie à différentes époques en différents lieux, par différents groupes sociaux, ou si l'on évalue la vulnérabilité passée avec les perceptions et les outils d'aujourd'hui. Le contexte sociétal dans lequel s'inscrit le risque est primordial : dans un quotidien marqué par les sinistres de tous types et par l'importance du religieux, la vulnérabilité passée n'est pas forcée-

ment de même nature que celle d'aujourd'hui. Enfin, des stratégies empiriques de réduction de la vulnérabilité ont toujours existé dans le passé, mais elles ont longtemps été sous-estimées.

a – La vulnérabilité passée vue d'aujourd'hui

Au sens étroit, la vulnérabilité se mesure aujourd'hui à travers l'estimation des dommages potentiels d'un enjeu (du patrimoine construit par exemple) face à un aléa (séisme, glissement de terrain, cyclone...). Il s'agit là d'une vulnérabilité dite analytique car cette définition conduit à décomposer en détail les enjeux existants et à établir pour chacun une évaluation précise des dommages, calculée pour différents niveaux d'aléa (partie 1.IV).

Mais la vulnérabilité humaine passée est d'abord liée aux maladies, aux conditions sanitaires, aux guerres – événements qui ont aujourd'hui largement disparu dans les pays développés. La vulnérabilité peut donc s'estimer d'abord par le bilan humain et économique des catastrophes anciennes. La peste reste encore aujourd'hui la maladie qui a causé le plus de victimes dans l'histoire de l'humanité. Les grandes épidémies étaient jusqu'au XVIII^e siècle considérées comme une calamité comparable à la grêle ou aux inondations. La peste bubonique ou peste noire se répandit en 1331 dans la province chinoise de Hopei. En 1332, le nord de la Chine fut largement décimé. La pandémie progressa vers l'ouest et ravagea l'Asie, atteignant l'Europe en 1346 par l'intermédiaire de marchands génois. En sept ans, avec un pic en 1348, la peste tua un Européen sur trois. Un tel bilan humain ainsi que la rapidité de la maladie frappa les contemporains : la mort intervient souvent en trois jours, parfois en quelques heures. La peste noire ne dura guère car le bacille tue rapidement et ne survit pas à la mort de son hôte. Mais les épidémies de peste furent récurrentes en Europe jusqu'au XVII^e siècle, souvent propagées par les échanges maritimes. L'épidémie qui se déclara en 1894 à Hong-Kong se propagea ensuite en Asie, faisant plus de 10 millions de victimes.

Au-delà de telle ou telle calamité, certaines périodes historiques apparaissent comme particulièrement critiques. Ainsi, aux XIV^e et XV^e siècles, l'Occident est frappé par plusieurs malheurs.

Les récoltes deviennent insuffisantes pour nourrir une population qui s'est largement multipliée (la population européenne passe de 4 millions d'habitants en l'an 1000 à 50 millions en 1150 et 70 millions en 1250). Les organismes mal nourris sont affaiblis, sans défense face aux maladies dont la peste. Les guerres, comme celle de Cent Ans de 1337 à 1453, aggravent la situation et conduisent à un effondrement de la population, qui passe en France de 15 millions vers 1300 à un peu plus de 10 millions vers 1400.

Un bilan humain encore plus dramatique est imputable aux maladies infectieuses, importées de l'ancien monde par les Espagnols et les colons européens, qui ont décimé plus de 90 % de la population autochtone américaine, passant de 100 à 10 millions entre 1492 et 1900. Entre 25 et 30 millions de personnes vivaient sous la domination aztèque au sud du Mexique à l'arrivée de Christophe Colomb. Vers 1580, ce nombre est tombé à 3 millions, non à cause des combats mais du fait de la mortalité liée à la rougeole, à la variole chez des populations sans défense immunitaire contre ces maladies.

Plus proches de nous, des épidémies des XIX^e et XX^e siècles ont largement marqué les esprits des contemporains et l'inconscient collectif. L'expression française « choisir entre la peste et le choléra » renvoie à un fléau majeur du XIX^e siècle : la pandémie de choléra apparue au nord-est de l'Inde se répandit dans le monde entre 1826 et 1834, entraînant des millions de morts. À Moscou en 1830, 50 % des malades meurent, et la fuite des habitants vers l'ouest propage la maladie : on compte 100 000 morts en Hongrie en 1831, 10 000 à Paris et autant à Stockholm en 1832, 7 000 à Londres malgré des mesures imposant une quarantaine sévère. Fin 1832, le choléra arrive en Amérique avec les émigrants, il y a 50 000 morts à New York. C'est à la suite de cette pandémie qui touche largement les villes en plein essor industriel que des améliorations significatives des réseaux d'eau urbains furent proposées, lorsque les médecins acquièrent la certitude que la maladie se propage notamment par les eaux souillées.

Mais d'autres phénomènes ont aussi des conséquences spectaculaires, tels les séismes ou les cyclones. 7 à 8 millions de morts dans le monde auraient été liées à des catastrophes natu-

relles brutales et ponctuelles entre 1815 et 1975 (Péguy, 1989, p. 156) : 56 % dus aux inondations, 22 % aux séismes, 19 % aux cyclones et 3 % aux éruptions volcaniques. Pour le seul ^{xx}e siècle, le bilan humain des catastrophes brutales est évalué entre 3 millions (Thouret *et al.*, 1994, p. 18) et 5,55 millions (Péguy, 1989). Malgré les écarts entre ces évaluations, ce sont les catastrophes atmosphériques brutales qui génèrent le plus de pertes, essentiellement dans les pays les plus pauvres de la planète.

Mais, paradoxalement, les bilans humains passés les plus lourds sont avant tout des pertes induites ou liées à des phénomènes chroniques : leur gravité vient de la grande extension spatiale et de la durée de phénomènes tels que les sécheresses (3 millions de morts au Bengale en 1942-1943), les mauvaises récoltes et les famines. Depuis 1815, les sécheresses seraient responsables de 19 (Péguy, 1989) à 23 millions de victimes dans le monde : un bilan quatre fois supérieur à celui des catastrophes naturelles brutales. Les historiens réservent ainsi le terme de catastrophe aux désastres brutaux et brefs et le terme de calamités aux phénomènes chroniques, cumulatifs ou répétitifs (Berlioz et Quenet, 2000). Ainsi, des événements majeurs comme la peste de 1348 prennent place dans un quotidien marqué par des événements de moindre ampleur mais fréquents. Des situations météorologiques critiques ont des conséquences considérables, entraînant des pertes de récolte et un manque à gagner important, à l'origine de famines, de troubles politiques et sociaux (jacqueries). Ainsi, la famine des années 1693 à 1695 entraîne directement et indirectement des pertes comparables à la guerre de 1914-1918 (1 300 000 morts) mais pour une population française deux fois moins nombreuse alors (20 millions d'habitants) (Le Roy Ladurie, 2002).

Dans le passé – ou aujourd'hui dans certaines sociétés traditionnelles –, la vulnérabilité face aux risques naturels majeurs ne peut donc se concevoir indépendamment d'un contexte quotidien marqué par toutes sortes d'autres risques : risques sanitaires et épidémiques, taux élevés de mortalité infantile et maternelle, risques de guerres et de famines... Aujourd'hui, dans beaucoup de pays – en particulier les pays riches –, la vulnérabilité face aux

risques naturels n'apparaît plus du tout en continuité avec les risques quotidiens. En étudiant les cataclysmes passés, il est donc capital de situer la vulnérabilité « exceptionnelle » dans ce contexte de vulnérabilité quotidienne, chronique, vivement ressentie par les contemporains.

b – Des vulnérabilités changeantes

Il convient également de rappeler que, face aux aléas naturels, la vulnérabilité à une époque donnée dépend aussi de la manière dont les groupes sociaux envisagent leur rapport à la nature et leurs moyens d'action pour limiter les effets des catastrophes. Desailly (1992, p. 167-217) a ainsi largement montré comment les mesures préconisées par les ingénieurs pour lutter contre les inondations en France sont tributaires non seulement de progrès techniques et scientifiques dont la diffusion est lente, mais aussi de tout un système de valeurs au sein duquel les préoccupations esthétiques ne sont pas absentes. Les digues réaménagées à Perpignan en 1732 doivent ainsi répondre aux canons esthétiques en vigueur à l'époque : constructions monumentales en pierres, promenades plantées d'arbres taillés et alignés. Au début du XIX^e siècle, c'est l'esthétique romantique qui contribue à changer le regard porté par les ingénieurs sur la haute montagne qui, de terrifiante et hostile, devient un défi lancé par la nature à l'intelligence humaine.

Dès lors, appréhender la vulnérabilité passée uniquement à la lumière d'une approche analytique ou contemporaine peut conduire à d'importants contresens ou anachronismes. Autrefois, en Europe et particulièrement en France, la conception de l'État et de la nature ne s'inscrivait pas dans une vision d'un monde évolutif et dans une culture laïque : l'organisation de la société tout comme les faits naturels étaient perçus comme l'expression d'une volonté divine. Les théories de Darwin, les découvertes scientifiques en géologie, hydrologie, nivologie, la théorie de la tectonique des plaques n'étaient pas encore passées par là : les sinistres potentiels du Moyen Âge ou du XVII^e siècle avaient une conception fixiste de la nature, créée une fois pour toutes par Dieu au début du monde. La vulnérabilité telle que nous la défi-

nissons aujourd'hui (dans un contexte culturel laïc, démocratique et matérialiste) est donc au sens strict informulable au xvii^e ou xviii^e siècle car liée à la condition humaine dans son rapport à Dieu. Autrefois, le risque majeur était d'aller en enfer : la vulnérabilité passée – formulation contemporaine parfaitement anachronique ici –, renvoyait en fait dans l'esprit des contemporains avant tout à la fragilité de l'homme face au péché. La notion de résilience dans un tel contexte est un non-sens, car le pouvoir de s'améliorer, de rebondir après un événement catastrophique ne peut relever que de la grâce divine, non d'une décision ou d'actes humains, ni d'une évolution naturelle. La vulnérabilité ne peut donc apparaître en tant que telle dans les discours passés : les actes visant à la réduire s'inscrivent dans un discours, un système de valeurs radicalement différent d'aujourd'hui. Les procédures d'indemnisation des sinistrés, largement codifiée et organisée sous l'Ancien Régime en France (Meschinot de Richemond, 2003) comme dans d'autres royaumes voisins, ne doivent pas être comprises à travers le sens que nous donnons aujourd'hui à l'indemnisation des catastrophes naturelles, mais analysée comme une affirmation de la pérennité d'une structure sociale voulue par Dieu et dont le roi est le garant et témoinnant d'une conception de la vulnérabilité relevant plutôt de la notion de résistance (qui s'accorde avec une conception fixiste du monde) que de celle de résilience (qui suppose de concevoir le monde comme étant en évolution permanente).

Trop souvent, le fatalisme attribué aux populations passées ou traditionnelles est en fait la marque d'une erreur d'analyse liée au fait que notre système actuel de pensée a beaucoup de mal à concevoir une cohérence qui ne soit portée par aucune théorisation. En l'absence d'un discours construit et argumenté (et généralement écrit), des actes ou des pratiques pourtant cohérents sont fréquemment ignorés, attribués au hasard ou voient leur efficacité sous-estimée.

Au-delà de ces difficultés méthodologiques pour appréhender la vulnérabilité passée, quelques remarques peuvent cependant être rappelées, notamment en matière d'évolution qualitative de la vulnérabilité. La récurrence des dommages qui affectent les sociétés du passé souligne la permanence sur plu-

siècles de zones à risques. Mais les territoires vulnérables changent de géométrie, d'organisation et de nature au cours du temps. Les enjeux passés sont avant tout ruraux et agricoles, comme l'illustre l'exemple de la grande famine des années 1840 qui entraîna plus d'un million de morts irlandais du fait de la destruction, trois années durant, des récoltes de pommes de terre par un champignon parasite, le mildiou. Jusqu'au milieu du xx^e siècle, la majorité de la population française et européenne vit à la campagne, et jusqu'au xix^e siècle, c'est l'agriculture qui est le premier secteur économique. Mais la croissance démographique et le développement urbain considérables au cours de ces deux derniers siècles transforment la vulnérabilité en une vulnérabilité urbaine, à évolution très rapide, caractérisant des territoires très denses en terme d'enjeux et fragilisés par une interconnexion à l'échelle mondiale. Parallèlement, la vulnérabilité passée est davantage une vulnérabilité de groupe ou de communauté, comme en témoignent les procédures d'indemnisation sous l'Ancien Régime en France (codifiées selon l'appartenance à tel ou tel ordre de la société) mais aussi l'organisation des premiers systèmes d'assurance par les marchands et les armateurs exposés aux aléas des voyages océaniques.

c – Des stratégies empiriques de réduction de la vulnérabilité

Nous avons montré par ailleurs (Meschinet de Richemond, 2003) combien l'indemnisation des sinistrés sous l'Ancien Régime dépend de la manière dont la société intègre dans son quotidien l'occurrence d'une catastrophe et le statut qu'elle lui donne. Une catastrophe naturelle n'est pas perçue comme une rupture insupportable dans le temps historique. C'est, au contraire, en tant qu'épreuve ou punition envoyée par Dieu, une occasion majeure pour la monarchie de réaffirmer sa nature de corps symbolique immuable. Aujourd'hui, dans les pays riches, la situation est inversée, au moins en termes de perception et en ce qui concerne les risques « naturels » : les catastrophes ne sont pas intégrées dans le quotidien des sociétés mais constituent une rupture insupportable.

table ou perçue comme telle, malgré un taux d'indemnisation proche de 90 % jamais atteint dans le passé.

Les explications divines des phénomènes naturels catastrophiques ont dominé jusqu'au xvii^e siècle. Mais si les causes invoquées sont effectivement fantaisistes, ces récits témoignent souvent d'une observation détaillée et fine des phénomènes naturels et d'une familiarité aujourd'hui perdue entre les communautés et leur environnement. C'est ainsi qu'en 1521, lors de la prise de Tenochtitlan par Cortès, l'épidémie de variole décime les défenseurs et beaucoup de leurs chefs. Comme l'épidémie ne touchait que les Aztèques et non les conquérants, les contemporains, vainqueurs comme vaincus, crurent à une intervention divine en faveur des Espagnols. De même, M. Krafft (1991) souligne comment christianisme et volcanisme s'imbriquent intimement autour de l'Etna et du Vésuve. Les populations exposées dans les villages proches du Vésuve avaient bien observé une pluie de petites croix noires lors de l'éruption de 1660 (ces croix correspondent à des cristaux naturels, macles de pyroxène expulsées lors de l'éruption) : ils en conclurent que saint Janvier leur manifestait par ce miracle sa présence bienveillante.

Le paradoxe – la cohabitation depuis très longtemps des interprétations religieuses des catastrophes et des stratégies de réduction empirique de la vulnérabilité – n'est donc qu'apparent. Malgré l'absence de données statistiques ou d'outils mathématiques, la structure sociale, le souvenir des anciens et la transmission orale des savoirs assurent la pérennité d'une véritable culture traditionnelle du risque et une assez bonne estimation des temps de retour des catastrophes. Les risques quotidiens générant finalement plus de pertes que les événements brutaux et ponctuels, ce n'est pas une stratégie absurde pour les populations vulnérables du passé de s'attacher d'abord à réduire cette vulnérabilité chronique (face au risque de manque d'eau en été méditerranéen par exemple) avant de limiter la vulnérabilité « exceptionnelle » (face à l'inondation centennale). Si des stratégies traditionnelles de réduction de la vulnérabilité ont tendance, lors des événements majeurs, à aggraver les dégâts, cela ne doit pas faire oublier qu'ils ont, lors des catastrophes fréquentes de moindre

ampleur, un rôle protecteur réel (Meschinot de Richemond, 2003).

Des catastrophes suffisamment fréquentes permirent le développement de savoir-faire empiriques mais efficaces de réduction de la vulnérabilité depuis l'Antiquité. Ainsi, la civilisation minoenne, développée en Crète de 3000 à 1200 avant J.-C., a mis en œuvre des techniques de construction parasismique élaborées et efficaces, conformes aux préconisations des normes actuelles (Poursoulis *et al.*, 2003). Ces techniques sont en grande partie préventives, c'est-à-dire conçues avant la construction de l'édifice (plan symétrique subdivisé en îlots dynamiques non solidaires, façades découpées par des décrochements, fondations profondes en puits permettant d'ancrer le bâtiment dans la roche en place...). Elles se révèlent particulièrement bien adaptées à l'originalité de la sismicité crétoise (modérée mais récurrente), aux caractéristiques locales du sol, au comportement mécanique d'édifices soumis aux ondes sismiques. Cette organisation sismo-résistante se retrouve également dans le plan de ces villes antiques qui présente des îlots de construction séparés par des voies de communication. Ces techniques empiriques mais efficaces sont également attestées dans les villes incas. Pour lutter contre les effets des séismes, les matériaux de construction étaient soigneusement choisis. Bien que le pisé et les briques en terre aient été connus, ils étaient très peu utilisés au profit de la maçonnerie en pierres de taille sans mortier et à joints très fins. Les murs inclinés, les profils trapézoïdaux des façades peu élevées, l'hétérogénéité de la taille des pierres, la légèreté des toitures (charpentes en bois couvertes de paille) témoignent aussi de l'expérience acquise par les architectes incas en matière de résistance au passage des ondes sismiques. La conquête espagnole et l'introduction de nouveaux modes de construction (utilisation massive du pisé, lourdes toitures en tuile, hautes façades) accrurent sensiblement la vulnérabilité : le séisme de 1650 détruisit 95 % de la ville espagnole.

Mais les mesures de réduction de la vulnérabilité ne se limitent pas à des savoirs techniques et s'étendent aussi à l'organisation de la société. Les sociétés agraires traditionnelles en Inde pratiquent une diversification modérée des cultures avec de

fortes contraintes communautaires pour faire face aux aléas climatiques (Chiappori, 1997). Les choix de diversifications agricoles pratiqués se révèlent les plus sûrs et les plus rentables à l'échelle de la communauté villageoise, même si ce n'est pas le cas à l'échelle familiale. Un système complexe de mutualisation des risques au sein du village, reposant sur l'imbrication de règles explicites et implicites, de normes et d'échanges réciproques de valeurs inégales, permet de lisser la consommation de tous, sinistrés ou non, et d'atténuer les effets des aléas climatiques sur les familles.

Ainsi, même estimées empiriquement, les sociétés traditionnelles ont développé des attitudes de défense parfois très efficaces compte tenu des moyens mis en œuvre. Mais il est souvent difficile d'identifier ces stratégies pour ce qu'elles sont car elles relèvent d'une approche des risques et d'une organisation des savoirs bien différentes des nôtres aujourd'hui. Elles relèvent :

- d'une approche globale et multirisque (et non sectorielle et par aléa comme c'est fréquemment le cas dans les études techniques);
- d'une pratique concrète, avec transmission orale de savoir-faire (et non d'une théorisation scientifique et/ou d'une formulation écrite);
- de fortes pratiques communautaires, liées aux modes de vie agricoles et religieux de l'époque considérée (et non de mesures ciblées et réglementées, individualisées): l'unité est la famille/le village et non l'individu/citoyen.

Nous sommes passés d'une approche empirique, inductive et globale de la vulnérabilité, qui s'accompagne de travaux de réduction ponctuels et sectoriels de plus en plus efficaces au fil des progrès techniques, à une nouvelle approche qui, associée à une volonté de gestion globale des risques, est beaucoup plus théorique, déductive et sectorielle. L'arrivée de techniques et d'organisations dans un contexte de développement économique et démographique a souvent balayé des pratiques qui auraient aujourd'hui leur place au sein d'un dispositif global de réduction de la vulnérabilité. Le développement industriel et

scientifique a ainsi permis de réduire largement la vulnérabilité humaine directe, dans les pays développés surtout, mais a conduit à un oubli progressif de la prise en charge sociale ou symbolique de la vulnérabilité résiduelle.

③ L'importance des représentations dans la gestion des risques

Les représentations des risques dépendent de paramètres aussi variés que les connaissances scientifiques et techniques, mais également de ce que P. Allard (2000) appelle « l'outillage mental » des hommes. Dans la mesure où ces représentations orientent largement la gestion actuelle de risques et des catastrophes, il est important de s'interroger sur leurs caractéristiques, la manière dont les perceptions contemporaines peuvent être influencées par l'histoire politique, sociale, économique et leurs héritages.

La représentation actuelle des risques, dans les pays développés en particulier, se construit largement à partir des données disponibles sur les événements passés. Mais le tableau 18 montre à quel point la hiérarchie qui peut être faite entre les phénomènes naturels dommageables est sujette à de profonds remaniements en fonction de l'occurrence d'un événement extrême (comme le tsunami indonésien de 2004 qui fit 250 000 morts ou le séisme de Tangshan du 27 juillet 1976 qui fit 242 000 victimes en Chine). La collecte et la structuration des données sont particulièrement importantes car elles orientent ensuite la perception et les représentations du risque. Autrement dit, là encore, la perception et la subjectivité sont à l'œuvre ; ce qui n'exclut ni la fiabilité ni la rigueur, mais souligne une nouvelle fois à quel point le risque est une construction sociale et dépend de représentations mentales complexes... malgré les discours affichés. La page d'accueil du site de la base de données EM-DAT du CRED précise qu'il s'agit de « fournir une base de données objective pour l'évaluation de la vulnérabilité » (<http://www.emdat.be/>). Or nous avons déjà vu au chapitre 1.3 combien chaque organisme producteur ou collecteur de don-

nées choisit ses indicateurs en fonction des priorités de son action. Et c'est bien ce qui apparaît à la lecture de la figure 31 et du rapport de Munich Re (2009) : le choix, pour la construction de ce graphique, de ne retenir que les catastrophes de catégorie 6 d'une part et de ne tenir compte que des pertes économiques assurées et non assurées d'autre part souligne les priorités de l'organisme émetteur du document, à savoir le groupe Munich Re, compagnie internationale de réassurance préoccupée avant tout par l'indemnisation des dommages liés aux événements de grande ampleur. En cas de lecture superficielle et non critique du document, ce type de graphique tend à renforcer la perception d'une augmentation très importante des catastrophes naturelles et de leurs effets depuis vingt ans. On constate par ailleurs combien l'augmentation des catastrophes naturelles est communément admise et associée au changement climatique dans les représentations du public européen, voire des médias, en contradiction avec nombre de travaux scientifiques sur le sujet (Hoarau et Chalonge, 2008).

La « conscience du risque » peut être définie comme la connaissance et la perception d'une menace commune à un groupe social. Mais les connaissances scientifiques et techniques ne suffisent pas pour percevoir le risque. Des différences culturelles importantes existent. Un certain nombre d'échecs dans la gestion des risques sont liés à l'exportation depuis certains pays (européens notamment) de méthodes et mesures de prévention élaborées autour de l'évidence du risque envisagée par les scientifiques, techniciens, décideurs, alors que cette évidence n'existait pas pour les populations, acteurs locaux des pays destinataires.

Tableau 18
Répartition des victimes liées aux catastrophes naturelles
à différents pas de temps

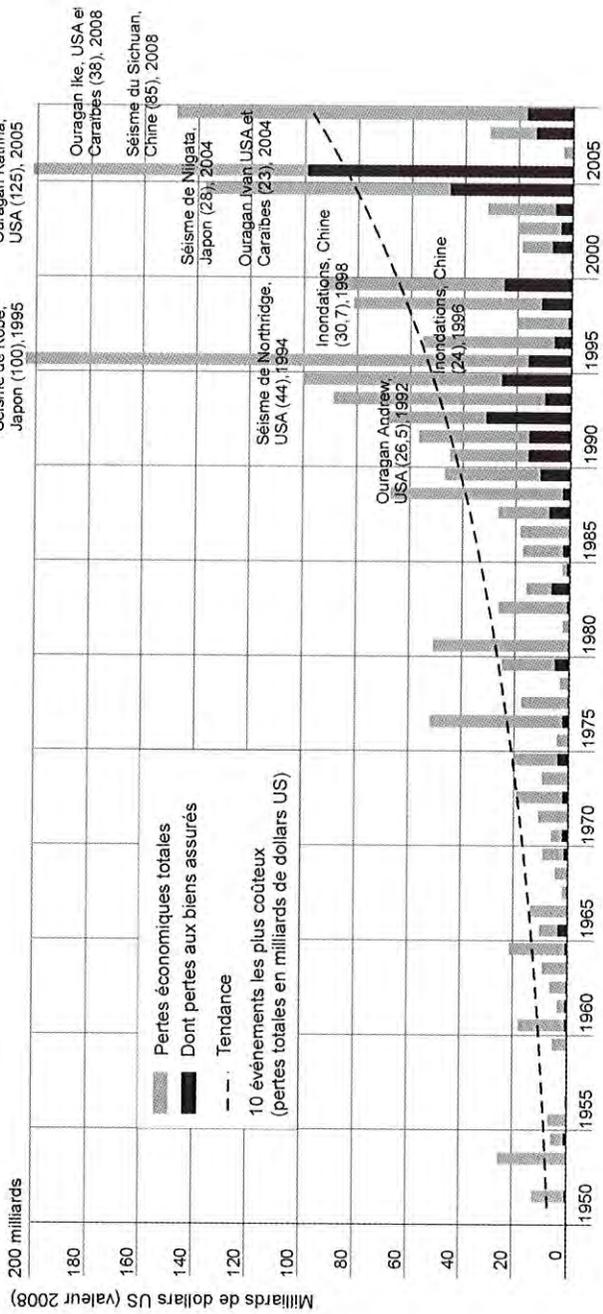
	1830-1989 (Péguy, 1989)	1900-1982 (Péguy, 1989)	1900-1994 (RGA, 1994 Thouret)		1973-2002 (Thouret, Leone EM- DAT in Moriniaux, 2003)	1979-2008 (Leone, EM-DAT, 2009)
Inondations	56 %			Inondations	19.40 %	14 %
Séismes	22 %			Séismes et tsunamis	48.20 %	44 %
Cyclones	19 %			Cyclones, tempêtes et tornades	27.60 %	30 %
Éruptions volcaniques	3 %			Éruptions volcaniques	2.50 %	2 %
Total victimes	7 à 8 millions	5,552 millions	3 millions	Total victimes	1 081 872	1 397 511
Catastrophes hydrométéo- rologiques	75 %			Catastrophes hydrométéo- rologiques	47 %	52 %
Catastrophes telluriques	25 %			Catastrophes telluriques	53 %	48 %

FL, NMR, FV, 2010.

Au Japon, la représentation des risques est bien différente de ce qu'elle est en Europe. P. Pelletier (2003) et M. Augendre (2006) soulignent combien la culture japonaise a élaboré une représentation très ambiguë du risque, où la volonté de vivre avec le risque est beaucoup plus marquée qu'en Europe.

Le terme de *saigai* [utilisé pour désigner le risque naturel] renvoie à une conception de la nature où la *contrepartie positive* du risque est valorisée de manière récurrente [...]. Cet aspect profitable est au cœur de la notion de coexistence, souvent alléguée depuis une décennie au Japon pour traduire la réponse sociale au risque, et présentée comme l'avantage d'occuper, utiliser et

Figure 31
Pertes totales et assurées consécutives aux catastrophes naturelles de catégorie 6



Modifié d'après Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 2009 - FL, NMR, FV, 2010

Source : d'après Munich Re, 2009, voir partie 1.III.

développer les espaces de danger tout en prenant des dispositions pour en limiter la vulnérabilité. (Augendre, 2006, p. 56)

Cette perception positive n'est pas absente des cultures occidentales, on la retrouve en France par exemple, où la crue est souvent perçue par les bateliers de l'Ardèche comme bienfaisante car elle « lave la rivière » et « range les galets » (Meschinot de Richemond, 2010, p. 48). La volonté de vivre avec le risque se traduit par une perception ambivalente de l'événement et le refus d'occulter sa dimension positive. La mémoire, ou plutôt les mémoires, des catastrophes passées dépendent de ces représentations mentales des différents acteurs et de leurs intérêts. Leur préservation et leur transmission deviennent plus difficiles lorsque le temps de retour de la catastrophe dépasse une génération humaine. L'acceptation du risque est donc extrêmement variable d'une société à l'autre et dépend des représentations qui circulent au sein des groupes qui les composent et qui s'appuient sur les mémoires locales ou institutionnelles d'événements passés.

S'appuyer sur la « mémoire du risque » est un des axes majeur de la loi de 2003 en France. Il s'agit de permettre aux populations installées en zone à risque (ou y séjournant de manière occasionnelle) de prendre conscience du danger grâce aux représentations issues des catastrophes passées (figure 32). C'est un moyen de mieux faire accepter les contraintes de la prévention et de préparer les populations à la crise. « La mémoire construite ou reconstruite s'apparente à une connaissance, un acquis théorique relativement abstrait lorsqu'il n'est pas étayé par une mémoire vivante issue de l'expérience » (Vinet, 2010). Mais cette reconstruction peut nourrir une conscience du risque, c'est-à-dire une représentation d'une hypothétique réalisation du risque, utile pour la gestion actuelle.

Peuvent toutefois se poser des difficultés liées aux conflits entre différentes mémoires et représentations. En effet, la mémoire vécue transmise par les populations touchées par un événement dramatique n'est pas la même que celle qui peut être reconstruite *a posteriori* par le travail en archives, les enquêtes de terrain, ou le travail d'investigation technique mené

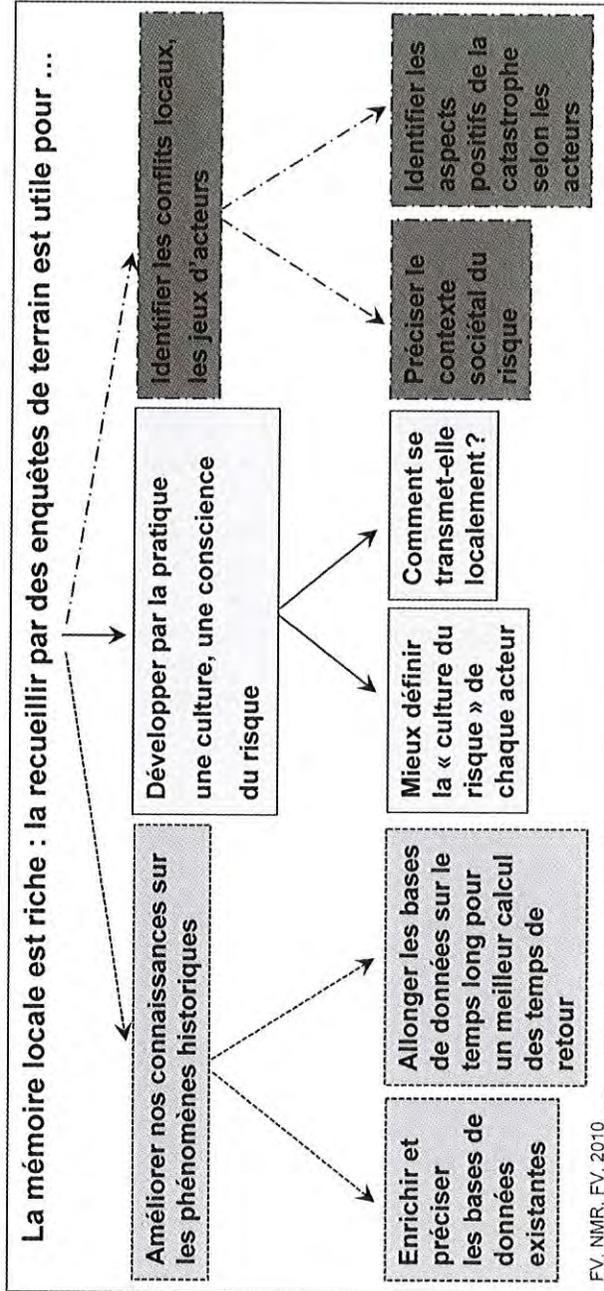
par des services de l'État. Les mémoires locales, vernaculaires sont fondées sur l'expérience vécue, souvent transmises sous forme de légendes, d'anecdotes, de dictons, avec un vocabulaire spécifique et imagé. Une organisation empirique de gestion du risque peut s'appuyer sur ces mémoires vécues en relation avec l'observation attentive et quotidienne de l'environnement à risque (volcan, cours d'eau...), la définition d'indicateurs empiriques, l'observation de signes révélateurs (bruit, odeur, couleur, vitesse du phénomène craint). Ce savoir est souvent difficile à appréhender pour un observateur extérieur. Lors d'enquêtes, les personnes interrogées peuvent avoir du mal à isoler le discours sur le volcan ou la rivière tant ces éléments sont intimement liés à leur vie quotidienne, leur identité culturelle. A. Miranda (2000, p. 193) souligne combien les témoignages des riverains du Vésuve montrent « que leur manière de raconter et de vivre la présence du volcan n'est pas celle des savants », et que, pour eux, « les éruptions passées et futures font partie d'une même crise, surmontée ou à surmonter » (*ibid.*, p. 211). Le rapport au risque se fait par intermittence grâce à un mécanisme de sélection des souvenirs transmis de génération en génération.

Dès lors, la « mémoire » telle que l'entendent les services de l'État ne correspond pas forcément à la « mémoire » à laquelle font référence les habitants ou les gestionnaires locaux ayant été impliqués dans une crise ou sensibilisés par des témoins directs. Ainsi, les jugements généraux affirmant que la population ne se souvient plus, n'a plus conscience du risque, et alors même que de nombreux retours d'expérience comme celui sur les crues du Gard montrent le contraire (Huet *et al.*, 2003, p. 69), reflètent généralement cette absence de superposition exacte entre les différentes mémoires. Cette culture du « vivre avec le risque » peut se traduire par une volonté de construire la communication préventive en veillant à équilibrer le discours entre aspects positifs et négatifs du risque. Cela explique notamment les difficultés d'appropriation par les acteurs locaux de discours institutionnels sur les risques et leur prévention, perçus comme trop négatifs, comme minimisant les capacités locales de mobilisation face à l'événement ou niant la dimension sociale de l'événement en tant qu'occasion de resserrer les liens entre les membres de la

communauté à travers une expérience commune et partagée, une épreuve surmontée en commun.

Cette importance, comme ciment sociétal, de la catastrophe surmontée ensemble apparaît bel et bien à travers l'histoire de la gestion des risques en France, même si les institutions ont du mal à le reconnaître en ces termes. Il est clair que les évolutions majeures de la réglementation française vis-à-vis des risques naturels sont liées à des événements précis. Sans remonter jusqu'au XIX^e siècle avec les grandes inondations de 1856, un bon exemple est celui des avalanches, avec le tournant de 1970 qui conduit à la mise en place de la première cartographie CLPA (partie 1.IV). Ces premières cartographies propres au risque avalancheux inspirèrent largement les réglementations suivantes applicables à l'ensemble des risques naturels en France (PER en 1982 et PPR en 1995). La dernière loi, dite Bachelot, de 2003 est elle aussi directement liée au contexte événementiel des années précédentes dans le sud-est de la France, avec les inondations de novembre 1999 dans l'Aude, l'Hérault, le Tarn et les Pyrénées-Orientales (35 morts et 621 millions d'euros de dommages), les inondations de l'hiver 2000/2001 dans la Somme et en Bretagne, et les inondations torrentielles de septembre 2002 qui touchèrent le Gard en particulier (23 morts et plus d'un milliard d'euros de dommages).

Figure 32
La mémoire des catastrophes au service d'une meilleure gestion des risques





Conclusion

La complexité des vulnérabilités est soulignée à travers la situation mondiale actuelle et les contrastes Nord/Sud. Si un ensemble de facteurs culturels, sociaux, économiques donne une ampleur plus importante aux catastrophes dans les pays en développement, les évolutions rapides de la vulnérabilité qui touchent les pays riches ne doivent pas être oubliées. Les nouvelles vulnérabilités urbaines et métropolitaines, la croissance des coûts économiques des catastrophes, les changements de mode de vie conduisent à une évolution rapide des risques dans les pays riches. Les situations sont complexes et le passage d'une échelle d'analyse à une autre particulièrement délicat. La manière dont sont structurées les données disponibles à l'échelle mondiale et le développement de l'assurance orientent la réflexion en mettant en lumière certains aspects (dommages aux biens assurables) plutôt que d'autres (dommages culturels et immatériels non assurés et non évalués dans nombre de pays en développement). Les différents types de vulnérabilités (matérielle, structurelle, fonctionnelle, concernant aussi bien des enjeux ponctuels que des territoires) sont difficiles à appréhender, tant dans leur dynamique propre (évolution de la résistance du bâti urbain face aux menaces sismiques) que dans leurs interactions (en quoi le choix des matériaux pour la construction d'un réseau d'eau peut modifier la vulnérabilité fonctionnelle d'une agglomération).

Le recours à l'histoire, notamment aux services d'archives, aide à comprendre cette complexité. La mise en perspective historique souligne combien les vulnérabilités passées sont différentes de celles d'aujourd'hui. Une grande rigueur méthodologique est donc indispensable d'une part pour ne pas oublier que les « risques naturels » sont pris en charge par les sociétés

humaines depuis très longtemps (et de manière souvent plus efficace qu'il n'y paraît) et d'autre part pour éviter anachronisme et contresens en étudiant les situations passées face aux risques. Ces développements amènent à souligner combien les représentations humaines jouent un rôle considérable dans la gestion actuelle des risques. La manière dont un événement dommageable présente une dimension positive est mise en évidence à travers la mémoire des événements passés, la culture du risque (que peut acquérir une société au cours du temps) et la conscience du risque (présente ou non chez les populations exposées). De nombreuses difficultés de gestion et conflits d'acteurs sont liés à une insuffisante connaissance et prise en compte de ces aspects.

→ CINQUIÈME PARTIE

La gestion des risques naturels

- I. Approches et outils de la gestion des risques
- II. Gouvernance des risques et aménagement des territoires
- III. Conclusion : la diversité des approches de la gestion des risques

On entend par « gestion des risques » l'ensemble des moyens (techniques, financiers, juridiques...) mis en œuvre pour prévenir et réduire les conséquences potentielles des catastrophes naturelles. Cette acception inclut aussi les moyens de limiter au mieux nos incertitudes sur ces menaces, en particulier l'acquisition de connaissances. Cela englobe une grande diversité de doctrines, de procédures, d'outils, de méthodes, dont la mise en œuvre est assurée par une multitude d'acteurs privés ou institutionnels, individuels ou collectifs, scientifiques, administratifs, techniques et surtout politiques. Les outils de gestion du risque sont nombreux. Ils agissent sur les composantes du risque qui ont été définies dans la première partie de cet ouvrage.

La gestion des risques et des catastrophes s'appuie sur des politiques publiques. En cela, elle suscite des textes réglementaires et nécessite des leviers financiers et politiques mais elle relève aussi de la responsabilité individuelle et collective des individus et groupes sociaux concernés par le risque. Elle implique des acteurs dans des « scènes du risque » (Decrop, 2002) où s'affrontent les représentations et les intérêts de chacun d'eux. La gestion des risques peut être source de conflits au sein des territoires lorsque les mesures de prévention ne font pas l'objet d'un consensus social minimal ou lorsque le risque est instrumentalisé à des fins politiques ou économiques. L'intégration de la gestion des risques naturels au sein de la gestion et de l'aménagement des territoires est œuvre de longue haleine.

→ I. Approches et outils de la gestion des risques

La réduction du risque implique que celui-ci soit réductible, que l'homme puisse agir sur les processus de fabrication du risque pour les atténuer. Lorsque les risques ne sont pas réductibles, il faut composer avec. Les Anglais disent « *to cope with* », ce qui pourrait se traduire par « se mesurer à », « vivre avec »...

La prévention désigne l'ensemble des mesures qui sont prises par anticipation pour éviter ou réduire les effets d'une catastrophe. Elle n'inclut pas *stricto sensu* la gestion de crise. Le terme de « protection » est plutôt réservé aux mesures de réduction de l'aléa comme les dispositifs paravalanches, les digues ou les barrages et exclut des mesures telles que la maîtrise de l'occupation du sol. L'expression « gestion des risques » nous semble plus complète. Elle admet implicitement qu'il n'est pas possible d'éradiquer les risques, que des sinistres peuvent survenir et qu'il faut les gérer.

① Objectifs et principes

a – Gestion des risques et gestion des crises

On distingue en général la gestion des risques de la gestion des crises ou des catastrophes. Dans le premier cas, il s'agit de prévention ou de gestion des risques *stricto sensu*, qui fait appel à des outils, méthodes et actions qui interviennent avant les catastrophes, en temps « normal ». Dans le second cas, l'intervention se fait lors des crises par la mise en sécurité des biens et des personnes et après la crise par le rétablissement des conditions de vie « normales » et la reconstruction lorsque les dommages ont

été graves. Les deux domaines relèvent de compétences et de milieux professionnels *a priori* différents. La gestion des risques a longtemps été très liée aux aléas avec une séparation très nette entre la prévention et la gestion de crise. Mais le fait d'accepter qu'il existe un risque résiduel incompressible, conduit à mieux articuler gestion du risque et gestion de crise.

**b – Les objectifs de la gestion des risques :
la prise en compte du contexte**

Avant d'envisager les moyens de réduire les conséquences des catastrophes naturelles, il convient de se poser la question des objectifs de la prévention. Une opinion longtemps répandue visait à réduire le risque au minimum. On a considéré qu'il fallait contraindre les phénomènes naturels. Cette opinion s'est affirmée avec le concept d'État-providence, dans lequel la puissance publique se doit d'assurer la sécurité des citoyens. La sécurité des personnes n'a pas de prix et il faut tout faire pour réduire les conséquences des catastrophes.

Ce type d'affirmation a longtemps bloqué le débat sur les objectifs de la gestion des risques : contre quels risques et quel niveau de danger doit-on se protéger ? Si la sécurité des personnes n'a pas de prix, elle a un coût. Quels moyens la société, un groupe social, un pays, une commune peuvent-ils et doivent-ils mobiliser pour se protéger des risques ? Quelles sont les mesures les plus efficaces ? Si les spécialistes se posent depuis longtemps la question, le débat sur les objectifs de la gestion des risques n'a pas complètement pénétré la sphère des décideurs et du grand public.

Pour répondre à ces questions, plusieurs éléments de contexte et de méthode sont à prendre en considération. Les moyens mis en œuvre par un pays ou un groupe social pour se protéger contre les risques naturels dépendent de sa richesse mais aussi de la représentation collective et des valeurs qui déterminent le degré de priorité accordé au risque. Ils dépendent aussi de la prégnance de l'aléa, de sa fréquence et de son intensité. Si l'on prend l'exemple des Pays-Bas, les moyens mis en œuvre par le pays pour lutter contre les inondations (continentales et par

submersion marine) sont immenses. Le pays a été traumatisé par les tempêtes et les submersions marines de 1953 qui ont causé la mort de 1 800 personnes. Cette catastrophe était comparable à celle engendrée par le cyclone Katrina en Louisiane en août 2005. Le plan Delta, destiné à renforcer les défenses littorales, a coûté 6 milliards d'euros entre 1957 et 1990. Ce coût, qui serait supérieur encore dans les conditions actuelles, se justifie par les nombreuses activités qui sont situées sous le niveau de la mer dans ce pays.

De même, le Japon met énormément de moyens dans la lutte contre les risques naturels qui sont omniprésents : volcanisme, séisme, tsunami, cyclones ; il n'est pas possible de trouver une portion de territoire exempte de risque. Le coût très élevé du foncier et la densité de l'occupation humaine sur l'archipel justifient les investissements énormes en ingénierie pour protéger les zones habitées : constructions parasismiques, digues de protection des plaines inondables, jetées anti-tsunami sur le littoral, contrôle des torrents par des seuils et des pièges à sédiments. La fréquence des catastrophes naturelles explique aussi le travail de conscientisation et d'information érigé en cause nationale : affiches, exercices de mise en situation, enseignement scolaire intégrant la prévention et la préparation à la gestion de crise.

On constatera que les pays cités sont des pays riches. Soumis à une même pression, certains pays comme le Bangladesh n'ont pas de moyens à consacrer à la prévention des risques. Il ne s'agit pas d'ériger le cas du Japon ou des Pays-Bas en modèle. On entend souvent en France des associations de riverains réclamer des protections maximales au titre que les Pays-Bas ont « protégé » le pays entier derrière des digues. Toutefois, aux Pays-Bas, les deux tiers du territoire sont inondables, la protection contre les inondations est une priorité vitale alors qu'en France il est plus aisé – et moins coûteux – de ne pas construire en zone inondable.

Confrontés à des risques naturels omniprésents dus en particulier au milieu montagnard, les Suisses ont réfléchi en termes de priorisation des enjeux. Il ne s'agit pas de se protéger à tout prix contre tous les phénomènes naturels quelle que soit leur ampleur. Vouloir se protéger dans les Alpes contre les avalanches, les mouvements de terrain, les inondations, les séismes

ou les ruptures de barrages (naturels ou anthropiques) reviendrait à bétonner l'ensemble des vallées et à fortifier tous les villages. Cette protection totale, outre qu'elle serait bien illusoire, aurait un coût énorme pour la société. Il faut donc composer en acceptant un risque « résiduel ».

En plus des moyens financiers, se pose la question de la hiérarchisation des risques et de la place des risques naturels dans le contexte socio-économique. On a vu après la crise financière mondiale de 2008 que les questions de réduction des risques de limitation du réchauffement climatique ou autres questions environnementales ont été reléguées au second plan face au désastre socio-économique. Pour certains, la gestion des risques naturels est une préoccupation de riches. Les sociétés nanties se préoccupent des risques naturels car les autres besoins de la société (nourriture, santé, logement) sont assurés. En revanche, pour les sociétés sous-développées, vouloir investir dans la réduction des inondations ou des glissements de terrains alors que les besoins fondamentaux comme le logement, l'accès à l'eau potable ou la santé ne sont pas assurés est inutile voire irresponsable. On peut aussi considérer que les catastrophes naturelles, lorsqu'elles sont récurrentes, entretiennent le sous-développement (partie 4.1.1) et que le développement passe dans certains pays par une réduction des dommages chroniques engendrés par les catastrophes naturelles.

Dans les pays développés, la question se pose plutôt sous l'angle de l'efficacité des méthodes employées pour réduire les risques naturels. Faut-il investir de l'argent public dans des méthodes coûteuses ou consacrer cet argent à la construction de maisons de retraite ou d'hôpitaux ?

Enfin, interviennent les valeurs et les représentations collectives. Ce qui est considéré comme un risque ne l'est pas de la même manière pour tout le monde. Par exemple, dans le Massif central, l'excès de neige est pénalisant pour les habitants des villages isolés. En revanche, c'est une aubaine pour les stations de ski. Faut-il déneiger en priorité les routes qui conduisent aux stations de ski ou les accès aux villages isolés ?

On peut aussi mentionner la Chine qui, au nom du développement économique, met entre parenthèses la prévention des

risques ou la protection de l'environnement en urbanisant des zones inondables ou en construisant sans une stricte application des normes parasismiques.

La gestion des risques est donc bien une affaire sociale. Elle exprime à un moment donné les rapports de l'homme avec son environnement et à l'espace ; elle reflète la hiérarchie des priorités sociales : priorité à la protection des personnes, au développement économique, intérêt particulier ou protection collective, intérêt collectif ou protection de l'individu. Il serait faux de croire que le rapport au risque est un rapport choisi. Il peut être subi. Les Bangladeshi ont-ils le choix d'habiter ou de ne pas habiter en zone inondable ? Ainsi la gestion des risques peut-elle refléter aussi les rapports de pouvoir lorsqu'un territoire ou un groupe social ne peut déployer les moyens qui lui semblent nécessaires pour faire face à une catastrophe. Les populations du sud de la Birmanie frappées par le cyclone Nargis en mai 2008 ont été maintenues isolées par le pouvoir central birman qui a interdit l'accès des zones sinistrées à l'aide internationale. Enfin, comme il existe de nombreuses études sur la représentation des risques, on doit aussi envisager la représentation des modes de prévention : pourquoi un groupe social utilise-t-il un type de mesure plutôt qu'un autre ? Pourquoi telle mesure de protection, efficace sur un territoire, ne fonctionne-t-elle pas sur le territoire voisin ?

c – Les leviers de la prévention : politiques publiques et initiative individuelle

Les politiques publiques sont la traduction de ce rapport entre le groupe social et le risque. Elles mettent en œuvre des réglementations, des financements et des actions visant à gérer les risques aux différents échelons du territoire. Les leviers de la prévention sont multiples. Certains pays ont une attitude incitative alors que d'autres sont plus normatifs. Les États-Unis (Heude, 2005, p. 101) optent pour la première solution avec le *National Flood Insurance Program* (NFIP). La possibilité de souscrire une assurance contre le risque « inondation » est soumise à l'adhésion par la commune au programme de prévention des inonda-

tions et au respect de certaines règles de prévention. Le système d'assurance est couplé avec l'autorisation d'occupation du sol. La France, dans sa tradition régaliennne (et pétrie de droit romain), a opté pour l'approche normative. L'efficacité d'une politique dépendrait de son adossement à une règle et au respect de cette règle. Par souci d'égalité, la règle est appliquée pareillement en tout point du territoire, du moins dans son principe. Il ne s'agit pas de condamner l'un ou l'autre des systèmes mais nous verrons que chacun d'eux à ses limites.

En France, une des lois fondatrices est la loi de 1982 sur l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles. Cette loi était, un an après l'arrivée de la gauche au pouvoir, une façon d'affirmer l'égalité de tous et la solidarité de la nation envers les victimes de catastrophes naturelles. Depuis cette date, les gouvernements, qu'ils soient de gauche ou de droite, n'ont cessé de renforcer le dispositif législatif. La loi « Barnier » du 2 février 1995 a instauré les PPR; celle du 30 juillet 2003 a renforcé les dispositifs favorisant l'information du public. On constatera aussi que le fait de réaffirmer sans cesse par force circulaire et décrets les mêmes principes trahit les défaillances dans la mise en œuvre de ces textes. Comme nous le verrons, cela est particulièrement le cas pour la maîtrise de l'occupation du sol, objet central des PPR.

Ces textes sont propres à chaque nation suivant le principe de subsidiarité qui prévaut dans la gestion des risques et des catastrophes naturelles. Cependant, il existe depuis longtemps des normes internationales de protection comme pour les constructions antisismiques. Concernant la gestion des risques, on voit apparaître une réglementation européenne sur les risques avec la directive européenne « inondation » du 23 octobre 2007. Cette directive stipule que :

Les États membres procéderont d'ici à 2011 à une évaluation préliminaire des risques d'inondation de leurs bassins hydrographiques et de leurs zones côtières associées... Si la probabilité de dommages consécutifs aux inondations est élevée, les États membres doivent d'ici à 2013 élaborer des cartes des zones inondables et des cartes des risques d'inondation... Enfin, d'ici à

2015, des plans de gestion des risques d'inondation doivent être établis pour ces zones.

Cependant, il ne faut pas réduire la gestion des risques et des catastrophes aux seules politiques publiques, qu'elles soient locales, nationales ou internationales. Les premiers acteurs de la gestion des risques sont les citoyens et les habitants des zones exposées eux-mêmes (partie 5.II.1). Ils prennent à leur niveau des mesures de protection comme les batardeaux ou la construction de digues locales, la mise en place de dispositifs antigélifs ou paragrêles sur les cultures ou la construction d'abris individuels contre les tornades aux États-Unis... De même, en temps de crise, les premiers acteurs de la gestion de crise sont les sinistrés qui mettent en œuvre les premières mesures de sauvegarde avant l'arrivée de l'aide extérieure.

② Le contrôle des aléas : principe et limites des mesures structurelles

Le risque a été défini comme la combinaison d'aléas d'origine naturelle et d'enjeux socio-économiques et culturels caractérisés par une vulnérabilité. Le fait d'agir sur l'un ou l'autre de ces trois paramètres de l'équation du risque permet de le réduire. La gamme des moyens à disposition de l'homme pour gérer les risques est très vaste. Le schéma de la figure 33 résume les interventions possibles. Sont appelées méthodes structurelles, les mesures qui cherchent à contrôler l'aléa souvent par des ouvrages de génie civil : digues, barrages, murs de déviation des coulées de lave, dispositifs paravalanches. Les méthodes structurelles peuvent être appliquées pour les aléas dont les zones exposées sont connues comme les inondations, les coulées d'avalanches et parfois les volcans. Les mesures dites non-structurelles regroupent les mesures juridiques, informatives, qui visent à réduire les enjeux et leur vulnérabilité face aux aléas. Cette gamme de mesure est très large et va de la réduction de la vulnérabilité du bâti (constructions parasismiques) à la gestion de crise et à la reconstruction post-catastrophe.

Figure 33
Schéma des approches de la gestion
des risques et des crises



La puissance technique de l'homme est inégale face aux forces de la nature. Dans le cas des séismes, l'imprévisibilité du phénomène et les énergies mises en jeu expliquent que l'on ne peut contenir le phénomène. Pour les volcans, les protections structurelles sont assez marginales. Elles se résument à des tentatives de déviations de coulée (en Italie sur l'Etna) dont on ne sait si le succès est attribuable aux énormes tranchées creusées pour guider la coulée ou à l'arrêt naturel du processus effusif.

Malgré quelques tentatives pour modifier la trajectoire ou la puissance des cyclones, les aléas climatiques majeurs (tempêtes, tornades...) restent hors de portée des tentatives de modification anthropique. Parmi les aléas atmosphériques, deux font l'objet de tentatives de modifications par l'homme. Il s'agit de la grêle et des précipitations. Dans de nombreux pays, des programmes de modification de la grêle sont en cours. Il s'agit d'ensemencer les nuages potentiellement grêligènes avec de l'iodure d'argent de façon à disperser la formation des grêlons sur des noyaux de congélation. Les grêlons plus petits et plus nombreux fondent avant d'atteindre le sol. De même, de nombreuses expériences ont eu lieu pour favoriser les précipitations. Les Israéliens sont en pointe dans ce domaine. Ils tentent d'activer le potentiel précipitable des nuages dans le désert du Neguev.

Pour les aléas climatologiques directs et pour les aléas géophysiques, les moyens d'atténuer l'aléa restent globalement peu efficaces. En revanche, pour les risques gravitaires, la modification de l'aléa est possible car le lieu de survenance des phénomènes est guidé par la topographie. Dans certains cas, les risques de mouvements de terrain sont modifiables par purge des versants ou drainage.

De même, les conséquences des avalanches peuvent être réduites par divers dispositifs en contrôlant leur déclenchement ou leur propagation (tableau 19). Comme pour beaucoup de phénomènes gravitaires, l'entretien des versants est un moyen de contrôle souvent efficace. Cependant, que ce soit pour les glissements de terrain, les avalanches ou les inondations, l'action sur les bassins versants (drainage, végétalisation...) a surtout un effet sur les phénomènes de faible et moyenne intensité. Il ne

supprime pas la possibilité de phénomènes plus rares et plus dévastateurs.

Tableau 19
Les principales actions de protection
contre les avalanches

	Objectif	Type de dispositif
Défense passive <i>ex ante</i> (avant que l'avalanche ne se produise)	Empêcher, retarder ou atténuer le déclenchement des avalanches	Bandes boisées, claies, rateliers, filets paravalanches dans les zones de déclenchement
Défense active <i>ex ante</i>	Contrôler les déclenchements d'avalanche	Purge préventive des versants par dispositif fixe (exploseur à gaz) ou mobile (explosif, canon avalancheur...)
Défense passive <i>ex post</i> (après que l'avalanche s'est déclenchée)	Arrêter ou détourner l'avalanche	Étraves, digues, galeries de protection (tunnel), murs d'arrêt

FL, NMR, FV, 2010.

C'est contre les inondations que l'on a recours le plus massivement aux méthodes structurelles. Digue et barrages sont depuis longtemps des moyens privilégiés de réduction de l'aléa « inondation ». Les grands cours d'eau sont souvent endigués dans la partie moyenne et inférieure de leurs cours : Mississippi, Danube, Rhin, Loire... Cependant, depuis quelques années, la prolifération de ces systèmes de protection a eu des effets pervers : efficacité douteuse, coût exorbitant, défaut d'entretien... Des catastrophes récentes (inondations de la Nouvelle-Orléans en août 2005) sont venues remettre en cause le choix des protections structurelles comme panacée. Voyons quels sont les intérêts et les limites des digues (et dans une moindre mesure des barrages) pour la protection contre les inondations.

a – La protection contre les inondations : le cas des digues

Historiquement, les digues ont été construites pour la protection d'enjeux divers : enjeux agricoles essentiellement mais aussi enjeux militaires et urbains. Elles ont été initialement construites à proximité du lit mineur pour contenir les débordements. Ces ouvrages ont une efficacité hydraulique évidente. Les digues de l'Agly en Salanque (Pyrénées-Orientales) ont diminué d'un facteur dix la fréquence des inondations. En l'absence de digue, toute la plaine de la Salanque aurait été inondée en 1999 comme en 1940. Les ouvrages protègent contre des crues d'une période de retour établie lors de la construction et appelée « crue de projet ». Le niveau de protection est choisi en fonction principalement de l'argent disponible et des enjeux à protéger dans un rapport coût (possibilité d'investissement) / bénéfices (enjeux à protéger) plus ou moins formel. En France, les barrages EDF ont des déversoirs capables d'évacuer des crues millennales voire décennales, c'est-à-dire qui se produisent théoriquement tous les 10 000 ans. On a vu dans l'étude de l'aléa (chap. 1) combien il fallait être prudent par rapport à ces durées de retour calculées sur des séries de données largement supérieures à cinquante années. Les digues de la CNR qui bordent le Rhône entre Lyon et Beaucaire et qui n'ont pas été construites pour protéger des crues du Rhône sont réputées insubmersibles. Lorsque la crue de projet est fréquente, le système n'est pas infaillible. Un dispositif de déversoirs permet de contrôler l'écoulement des crues de débit supérieur dans des zones à faible enjeu.

Les aménagements structurels diminuent l'aléa mais ne suppriment pas le risque. Au-delà des aspects purement sécuritaires, l'implantation d'infrastructures de protections lourdes et coûteuses pose le problème de leur pertinence technique, financière, sociale et territoriale.

b – Les limites de l'endiguement

- Les limites techniques

La première limite d'une digue est bien sûr sa faillibilité technique qui engendre l'inondation des territoires qu'elle était censée protéger. Les brèches dans les digues apparaissent à partir de trois scénarios.

La première cause de brèche ou d'inondation des terrains « protégés » est la surverse. Dans ce cas, le débit du cours d'eau dépasse l'aléa de référence. Lors du passage de Katrina, les digues qui protégeaient la Nouvelle-Orléans ont été submergées, ce qui était somme toute logique puisqu'elles n'étaient prévues que pour un cyclone d'intensité 3 sur l'échelle de Saffir-Simpson alors que Katrina a atteint le niveau 4. Le deuxième cas de rupture de digue est l'érosion de l'intrados, c'est-à-dire de la partie de la digue côté rivière. Enfin, les digues peuvent céder suite à des infiltrations au travers de l'ouvrage, infiltrations qui suivent des terriers aménagés par des animaux fouisseurs, comme les ragondins, mais aussi des racines mortes ou des ouvrages (tuyaux) traversant la digue (Mériaux *et al.*, 2001). Le mauvais entretien de la digue est un facteur de risque majeur. En effet, de nombreuses digues ont été construites il y a plusieurs dizaines d'années, voire plusieurs siècles, et parfois la traçabilité des propriétaires responsables de la digue a été perdue. L'autre cas de figure est la digue dont le propriétaire est connu mais n'est plus en mesure de l'entretenir.

Les digues, outre le risque de rupture, peuvent empêcher l'évacuation des eaux en cas d'inondation par l'arrière.

- Les implications territoriales des protections :
le cercle vicieux urbanisation/protection

Les protections structurelles quelles qu'elles soient ont des implications territoriales nombreuses. Elles sont souvent appelées de leurs vœux par les populations exposées mais elles aug-

mentent le sentiment d'invulnérabilité et servent de prétexte à une augmentation inconsciente des enjeux.

En effet, l'argumentaire des élus et de la population est souvent de négocier le niveau de protection (emprise de la zone inondable retenue par le PPRi par exemple) en arguant des travaux effectués pour diminuer l'intensité et la fréquence de l'aléa. En clair, tel secteur de la commune était classé en zone à risque mais depuis la construction du barrage ou des digues, il ne l'est plus, donc ces terrains peuvent être déclarés constructibles. Les exemples de ce type ne manquent pas. D. Lorion (2006) a montré sur l'île de la Réunion que le programme pluri-annuel d'endiguement des ravines (PPER) décidé en 1980 avait pour but de récupérer des terrains inondables pour assurer le développement de l'île. Il visait aussi à rendre visible la présence de « l'État-providence » dans cette île d'où était originaire le Premier ministre de l'époque, Raymond Barre. Le raisonnement va même parfois jusqu'à arguer *a posteriori* de la construction des digues pour urbaniser les zones à l'arrière afin « de rentabiliser les investissements de protection ». Le géographe D.J. Parker (1995) parle d'« *escalator effect* » (effet escalier) : les zones à risque sont urbanisées, la population demande des protections, les protections favorisent de nouvelles habitations qui doivent elles-mêmes être protégées et ainsi de suite (Sauri-Pujol *et al.*, 2001).

Globalement, diminuer la fréquence de l'aléa par deux pour augmenter d'autant les enjeux n'est pas, on le comprend aisément, une opération rentable en termes de protection (figure 34 – **Évolution des pertes en cas d'inondation, avec ou sans protection**, à consulter sur www.licence.puf.com). Les populations se sentent protégées et comprennent d'autant moins leur malheur lorsqu'elles sont inondées. Le ressenti de la population en cas de sinistre sera plus fort si les autorités ont tenu un discours vantant les effets protecteurs de tel ou tel aménagement. Les digues, et globalement la plupart des mesures structurales, ont pour vertu de réduire voire de supprimer le risque « haute fréquence et faible intensité » mais n'excluent pas les catastrophes de faible fréquence (période de retour cinquentennal ou centennal) mais de forte intensité.

Compte tenu de ces limites, les décideurs et aménageurs (gestionnaires de bassin versant, États...) mettent en cause la pertinence de recours à l'endiguement comme solutions durables de la réduction du risque « inondation ». Les protections structurelles sont envisageables lorsqu'elles n'ont pas d'effet pervers, lorsqu'elles suppriment réellement le risque à un coût raisonnable.

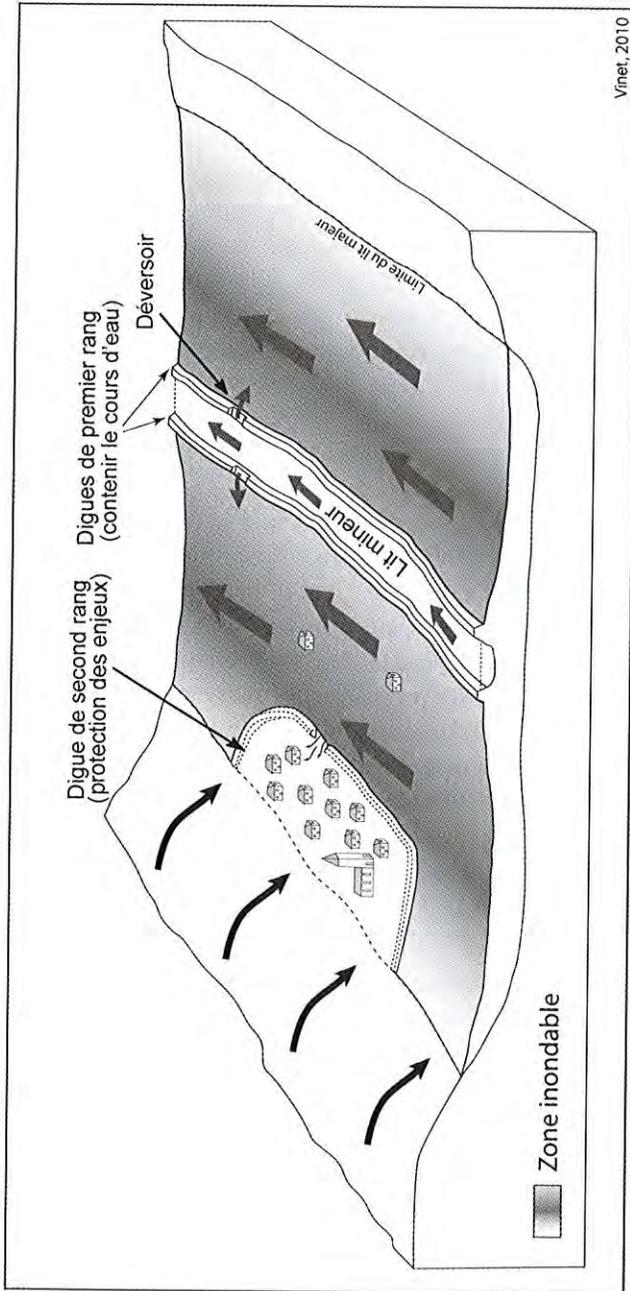
Un autre moyen de contrôler l'aléa « inondation » est la création de chenaux de dérivation. Ce type d'aménagement permet, à l'amont d'une zone endiguée à fort enjeu, de délester le cours d'eau d'une partie de son débit à partir d'un partiteur, sorte de déversoir qui laisse déborder les eaux dans un chenal prévu à cet effet. Suite aux crues du 20 octobre 1982 sur le fleuve Turia qui traverse la ville de Valence (Espagne), les autorités ont choisi de dévier le cours d'eau vers le sud de la ville en réaménageant l'ancien lit en jardins d'agrément. Compte tenu des enjeux, cette solution s'imposait.

Face au coût et à la faillibilité des digues ou des barrages, les gestionnaires se tournent vers des interventions dites plus douces sur les bassins versants, notamment les reboisements ou la remise en fonctionnement de zones d'expansion de crue. L'objectif est de freiner les écoulements à l'amont et de redonner au cours d'eau « l'espace de liberté » qu'il avait pu perdre. En Alsace, le polder d'Erstein permet d'écrêter les crues du Rhin. Au-delà d'un débit de 3 600 m³/s (période de retour décennale), les eaux du Rhin se déversent dans une zone d'expansion de crue de 7,8 millions de m³. Ce programme s'accompagne d'une remise en état des écosystèmes alluviaux du Ried que la privation d'eau par les endiguements du Rhin avait appauvris.

• Des alternatives aux protections structurelles

Pour que les protections lourdes soient pleinement efficaces, la population doit se les approprier et elles doivent être intégrées dans le système global de gestion du risque. On en veut pour preuve l'échec des projets d'endiguement au Bangladesh. Le Bangladesh vit sur le delta commun de trois fleuves majeurs : le Gange, le Brahmapoutre et le Meghna. La topographie très plane

Figure 35
L'endiguement des cours d'eau et ses limites



explique que, lors des crues des fleuves en saison des moussons, 20 à 60 % du pays soient inondés. Les lits des fleuves sont très mobiles et peuvent se déplacer de plusieurs centaines de mètres par an. À cela s'ajoutent les submersions marines qui envahissent le sud du pays lors des cyclones et qui sont particulièrement meurtrières lorsqu'elles sont concomitantes des crues fluviales. Depuis près d'un siècle, des projets d'endiguement des cours d'eau sont élaborés pour corseter les fleuves ou isoler des espaces hors d'eau au milieu du delta. Après les inondations catastrophiques de 1988, la France soutenue par la Banque mondiale et une quinzaine de donateurs élabore un projet de maîtrise hydraulique du delta des trois « tigres » bangladais. Le projet, ambitieux, devait coûter une dizaine de milliards de dollars sur 20 ans. Il consistait à créer des corridors fluviaux en fixant les lits mineurs des fleuves grâce à un système d'épis. Un réseau de canaux de drainage complétait le dispositif complexe. Les réalisations en sont restées au stade expérimental. Pour fonctionner, ce système exigeait un contrôle très fin de la circulation hydraulique dans le delta, contrôle qui devait s'appuyer sur la population. Or, pour diverses raisons, la population n'a pas adhéré au projet. Il aurait fallu aussi vaincre la corruption galopante dans le pays, la construction de grands projets étrangers étant une aubaine pour les dirigeants. Ce projet était un paragon de la démesure ingénieuriste, coûteux et déconnecté de son contexte. Les ONG sur place se concentrent actuellement sur des projets plus modestes d'espaces refuges anticycloniques et sur des actions de réduction de la vulnérabilité des populations.

• Conclusion sur la maîtrise de l'aléa

La maîtrise des phénomènes potentiellement destructeurs n'est pas envisageable pour tous les risques. Elle est surtout pratiquée pour le risque inondation. Dans certains cas, les aménagements peuvent quasiment supprimer le risque ou l'atténuer de manière à ce que le risque devienne acceptable (certains mouvements de terrain ou avalanches). Ces méthodes ont une efficacité politique redoutable et sont très appréciées des élus et des populations car elles sont visibles. Cependant, et c'est le cas pour les

inondations, elles ont parfois l'effet pervers d'induire un faux sentiment de sécurité chez les populations en réduisant les crues fréquentes (et donc en abaissant la conscience du risque) sans exclure le risque de catastrophe majeure, comme on l'a vu pour Katrina. Dans les secteurs à forts enjeux, les protections structurales peuvent être envisagées à condition d'être intégrées dans un système de gestion du risque plus global qui prévoit la faillibilité de ces protections et les mesures à prendre dans cette éventualité. Ces méthodes de recours au génie civil sont lourdes, coûteuses et souvent dommageables pour l'environnement. Elles nécessitent des précautions d'emploi visant à ne pas remplacer le risque naturel ainsi évité par un risque technologique (rupture d'une digue ou d'un barrage). Après avoir longtemps favorisé l'endiguement des cours d'eau, les États occidentaux sont devenus beaucoup plus prudents dans le financement des grands travaux de type digue ou barrage et cherchent à trouver des voies plus « douces » pour réduire les risques.

③ La réduction des enjeux

a – La réduction des enjeux futurs par la maîtrise de l'occupation du sol

La forte croissance des dommages dus aux catastrophes naturelles depuis une vingtaine d'années s'explique essentiellement par l'installation de logements, d'activités économiques et d'infrastructures dans les zones à risque. L'un des objectifs de la prévention est de mettre en place des instruments coercitifs ou incitatifs pour stopper ou limiter l'augmentation des enjeux en zone à risque. La maîtrise des enjeux passant par le contrôle de l'occupation du sol, elle n'est possible que si les aléas sont assez finement cartographiables pour délimiter des zones à risque fort et des zones à risque modéré ou nul. En France, la maîtrise des enjeux passe par un outil essentiel : le plan de prévention des risques (encadré n° 4). Le PPR a été institué en 1995 en remplacement des outils existants : le plan de surface submersible (PSS) instauré par le décret-loi de 1935, l'article R 111-3 du code de

l'urbanisme existant depuis 1955 et le plan d'exposition aux risques adopté en 1984 (PER). Faute d'une volonté politique forte, ces outils se sont révélés peu efficaces et n'ont pas empêché l'urbanisation des zones à risque depuis 30 ans.

L'objectif principal du PPR est de maîtriser l'urbanisation future des zones à risque. Mais en cartographiant l'aléa, il vise aussi à porter à la connaissance des populations et des élus les risques auxquels sont exposés les territoires.

ENCADRÉ N° 4

Un outil de réglementation de l'occupation du sol et de prévention en France : le PPR

Le PPR a été créé par la loi n° 95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement et du décret n° 95-1089 du 5 octobre 1995. Son but principal est de réglementer l'occupation du sol dans les zones à risques afin de réduire les dommages aux biens et aux personnes lors des catastrophes naturelles.

Les risques concernés par les plans de prévention des risques sont l'inondation, les mouvements de terrain tels que les glissements ou les effondrements, les feux de forêts, les avalanches, les séismes, le risque volcanique et les submersions marines et érosion littorale et les risques associés aux cyclones dans les départements et territoires d'outre-mer. La procédure est dirigée par l'État. C'est le préfet qui prescrit le document sur un périmètre de risque, en général plusieurs communes sont concernées par les mêmes risques. Les services de l'État (DDE, DDEA et DREAL) se chargent d'élaborer le contenu avec l'aide de bureaux d'étude. Le document est soumis à enquête publique et à l'avis des municipalités concernées. Il est ensuite approuvé par le préfet, annexé au plan local d'urbanisme et vaut servitude d'utilité publique sur les communes concernées. La procédure dure de deux à trois ans. Le coût d'un PPR varie de 10 000 à 40 000 euros par commune selon la nature des risques et la taille de la commune.

Le contenu du PPR

- Un rapport de présentation indiquant le secteur géographique concerné, la nature des phénomènes naturels pris en compte et leurs conséquences possibles compte tenu de l'état des connaissances.
- Des cartes d'aléa indiquant les zones touchées par l'aléa de référence. Cet aléa de référence est pour le risque inondation la crue

centennale ou les plus hautes eaux historiques si leur niveau est supérieur à la crue centennale. Pour le risque avalanche, on retient deux aléas de référence : l'événement centennal qui détermine les mesures de protection des biens et des personnes et l'*avalanche maximale vraisemblable* sur laquelle se calent les mesures de sécurité des personnes sur un périmètre plus large.

- Des cartes d'enjeux qui restent assez sommaires et se limitent en général à la localisation des ERP (établissements recevant du public) comme les écoles ou bien des établissements de gestion de crise (casernes pompiers, gendarmerie, locaux techniques municipaux...).
- Une carte réglementaire qui indique pour les zones définies les interdictions et les autorisations en matière de construction. Les zones d'aléa fort (dites zones rouges) sont interdites à la construction. Dans les zones à aléa modéré (zones bleues), les constructions sont autorisées sous certaines conditions.

Les prescriptions

De plus en plus, les services instructeurs ajoutent des prescriptions (obligatoires) ou des recommandations (facultatives) destinées à réduire la vulnérabilité des biens et des personnes : renforcement des murs contre le vent, amarrage des installations extérieures comme les citernes, réduction des risques d'incendie en cas de séisme, renforcement des cheminées des balcons et des toitures susceptibles de tomber en cas de séisme...

Le PPR peut exiger certains travaux de réduction de l'aléa. Il impose également l'élaboration dans un délai de deux ans d'un plan de sauvegarde communal (voir plus bas la description de cet outil).

Les années 2000 à 2005 ont été marquées par un effort de l'État en vue de couvrir les communes à risque. De 2000 à 2008, le nombre de communes concernées par un PPR approuvé est passé de moins de 1 000 à 8 267 (dont 112 dans les départements d'outre-mer), soit 22 % des 36 683 communes de métropole et des DOM. L'effort a jusqu'ici porté surtout sur le risque inondation (tableau 20). Si les avalanches et les séismes ne concernent que des zones limitées, en revanche les PPR feux de forêt sont loin de couvrir toutes les zones à risque comme la forêt méditerranéenne.

Tableau 20
Nombre de communes concernées par un PPR approuvé

Type de risque	Nombre de communes
Inondation	7 262
Mouvements de terrain (y compris risque littoral)	2 352
Avalanches	288
Séismes	264
Feux de forêts	82
Tempêtes et cyclone (DOM)	44
Volcanisme (DOM)	25
Affaissement minier	6

Source : base Gaspard/MEEDDAT, 2008.

Les PPR suscitent des conflits (partie 5.II.2) car ils touchent à des intérêts privés (fonciers), imposent des contraintes de prévention et sont vus par les collectivités locales comme des freins au développement.

D'autres systèmes de maîtrise de l'occupation du sol existent, moins contraignants, plus incitatifs. Aux États-Unis, la maîtrise de l'occupation du sol est liée à l'assurance par le *National Flood Insurance Program* (NFIP) créé en 1968 et amendé plusieurs fois. Un propriétaire de logement situé dans une zone à risque fort peut bénéficier d'une assurance à taux préférentiel et des indemnisations fédérales en cas de sinistre. En contrepartie, la commune (*community*) doit participer à un programme de réduction du risque en prenant des mesures de limitation des constructions en zone inondable. Les taux de primes, c'est-à-dire les tarifs des contrats d'assurances, sont régis par une cartographie des zones inondables (*Special Flood Hazard Areas*, SFHA) éditée par l'État fédéral.

Bien sûr, les PPR et systèmes similaires n'agissent que sur l'urbanisation future. D'autres dispositifs doivent être déployés pour réduire dans la mesure du possible les enjeux existants.

b – La réduction des enjeux existants par les délocalisations

Les documents maîtrisant l'urbanisation future se rencontrent sous d'autres formes dans divers pays. Outre les problèmes de vérification de l'application de cette réglementation, se pose la question des enjeux déjà existants en zone à risque.

Lorsque le danger pour la vie humaine est grand ou lorsque le risque de dommage est certain et que le coût des protections dépasse celui des enjeux, on peut avoir recours à des délocalisations. Elles consistent à détruire des logements ou des activités économiques en zone à risque élevé pour si possible reconstruire en zone non exposée. Le cas s'est produit en France à la Séchillienne où un lotissement menacé par un glissement de terrain de grande ampleur dans la vallée de la Romanche (Alpes) a été rasé et les habitants relogés. De même, sur la commune de Criel-sur-Mer en Haute-Normandie, onze habitations irrémédiablement condamnées par le recul de la falaise de craie (10 mètres en quatre ans) ont été détruites début 2006. Les propriétaires ont été indemnisés à hauteur de la valeur du bien estimée en l'absence de risque. Dans ces deux cas, il s'agit de délocalisations préventives. Dans le département du Gard, certaines habitations avaient été rendues inhabitables par les crues de septembre 2002. Depuis, 241 habitations ont été délocalisées pour un montant de 36 millions d'euros. Les procédures sont lentes, coûteuses mais suppriment radicalement le risque. Le financement est assuré en partie par le fonds de prévention des risques naturels majeurs dit « fonds Barnier » (encadré n° 5) mis en place par la loi de 1995.

ENCADRÉ N° 5

Le fonds de prévention des risques naturels majeurs (FPRNM dit « fonds Barnier »)

Créé par la loi du 2 février 1995, le fonds de prévention des risques naturels majeurs est alimenté par un prélèvement de 12 % sur le produit des primes ou cotisations additionnelles relatives à la garantie contre le risque de catastrophes naturelles des contrats d'assurance dommage. Prévu au départ pour l'acquisition de biens exposés à un risque ou sinistrés par une catastrophe, le champ d'application du fonds s'est étendu au financement :

- des dépenses d'évacuation temporaire et de relogement ;
- des plans de prévention des risques ;
- des actions préventives sur les risques majeurs ;
- des études et travaux sur la réduction de vulnérabilité imposés par un PPR.

C'est un levier intéressant qui permet de faire participer indirectement l'assurance à la prévention et qui a permis de mobiliser quelque 320 millions d'euros entre 1995 et 2008.

④ La réduction de la vulnérabilité

À partir du moment où la responsabilité humaine est reconnue dans les catastrophes d'origine « naturelle », on se doit d'agir sur les enjeux pour en réduire la vulnérabilité. Dans la panoplie des mesures de gestion des risques et des catastrophes, la réduction de la vulnérabilité permet dans beaucoup de cas d'envisager une réduction du risque à moindre coût. C'est, face à certains phénomènes naturels comme les séismes, la seule prévention possible.

La vulnérabilité a été définie comme la propension d'un individu, un groupe social, un territoire à subir des dommages ou des dysfonctionnements (partie 1.II.2). Réduire la vulnérabilité revient donc à réduire ces fragilités matérielles fonctionnelles face aux menaces naturelles. Il s'agit donc de :

- renforcer la résistance des bâtiments, ouvrages et activités exposés à l'aléa (vulnérabilité structurelle ou matérielle);
- renforcer les capacités de réponse d'une société à une catastrophe grâce à l'information, le développement de la conscience du risque et la préparation de la gestion de crise;
- favoriser le retour à la normale, la réparation et la reconstruction post-catastrophe.

a – La réduction de la vulnérabilité structurelle

La réduction de la vulnérabilité des enjeux est pratiquée depuis longtemps face au risque sismique puisque la prévision et la réduction de cet aléa sont quasiment impossibles. La construction parasismique est pratiquée depuis fort longtemps. Les techniques se sont améliorées et répondent à des règles bien précises visant à renforcer la solidité des bâtiments (voir figure 36 – *Principales règles de construction parasismique préconisées pour les maisons individuelles* sur www.licence.puf.com).

Bien sûr, pour être efficaces, ces règles doivent être accompagnées de précautions telles que le choix d'un terrain adapté et un suivi des bâtiments après leur construction pour détecter et remédier aux faiblesses structurelles qui pourraient apparaître. Elles sont rendues plus efficaces lorsque les personnes exposées sont informées des conduites à tenir en cas de séisme.

Pour certains risques, la réduction de vulnérabilité est une redécouverte. Pour le risque inondation, les Européens ont engagé des programmes pour la réduction de vulnérabilité du bâti abandonnant une politique fondée essentiellement sur la protection (digues, barrages) depuis des décennies.

La réduction de la vulnérabilité des bâtiments face à l'inondation offre une gamme assez large d'adaptations possibles. Il s'agit :

- d'empêcher l'eau de pénétrer dans le bâtiment;
- si cela s'avère impossible, de minimiser l'impact de l'inondation;
- de favoriser la sauvegarde des personnes;
- d'accélérer le nettoyage et le retour à la normale après l'inondation.

b – La réduction de la vulnérabilité des sociétés et des personnes

• Réduire la vulnérabilité globale des sociétés

L'étude des catastrophes et de leurs impacts montre que la pauvreté est le principal facteur de vulnérabilité (partie 4.1.1). Réduire la pauvreté s'impose donc comme le levier le plus efficace pour réduire la vulnérabilité des personnes et des groupes sociaux en général face aux risques naturels. Toute tentative de réduire durablement les risques naturels par des actions spécifiques est vouée à l'échec si elle n'est pas accompagnée par des actions de développement assurant un accès aux besoins vitaux des populations en terme de santé, logement, ressources économiques. En cela, la réduction de la vulnérabilité face aux catastrophes s'articule parfaitement avec les objectifs du développement durable et notamment ses volets économiques et sociaux.

• La conscience et la connaissance du risque

Une certaine idée reçue fait croire que les populations locales ignorent tout du risque et sont complètement ignorantes des dangers qu'elles courent (partie 4.11). Dans les sociétés rurales traditionnelles, la permanence des populations garantissait une trace mnésique des catastrophes sur le long terme. La mémoire de la catastrophe (par définition assez rare) restait présente. Force est de constater qu'avec la mobilité des populations, la mémoire locale des risques s'efface. 10 % des Français changent de domicile chaque année. Il faut donc une mémoire (re)construite, substitution à la mémoire vécue défaillante. Plus qu'une mémoire proprement dite, il s'agit de développer une conscience du risque, élément indispensable au succès de la prévention des risques. L'information des personnes exposées aux risques est rarement une fin en soi. Son objectif est surtout de créer une conscience et une connaissance du risque ainsi qu'une culture de crise qui vont permettre les conditions d'une bonne prévention et d'une gestion de crise efficace. Dans le premier cas, la connais-

sance des zones exposées permet de mieux comprendre et admettre les restrictions d'occupation du sol et de mieux juger de l'efficacité des mesures. Dans le second cas, une connaissance de l'aléa et de ses processus ainsi que la conscience des vulnérabilités locales permettent de mieux réagir en cas de crise.

De plus en plus, l'information passe par l'éducation, notamment des enfants qui sont un vecteur efficace puisqu'ils sensibilisent aussi leurs parents, l'inverse étant moins sûr. Après le tsunami d'Asie du Sud-Est du 26 décembre 2004, on a beaucoup cité le cas de cette jeune fille qui avait étudié les tsunamis en classe de géographie et qui, en reconnaissant les signes annonciateurs sur la plage de Thaïlande où elle était en vacances, a pu alerter ses parents à temps en leur demandant d'aller se réfugier à l'intérieur des terres.

Les autorités ont développé des programmes et outils d'information des populations exposées. En France, des documents élaborés par l'État comme les DCS (dossiers communaux synthétiques) avaient pour but de faire connaître à la population les risques qu'elle encourt. En réalité, l'information institutionnelle est peu efficace si elle ne s'accompagne pas d'une appropriation du risque par les populations concernées. L'objectif est de réduire la vulnérabilité d'un groupe social en améliorant les comportements des organisations et des individus en cas de crise.

5 Prévision, alerte et gestion de crise

La prévention et la protection ne pouvant être totalement efficaces, les individus et les sociétés doivent se préparer à faire face à des sinistres ou des catastrophes.

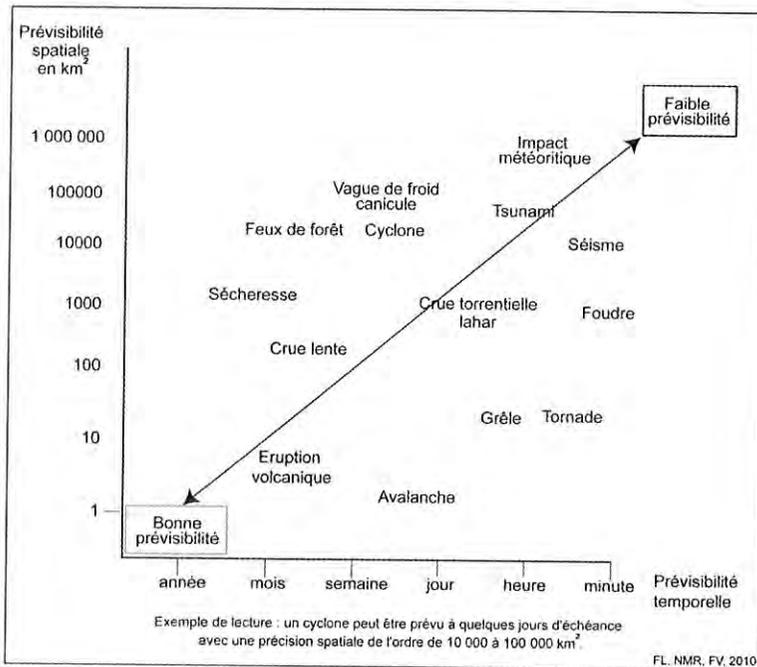
La crise peut être décomposée en un certain nombre de stades qui vont de la veille pré-crise à la reconstruction post-catastrophe (partie 1.III). La gestion des crises inclut toute une chaîne d'actions, depuis la mise en vigilance jusqu'à la reconstruction, en passant par la mise en alerte des populations, le cas échéant des évacuations et des mises en sécurité.

a – Veille, vigilance, prévision et alerte

Avant la crise, le travail de veille et de prévision, lorsqu'il est possible, est effectué par des experts ou par la population elle-même qui peut détecter à l'avance l'imminence d'un sinistre par des signes annonciateurs. On citera le cas de l'île de Simeulue au large de l'île de Sumatra en Indonésie. Lors du tremblement de terre qui a précédé le tsunami du 26 décembre 2004, les habitants des côtes se sont réfugiés vers l'intérieur de l'île pour échapper aux vagues destructrices. La mémoire collective de la communauté avait conservé la trace du tsunami de 1907 et avait assimilé le séisme comme signe annonciateur d'un possible raz de marée.

La prévisibilité des catastrophes est liée aux caractéristiques de l'aléa et aux moyens mis en œuvre pour surveiller et prévoir les phénomènes. Certains aléas sont peu prévisibles. On ne dispose pas pour l'instant de moyens fiables pour prédire un séisme même si l'on arrive à localiser de mieux en mieux les zones à risque et à calculer des périodes de retour pour les séismes majeurs. La figure 37 expose la prévisibilité temporelle et spatiale des différents aléas. Les séismes sont par exemple des phénomènes très brutaux sans signe annonciateur fiable même si l'on a quelques signes, en général tardifs, et qui ne permettent pas de localiser précisément le futur séisme. En revanche, les phénomènes lents, cumulatifs sont beaucoup plus faciles à prévoir : sécheresses, crues lentes. Les crues de la Loire moyenne sont annoncées avec plusieurs jours d'avance, ce qui permet une bonne anticipation. Les cyclones et les tempêtes sont de mieux en mieux prévus même s'il reste des marges d'erreur sur leur intensité et leur trajectoire. Ainsi, les prévisions successives faites par le NHC de Miami, de la trajectoire du cyclone Katrina du 25 au 28 août 2005 donnaient des trajectoires exagérément déviées vers l'est (figure 38). Les prévisions de trajectoire de l'œil effectuées à partir du 26 août (trait plein sur la figure) étaient proches de la trajectoire réelle. Quant aux volcans, les signes annonciateurs d'éruption sont nombreux pour peu que le volcan soit bien surveillé (microsecousses, dilatation des roches, modification de la chimie des gaz).

Figure 37
La prévisibilité spatiale et temporelle des risques



On ne retient souvent que l'alerte « officielle », institutionnelle, délivrée par les autorités politiques. Mais les populations locales ont traditionnellement tenté de détecter et prévoir les occurrences des « fléaux des cieux ». Elles savent parfois fort bien interpréter les signes avant-coureurs d'une catastrophe. Cette prévision à court terme est fondée sur l'observation du milieu environnant entretenu par une indispensable mémoire du risque. Dans les zones sismiques, l'observation des signes comme le comportement des animaux permet parfois de prendre des mesures rapides (sortir des bâtiments). Pour les tsunamis, le retrait de la mer quelques minutes avant le tsunami est un indicateur intéressant qui laisse le temps aux habitants de se réfugier sur les points hauts.

La prévision experte est affaire de scientifiques. Les experts informent les autorités des différents signes annonciateurs et du dépassement de certains seuils par les indicateurs d'aléa : hauteur d'eau, activité sismique aux abords d'un volcan, vitesse de vents prévus. Ils s'aident de modèles de prévisions enrichis au fur et à mesure des événements. La prévision est assortie de marges d'incertitude.

Même si l'on dénigre facilement les prévisions météorologiques, il faut reconnaître qu'elles participent à la réduction du nombre de victimes dans les pays développés notamment en réduisant les déplacements des personnes. On sait en effet que pour les crues ou les tempêtes, près de la moitié des décès sont liés aux déplacements.

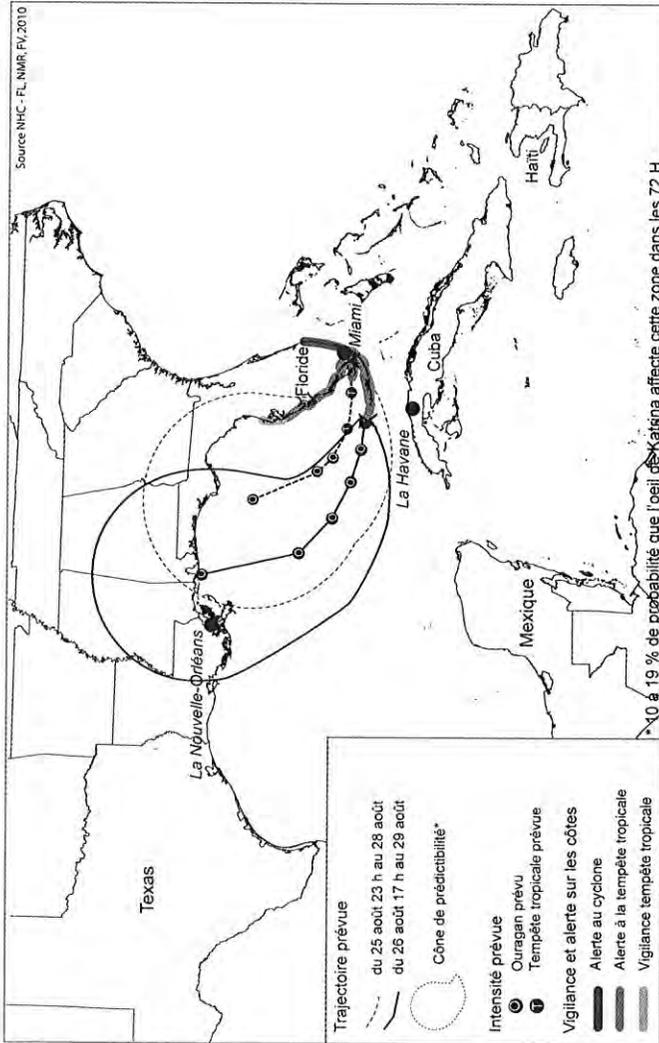
Dès que l'on passe de la prévision à l'alerte, l'affaire relève du politique. Ce sont les autorités qui déclenchent l'alerte sur la foi des informations fournies par les scientifiques. L'efficacité de l'alerte dépend de plusieurs éléments :

- la précocité du message ou plutôt son opportunité temporelle (*just on time* disent les Anglophones) ;
- la clarté du message ;
- l'efficacité des moyens de communication ;
- la connaissance préalable chez les populations exposées des consignes de sécurité ;
- l'interactivité expert/autorité/population lorsqu'elle est possible.

La communication du message d'alerte est cruciale dans la gestion de crise, surtout pour des risques à déclenchement brutal qui laissent un temps de réaction très court comme les crues torrentielles, les tsunamis, certains mouvements de terrains ou éruptions volcaniques.

En réalité, les autorités ne doivent pas compter sur un seul vecteur. Pour multiplier les chances que le maximum de population soit touché par le message d'alerte, il faut associer des messages téléphoniques à des passages dans les rues avec des porte-voix et des messages radiodiffusés ou télévisés.

Figure 38
Carte de prévision de trajectoire du cyclone Katrina en août 2005



ENCADRÉ N° 6

Le système de vigilance de Météo-France

Le système de vigilance en quatre couleurs de Météo-France a été institué en 2002 suite aux tempêtes de 1999 qui firent 90 morts et 7 milliards d'euros de dommages en France et autant dans le reste de l'Europe. Il comporte 4 niveaux auxquels sont associées des consignes de sécurité :

Vert : Pas de vigilance particulière.

Jaune : Soyez attentifs si vous pratiquez des activités sensibles au risque météorologique ou exposées aux crues. Des phénomènes habituels dans la région mais occasionnellement et localement dangereux (ex. : mistral, orage d'été, montée des eaux) sont en effet prévus. Tenez-vous au courant de l'évolution de la situation. Événements ponctuels de période de retour annuelle ou infra-annuelle.

Orange : Soyez très vigilant ; des phénomènes dangereux sont prévus ; tenez-vous au courant de l'évolution de la situation et suivez les conseils de sécurité émis par les pouvoirs publics. Événements de période de retour local décennale

Rouge : Une vigilance absolue s'impose. Des phénomènes dangereux d'intensité exceptionnelle sont prévus ; tenez-vous régulièrement au courant de l'évolution de la situation et respectez impérativement les consignes de sécurité émises par les pouvoirs publics. Événements de période de retour locale de 20 à 50 ans ?

Les risques météorologiques concernés sont la canicule, les grands froids, les fortes précipitations, le vent violent, orage, pluie/inondation, neige/verglas. Le passage d'un niveau à l'autre se fait en fonction de seuils prédéfinis à l'échelle la plus fine possible corrigés par l'interprétation de la situation par les prévisionnistes.

Si la vigilance orange est assez fréquente, la vigilance rouge n'a été utilisée que quelques fois : dans le Gard et l'Hérault en 2005 lors de crues torrentielles ou avant la tempête du 24 janvier 2009 dans le sud-ouest de la France. Dans tous ces cas, la vigilance rouge a un fort impact sur les populations et permet semble-t-il de minimiser le nombre de victimes.

b – La crise et sa gestion

La crise est considérée comme jugulée lorsque les personnes sont mises en sécurité et qu'il n'y a plus de danger de surcrise (nouvelle rupture de digue par exemple). La véritable fin de la crise n'est pas toujours facile à connaître. En effet, les éruptions volcaniques par exemple peuvent durer plusieurs mois avec des accalmies et des reprises d'activité. Depuis juillet 1995, le volcan de la Soufrière de l'île de Montserrat subit une importante activité volcanique, caractérisée par l'émergence d'un dôme accompagné de nuées ardentes, d'émissions de cendres et de coulées de débris, ainsi que de lahars. Plus de deux ans après son évacuation (début avril 1996), la population, environ 4 000 personnes qui vivaient dans la région proche du volcan, reste toujours éloignée de la zone d'activité. La ville de Plymouth était, jusqu'en 1995, la principale agglomération de l'île de Montserrat. Aujourd'hui, elle est entièrement détruite.

Les crises les plus graves ont eu lieu en cas de crise multiforme, lorsque des effets aggravants ou de nouvelles manifestations de l'aléa viennent frapper un territoire déjà touché par une première crise : recrudescence de crue, passage d'un nouveau cyclone, réplique sismique, rupture de digue ou de barrage après une crue...

c – La gestion de crise au niveau institutionnel

Au niveau institutionnel, la sécurité des personnes est de la compétence des États et des autorités locales. Depuis longtemps, les États sont investis de la mission de protection de leurs citoyens. De plus en plus, les élus locaux sont des gestionnaires de crise en puissance ; la population leur demande une vigilance de tous les instants. Les décisions lors des crises sont lourdes de conséquences. Si l'on prend le problème de l'évacuation, on comprend bien qu'évacuer des milliers de personnes est coûteux et impopulaire et que cela doit être dûment justifié. Plusieurs évacuations injustifiées ou fausses alertes décrédibilisent les gestionnaires et démobilisent les populations en cas de nouvelle

crise. La façon de gérer les crises, les acteurs de la gestion de crise (partie 5.II), la réponse des populations dépendent des cultures de chaque pays. En France, la gestion de crise est organisée à deux niveaux : celui de l'État et de ses services par le biais du dispositif Orsec (encadré n° 7) et par les communes en vertu du pouvoir de police dévolu aux maires. Aux États-Unis, la gestion de crise est de la compétence d'une agence fédérale, la *Federal Emergency Management Agency* (FEMA, <http://www.fema.gov/>). En nous référant de nouveau à l'évacuation des personnes, on notera la différence d'attitude entre la France et les États-Unis. En France, la culture est plutôt au confinement même si pour certains risques on préconise l'évacuation. Les évacuations massives sont rares. Aux États-Unis, les ordres d'évacuation sont systématiques en cas de cyclone. Lors des cyclones qui touchent la Floride ce sont parfois deux millions de personnes qui quittent les côtes. On notera aussi la nuance entre ordre d'évacuation et évacuation organisée. Lors de l'ouragan Katrina en 2005, l'ordre d'évacuation avait mis des centaines de milliers de personnes sur les routes, bloquant tous les accès. Les plus pauvres, n'ayant pas de moyens de locomotion, avaient été obligés de subir la catastrophe sur place. L'île de Cuba, en revanche, dispose d'un plan d'alerte et de mise en sécurité des personnes très efficace, ce qui explique le faible de nombre de victimes dû aux cyclones dans ce pays.

ENCADRÉ N° 7**Le dispositif Orsec : dispositif institutionnel de gestion des crises en France**

Le plan Orsec (organisation des secours) avait été créé initialement en février 1952.

Un nouveau dispositif Orsec (Organisation de la Réponse de Sécurité Civile) l'a remplacé depuis la loi de modernisation de la sécurité civile du 13 août 2004. C'est un système polyvalent et adaptable de gestion graduée des crises. Il organise la mobilisation, la mise en œuvre et la coordination des actions de toute personne publique et privée concourant à la protection générale des populations. Le plan Orsec doit être capable de répondre à tout type de risques (risques naturels bien sûr mais aussi attentats, épidémies, accidents technologiques...). Il s'organise à trois

niveaux : le plan Orsec départemental, décidé par le préfet de département ; le plan Orsec zonal, décidé par le préfet de zone de défense militaire en cas de crise grave touchant plusieurs départements, et le plan Orsec maritime, décidé par le préfet maritime. Ces plans sont en coordination avec les pcs déclenchés par les communes.

L'activation du dispositif Orsec se fait sous une direction unique, celle du directeur des opérations de secours, en général, le préfet (DOS). Cette organisation est répartie en cinq services et adaptée à la nature et l'ampleur de l'événement :

- premiers secours et sauvetage, assurés par les sapeurs-pompiers et les associations de secours ;
- soins médicaux et entraide, assurés par la DDASS et le SAMU ;
- maintien de l'ordre et renseignements, assurés par la police nationale et la gendarmerie ;
- liaisons et transmissions ;
- logistique, assurée par les DDEA et les conseils généraux.

Le préfet du département concerné dispose d'un cop (centre opérationnel départemental) et éventuellement du poste de commandement opérationnel (PCO) installé au plus près de la catastrophe. Il est conseillé par le COS (commandant des opérations de secours), un officier sapeur-pompier.

Le dispositif Orsec comprend :

- un inventaire et une analyse des menaces et de leurs effets potentiels sur les personnes, les biens et l'environnement ;
- un dispositif opérationnel répondant à cette analyse (alerte, gestion de crise, remontée d'information...);
- un recensement des moyens mobilisables en cas de crise ;
- les modalités de préparation et d'entraînement de l'ensemble des personnes publiques et privées à leur mission de sécurité civile.

Chaque personne publique ou privée recensée dans le dispositif Orsec doit être en mesure d'assurer en permanence les missions qui lui sont dévolues dans ce cadre par le préfet de département, le préfet de zone ou par le préfet maritime.

Le dispositif Orsec est captivé par le préfet lorsque la situation l'exige en général lorsque les moyens traditionnels, les populations et les communes ne peuvent plus répondre à la crise.

d – La gestion de crise au niveau local : l'exemple du plan communal de sauvegarde

La gestion de crise n'est pas seulement une prérogative étatique. L'efficacité est maximale lorsque les populations locales sont associées, actrices, voire initiatrices de leur propre sécurité. Les initiatives sont nombreuses et, traditionnellement, les communautés les plus exposées ont développé des comportements et des organisations empiriques pour faire face aux crises (partie 4.11).

Les plans communaux de sauvegarde (PCS) instaurés en France par la loi du 13 août 2004 sur la modernisation de la sécurité civile tentent de systématiser cette démarche. Le décret d'application du 13 septembre 2005 oblige les communes à élaborer un PCS dans les deux ans qui suivent l'approbation d'un PPR ou d'un PPI (plan particulier d'intervention). La fabrication du PCS est codifiée et un certain nombre de guides ont été publiés (<http://www.irma-grenoble.com/>). Elle peut être confiée à des bureaux d'étude ou assurée en régie par la municipalité elle-même. Le PCS décrit les niveaux, signaux et dispositifs d'alerte propres à chaque aléa. Il définit le dispositif gradué à mettre en place en cas de crise : cellule de veille, cellule de crise, décrit les actions de sauvegarde à entreprendre (alerte des populations, contrôle des voies de communications...). Un jeu de cartes d'aléa de vulnérabilité des ressources et des listes de personnes ressources complète la documentation du PCS. Il recense les ressources de la commune (lieu d'hébergement) et prépare la remise en état post-catastrophe. Le plan communal de sauvegarde est un outil établi en concertation avec tous les acteurs de la gestion du risque (pompiers, personnels municipaux...) et avec une forte implication de la population. Au départ plutôt orienté vers le risque inondation, le plan communal de sauvegarde tend à devenir un outil de gestion multirisque organisant une réponse à des crises de plusieurs origines : transport de matières dangereuses, séisme, tempête, incendie, accident d'avion... Cet outil est aujourd'hui déployé dans certains pays étrangers.

e – La post-crise

La post-crise correspond à la phase d'assistance aux populations sinistrées et au rétablissement des principaux services nécessaires au fonctionnement d'un territoire (tableau 21).

Tableau 21
Les actions de la post-crise

Les actions de la post-crise	Exemple
Éviter les surprises	Colmater les brèches dans les digues, évacuer les immeubles ou secteurs menacés. Sécuriser les installations à risque (installation polluante, centrale nucléaire, gaz...).
Répondre aux besoins matériels de la population	Alimentation, eau potable, chauffage, logement, vêtements.
Soutenir les populations	Assistance médicale (blessures, hypothermies, épidémies). Soutien psychologique. Aide juridique pour la constitution des dossiers d'assurance ou d'aide caritative.
Rétablir les fonctions vitales de la société	Rétablir les réseaux de communication (routes), de télécommunication (téléphone) et d'alimentation (électricité).
Aider à la reprise de la vie économique et sociale	Rétablir, reloger des commerces vitaux (alimentation). Rétablir les services administratifs.
Assurer l'ordre	Surveiller les habitations et les commerces inoccupés. Éviter les pillages.
Assurer hygiène et propreté	Nettoyer les rues et évacuer les déchets et gravats. Maîtriser les risques épidémiques (assainissement).
Organiser la solidarité	Loger, nourrir et équiper les secouristes et les ONG chargés de la reconstruction. Collecter et répartir les aides d'urgence dans la population.
Établir un premier bilan	Évaluer les dommages, les besoins en termes de reconstruction.

FL, FV, NMR, 2010

Source : d'après Vinet, 2003.

⑥ Réparation et reconstruction

a – Aide et assurance

Après la crise, des dispositifs existent pour compenser ou réparer les dommages. La compensation financière se fait par le bien de la solidarité à toutes les échelles (internationale, nationale ou locale) : les ONG (organisations non gouvernementales telles que la Croix-Rouge, Médecins du Monde, Oxfam...), les institutions internationales (ONU, HCR, Union européenne), les États et les autorités locales, les organisations professionnelles.

Les assureurs quant à eux proposent une compensation financière aux personnes et aux institutions qui avaient contracté préalablement un contrat couvrant le risque. L'assurance contre les catastrophes naturelles est plus répandue dans les pays riches.

Le marché libre de l'assurance ne concerne pas tous les risques. Pour être assurable, un risque doit satisfaire quatre conditions :

- être aléatoire, c'est-à-dire ne pas toujours affecter les mêmes endroits et être susceptible d'atteindre chaque point du territoire ;
- être réparti dans le temps et dans l'espace (pas de gros sinistres mais une multitude de petits sinistres) ;
- ne pas atteindre tous les assurés en même temps ;
- être mesurable de façon à établir une géographie des taux de prime.

Sont ainsi assurables le risque tempête, la grêle, le poids de la neige et, dans certaines conditions, le risque sismique ou l'inondation. Globalement, les risques atmosphériques sont plus facilement assurables car moins localisés que les risques gravitaires. Les avalanches, les glissements des terrains lents ou les inondations ne sont pas assurables dans les conditions du marché car la topographie détermine l'exposition au risque. En effet, si libre choix était donné aux propriétaires, seuls s'assureraient ceux qui habitent en zone à risque. Les assureurs seraient vite en déficit et augmenteraient les primes (ou cotisations) jusqu'à les rendre dissuasives. Ainsi, pour les risques réputés non

assurables, les États interviennent pour régler l'assurance. Aux États-Unis, le *National Flood Insurance Program* (NFIP) conditionne l'assurance bonifiée au respect d'un certain nombre de règles préventives. Même s'il présente des faiblesses, ce principe permet de lier la prévention à l'indemnisation, ce qui n'est pas le cas en France où prévaut le principe de solidarité (encadré n° 8).

ENCADRÉ N° 8

Le système de prise en charge des catastrophes naturelles en France

La France bénéficie d'un système d'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles mis en place par la loi du 13 juillet 1982. Toute personne titulaire d'un contrat d'assurance dommage (incendie) pour son logement bénéficie obligatoirement d'une extension de garantie couvrant les catastrophes naturelles. Sont garantis les biens mentionnés dans le contrat d'assurance de base mais la loi de 1982 ne précise pas la liste des aléas ouvrant droit à indemnisation. En pratique, sont garantis les dommages directs dus aux inondations et/ou coulées de boue, séismes, mouvements de terrain, tsunamis, ruissellements d'eau, de boue ou de lave, masses de glace ou de neige en mouvement et cyclones depuis 1990.

L'indemnisation est soumise à un arrêté de catastrophe naturelle pris par le gouvernement. Le système, géré par les assureurs, est garanti par l'État.

Entre 1984 et 2006, 9,6 milliards d'euros (source CCR, rapport 2008) ont été versés au titre des indemnisations catastrophes naturelles dont 4,9 pour la sécheresse géotechnique et plus de 4 milliards d'euros pour les inondations.

Si ce système organise la solidarité nationale face aux catastrophes ; certains lui reprochent de déresponsabiliser les populations exposées, la certitude d'être indemnisé n'encourageant pas la prévention.

b – La reconstruction

Lorsque les tâches de remise en état provisoires ont été effectuées – ce qui dure d'une à quelques semaines – s'engage la période de reconstruction. Cette phase est proportionnelle à l'ampleur des destructions et aux moyens mis en œuvre. Pour des

catastrophes qui engendrent des destructions massives des infrastructures et des superstructures (séismes, tsunamis, crues torrentielles) comme les crues torrentielles de 2002 dans le sud de la France, le tsunami d'Asie du Sud-Est en 2004 ou l'ouragan Katrina en 2005, cette phase a duré environ 4 ans pour des événements d'échelles pourtant différentes. Tous les acteurs y participent depuis les instances internationales jusqu'aux sinistrés en passant par les ONG, les autorités locales et régionales.

Dans les pays pauvres, les phases de reconstruction sont souvent longues et douloureuses pour les populations en place. Dans bien des cas (séismes, mouvements de terrain), il faut déplacer les personnes sinistrées soit parce que la zone où elles vivaient est dangereuse, soit parce qu'elle est devenue inhabitable. La plupart de ces déplacements de population se sont soldés par des échecs : les sinistrés sont relogés dans des conditions précaires ou bien dans des zones certes sécurisées mais fort éloignées de leurs lieux de vie et de travail antérieurs.

La phase de reconstruction pose aussi le problème de la prévention. Faut-il reconstruire à l'identique ? Ou bien faut-il reconstruire en garantissant une meilleure protection contre les futures catastrophes qui ne manqueront pas de survenir ? La reconstruction permettrait pour le risque sismique de reconstruire en respectant les normes parasismiques – diminuant ainsi la vulnérabilité d'un territoire. Malheureusement, la reconstruction se fait souvent dans l'improvisation, dans l'urgence, ce qui ne permet pas d'instaurer une prévention durable. Après le tsunami du 24 décembre 2004 en Asie du Sud-Est, le besoin de relogement a été fort sur l'île de Sumatra. Pour la partie nord de l'île, les besoins ont été évalués à quelque 110 000 habitations. Devant une telle demande, de nombreux habitants se sont improvisés maçons ou fabricants de briques. Il en a résulté que la plupart des briques qui ont servi à la reconstruction étaient de mauvaise qualité. Les constructions se trouveraient fragilisées en cas de nouveau séisme.

→ II. Gouvernance des risques et aménagement des territoires

La complexité de la notion de risque conduit à un grand nombre d'approches systémiques. Au sein de la gestion des risques s'articulent des pratiques, portées par des acteurs et mises en place sur des espaces organisés et polarisés par l'homme et ses activités depuis des siècles, autrement dit des territoires. Présenter le risque de telle ou telle manière n'est pas neutre et met en avant (comme référent, moteur ou oublié) tel acteur plutôt que tel autre, telle mesure, tel territoire. Par exemple, aborder le risque par le biais de l'endommagement conduit à mettre en lumière deux types d'acteurs, les experts et les politiques/décideurs, ainsi que la complexité de leur relation. Les décideurs apparaissent alors comme centraux, puisqu'en s'appuyant sur les informations fournies par les experts, ils sont en situation de prendre des décisions qui répondent aux besoins et attentes de la population et de la société civile. En revanche, aborder la dimension sociologique du risque met davantage en avant les acteurs de la société civile, capables aussi bien de donner rapidement l'alerte (à partir de leurs propres observations éclairées par un savoir vernaculaire) ou de faire face localement à la catastrophe, que de susciter des débats publics, rechercher des responsabilités en demandant des comptes aux gestionnaires privés ou aux autorités publiques. Cet angle d'attaque met en avant le clivage entre la population (société civile) et les autorités (élus, gestionnaires administratifs...), et permet également d'étudier le rôle des acteurs économiques à différentes échelles, ainsi que celui des médias, de plus en plus présents dans la gestion des catastrophes.

La gestion des risques s'analyse donc aussi par le biais de l'étude des différents acteurs en présence. Chaque acteur, en fonction de ses compétences, de son histoire et de sa culture

interne, de ses moyens propres, de son rôle ou de sa mission, de ses objectifs à moyen et long terme, a sa propre représentation du risque/de la catastrophe, ses propres seuils d'acceptation et sa propre stratégie.

Les acteurs de la gestion des risques étant particulièrement nombreux, nous les présentons rapidement avant de préciser leurs interactions : les jeux d'acteurs et les conflits inévitables.

❶ Les acteurs de la gestion des risques

Les acteurs de la gestion des risques sont extrêmement nombreux et l'une des difficultés majeures consiste à savoir précisément qui fait quoi, où, à quelle(s) échelle(s) territoriale(s) et avec qui. La fragmentation gestionnaire, soulignée en France par de très nombreux auteurs (Moriniaux (dir.), 2003 ; Veyret (dir.), 2003 ; Laganier (dir.), 2006) et rapports de retour d'expérience, entrave souvent l'efficacité des politiques de gestion des risques. Plusieurs classements ou tris étant possibles, le tableau 22 (*Acteurs et territoires d'action dans la gestion des risques naturels*, à consulter sur www.licence.puf.com) ne prétend en aucun cas à l'exhaustivité mais illustre cette complexité avec quelques exemples ordonnés.

On peut ainsi distinguer :

– **Les acteurs de la prévention et de la protection** : États, collectivités territoriales, établissements publics d'aménagement, syndicats d'aménagement mais aussi acteurs privés, assureurs, membres de la société civile (tels que les citoyens ou les associations).

– **Les acteurs de la prévision et de l'alerte** : services météo, médias, entreprises spécialisées dans le conseil et l'assistance en temps réel.

– **Les acteurs de la gestion de crise** : pompiers, services hospitaliers, ONG d'aide humanitaire...

– **Les acteurs de la post-crise et du retour à la normale** : participants aux missions de REX, acteurs judiciaires, assureurs, experts.

– **Les grandes institutions internationales** : Nations unies, Europe, ONG qui financent et mettent en œuvre aussi bien des programmes de prévention, information que des missions humanitaires d'urgence. Y. Glemarec (2003) montre la diversité des acteurs et des programmes d'aide internationaux à la prévention et à la gestion intégrée des risques au Bangladesh : ce pays reçoit plus d'un milliard de dollars d'aide officielle au développement chaque année (2,5 % de son PNB) dont 9 % sont consacrés à l'aide d'urgence et à la maîtrise des risques naturels. Malgré cela, les projets sont en petit nombre et les difficultés de coordination existent entre les différents partenaires.

Dans beaucoup de pays développés, l'État joue un rôle majeur. Nous insisterons ici sur l'exemple français. L'État français d'aujourd'hui est l'héritier de plusieurs siècles de pratiques en matière de gestion des risques : la tradition administrative hiérarchisée, les pratiques (information descendante, peu de concertation) et les compétences sont largement liées à notre histoire nationale, centralisatrice, de droit écrit et normatif. Même si une décentralisation a été mise en place à partir de 1982, les mentalités ont peu évolué et l'on observe plutôt que des pratiques centralisatrices se sont mises en place à l'échelle régionale ou locale. L'État conserve des missions régaliennes en matière de risques : il le fait connaître, élabore les lois et réglementations en vigueur (PPR) et indemnise les dommages (régime CatNat). Pour cela, il lui revient d'améliorer la connaissance des aléas, de renforcer la prévention, la surveillance et la prévision, de développer l'information des citoyens (information acquéreur locataire) et la conscience du risque, de réduire la vulnérabilité des personnes et des biens à l'aide d'outils de réglementation de l'usage des sols comme le PPR (encadré n° 4), de développer des méthodes d'analyse et d'expertise.

En France, depuis la loi de sécurité civile de 1987, les compétences de l'État en matière de risques naturels sont organisées autour de deux axes : la sécurité de la population et la gestion durable de l'environnement. Ce sont donc le ministère de l'Intérieur d'une part et le MEDD d'autre part qui incarnent ces deux axes, mais le ministère de l'Équipement est aussi particulièrement

concerné puisqu'il dispose de moyens et de compétences techniques importantes en matière d'aménagement. Ce sont souvent ses services déconcentrés qui réalisent les cartes et dossiers des PPR pour les communes. Le ministère de l'Agriculture et de la Pêche intervient également à travers des compétences dans le domaine de l'eau, des forêts ; ses services déconcentrés peuvent réaliser les dossiers de PPR incendie de forêt. La coupure de 1987 entre un axe de compétences de secours et un axe de compétences de prévention n'est plus pertinente aujourd'hui où une gestion globale et plus participative est préconisée. Un conseil interministériel de prévention des risques naturels majeurs a vu le jour en février 2001 pour mieux définir la politique gouvernementale de prévention des risques et favoriser la synergie entre les différents services ministériels.

Les collectivités territoriales sont nombreuses à intervenir dans la gestion du risque, comme interlocutrices de l'État, en matière d'urbanisme ou de soutien technique, humain ou financier. Les départements et les régions n'ont pas de compétences spécifiques particulières en matière de prévention mais apportent souvent des moyens, appuient la création d'établissements publics intercommunaux ou interdépartementaux qui peuvent réaliser et gérer des ouvrages importants de protection (digues, barrages, travaux d'entretien des milieux naturels...). Des SIVOM (syndicats intercommunaux à vocation multiple) peuvent ainsi avoir des compétences en matière d'environnement et de gestion des risques (travaux d'entretien de cours d'eau, actions menées dans le cadre des PAPI), des EPTB (établissements publics territoriaux de bassin) ont vu le jour pour coordonner l'aménagement et la gestion des inondations à une échelle considérée comme pertinente (bassin de la Vaine, de la Loire). Les communautés de communes et d'agglomération peuvent aussi exercer des compétences en matière de gestion des risques. Par exemple, la communauté d'agglomération Hérault Méditerranée, qui regroupe 19 communes du bassin aval du fleuve Hérault (57 000 habitants, 370 km²), a validé au titre de l'intérêt communautaire le transfert vers son service environnement, le 28 juillet 2003, des compétences en matière de gestion raisonnée du littoral (suivi du trait de côte, étude et réalisation des ouvrages de lutte contre l'éro-

sion et les inondations marines notamment : brises lames, épis, réhabilitation des cordons dunaires), et le 10 septembre 2004, le transfert des compétences en matière d'étude, entretien et construction des digues reconnues d'intérêt communautaire (prévention des inondations à travers un état des lieux des berges et la mise en place d'un plan de gestion).

Mais, même en France, des compagnies privées peuvent également jouer un rôle majeur en matière de prévention et protection. Ainsi, à l'échelle de la région parisienne, Magali Reghezza (2006, p. 271) montre combien les grands opérateurs publics ou privés tels que la RATP, la SNCF, les chambres de commerce et d'industrie, l'Aéroport de Paris sont incontournables pour la prévention des inondations et participèrent à l'élaboration du PSSIZ (plan de secours spécialisé inondation zonal) sur un pied d'égalité avec les pouvoirs publics :

La chambre de commerce et d'industrie de Paris développe sa propre stratégie de prévention, à partir de brochures mais aussi de réunions de formation à thèmes, les entrepreneurs payant pour y participer. Elle possède aussi un service de cartographie qui produit des documents destinés à l'information préventive. Elle participe à l'élaboration des PPR inondation.

Le poids croissant des acteurs privés est lié au contexte de mondialisation et de métropolisation qui se traduit par la mise en concurrence des entreprises pour l'obtention de marchés de services (eau et assainissement, autoroutes, transports en commun, stationnement, gestion des déchets, téléphonie...) et la multiplication des interlocuteurs pour les pouvoirs publics.

Le rôle de la société civile, et notamment des associations, ne cesse de croître en matière de prévention des risques. Ces dernières, lorsqu'elles s'inscrivent dans la durée, s'impliquent dans les enquêtes publiques, développent une réflexion à long terme, diffusent des informations et proposent des conseils voire une expertise. Dans d'autres cas, notamment après une catastrophe ou la promulgation d'un PPR qui entraîne la création d'associations plus éphémères, elles peuvent s'opposer violemment à l'administration, aux acteurs politiques ou économiques accusés de sacrifier certains territoires ou populations.

② Jeux d'acteurs et conflits

a – Des jeux d'acteurs complexes

La comparaison France-Angleterre proposée par S. Beucher (2008, p. 173-190) montre combien les relations entre acteurs diffèrent à cause d'une approche presque opposée dans chaque pays : en France, la cohérence réglementaire et administrative est considérée comme un gage d'efficacité de l'action publique, cette logique se traduit par une organisation et un fonctionnement hiérarchique, une stratégie de gestion de type « *top-down* ». Même si la concertation entre l'échelon national et l'échelon local a beaucoup progressé (les maires et les élus locaux sont bien conscients de leur rôle et de leur responsabilité dans le cadre de la décentralisation), les relations suivent un modèle institutionnel beaucoup plus que participatif. En Angleterre, la présence du débat, l'adaptation permanente entre la stratégie prévue et le contexte de la crise témoignent d'une approche avant tout pragmatique et adaptative (tableau 23).

Pourtant, il est à souligner qu'aucun de ces modèles n'est la panacée. En effet, les deux pays, suite à des catastrophes successives (1998 et 2000 en Angleterre, 1999 et 2002 en France) qui remettaient en cause la gestion des risques telle qu'elle était pratiquée, ont tenté de faire évoluer leur modèle initial en corrigeant ce que pouvait avoir d'excessif la place prépondérante des acteurs d'un échelon territorial donné (national en France, local en Angleterre, l'échelon régional étant peu sollicité pour la gestion des risques dans les deux pays); cette situation était souvent le résultat d'héritages administratifs, politiques et culturels forts (et souvent sous-estimés car perçus comme évidents par les acteurs eux-mêmes). En France, on tente d'aller vers un modèle plus participatif, d'impliquer davantage la société civile et l'échelon local, de développer la culture du risque, d'avoir une approche plus douce de la gestion (mesures environnementales, redonner de la liberté aux cours d'eau plutôt que de renforcer les digues), comme en témoigne la loi Bachelot de 2003.

En Angleterre, où le modèle est particulièrement souple avec une grande marge d'interprétation laissée à l'échelon local (comtés, districts ou autorités unitaires), les dysfonctionnements constatés lors des grandes inondations de 1998 et 2000 ont conduit à renforcer le rôle de l'État (DEFRA, Agence de l'environnement) à travers le *Planning Policy Guidance 25* (PPG 25) de 2001.

À la suite des avalanches de l'hiver 1998-1999, qui ont fait une soixantaine de morts dans les pays de l'arc alpin, le retour d'expérience mené en France avait déjà souligné les différences d'approche dans la gestion des risques selon les pays ou les régions touchées (tableau 24).

b – Des conflits nombreux

Les acteurs de la gestion des risques étant très nombreux et la fragmentation gestionnaire croissante, on conçoit aisément que des conflits naissent souvent à l'occasion de la mise en place d'une réglementation ou de la gestion d'une crise. Il est cependant important de souligner que le conflit n'est pas mauvais en soi mais constitue un mode indispensable de régulation. Les sociologues montrent qu'il est indispensable, pour qu'une gestion du risque puisse être efficace, qu'existe une représentation de ce risque au sein de la population, des différents acteurs. Ils montrent également combien l'idée qu'il suffirait que tout le monde ait les mêmes connaissances scientifiques ou techniques que les experts pour avoir la même perception d'un risque est fautive. Perception et représentation dépendent largement d'un contexte socioculturel et historique large (partie 4.11), mais aussi de la position occupée par chaque personne/acteur/groupe social dans la société ou dans le système de gestion. Là encore, les travaux des sociologues montrent la propension des acteurs à privilégier une causalité/responsabilité extérieure en cas de dysfonctionnement, ce qui conduit inévitablement à des représentations du risque ou de la crise différentes voire incompatibles. L'enjeu majeur d'une bonne gestion de crise est de favoriser l'émergence rapide d'une représentation commune minimale de l'événement entre les acteurs, sans quoi la gestion est un échec.

Tableau 23
Deux approches stratégiques de la gestion des risques

	Modèle linéaire/ institutionnel	Modèle adaptatif/ participatif
Processus	Processus séquentiel de planification, programmation et mise en œuvre des décisions.	Alignement permanent entre la stratégie et le contexte.
Type de relations entre acteurs	Relations verticales (hiérarchiques) privilégiées. Modèle "top-down".	Relations verticales (coordination) et transversales. Enrichissement mutuel entre remontée d'information, initiatives locales (<i>bottom-up</i>) et décisions stratégiques descendantes (<i>top-down</i>).
Contenu	Système d'objectifs. Pannel de choix stratégiques. Dispositif intégré et planifié de ressource et de modes opératoires.	Panel de choix stratégiques. Objectifs et cibles. Configuration flexible de ressources.
Évaluation	Évaluation <i>ex ante</i> ou <i>ex post</i> .	Évaluation concomitante.
Contexte	Stable et prévisible.	Instable, à prédictibilité limitée.
Avantages	Visibilité et cohérence du dispositif. Gain de temps dans la mise en œuvre une fois la décision prise. Efficacité à court terme.	Adaptabilité aux besoins, à la demande et aux moyens disponibles. Meilleure prise en compte des informations venues du terrain. Efficacité à long terme.
Inconvénients	Faible adaptabilité. Pas de prise en compte de la demande locale. Modèle qui privilégie un acteur dominant. Risque d'inefficacité à long terme.	Manque de visibilité. Conflits possibles, manque d'arbitrage. Pertes de temps.
Exemples	France.	Angleterre, Pays-Bas.

FL, NMR, FV, 2010.

Source: d'après Hutter 2006, modifié.

Tableau 24
**Différentes approches pour la gestion du risque
 dans les pays de l'Arc Alpin**

Pays ou région	Type de modèle	Caractéristiques
Bavière (Allemagne)	Destructuré	Réglementation spécifique sur les risques, mais organisation au cas par cas et évolution du système en fonction de la jurisprudence (tend à mettre en avant la responsabilité des communes)
Suisse	Décentralisé	Loi fédérale définissant les principes (1984), lois cantonales de mise en œuvre, zonage et travaux à l'initiative des communes avec appui technique des cantons.
Val d'Aoste (Italie)	Autonome	Proche du système suisse, avec une autonomie plus grande de la région pour la production de réglementation sur la base de lois nationales d'orientation.
France	Centralisé	Rôle majeur de l'État et de ses représentants locaux, lois et réglementation nationale (PPR) - voir le tableau précédent.

FL, NMR, FV, 2010

Source : d'après le REX de l'avalanche de Montroc en 1999, Glass *et al.*, 2000.

Pour une bonne gestion des risques, dans le cadre d'une gouvernance évoquée plus haut, il est donc important de reconstituer les « scènes du risque », de préciser les acteurs en présence, leurs relations, stratégies, moyens d'action, etc.

Les conflits peuvent ainsi prendre plusieurs significations. Ils peuvent être liés à des intérêts divergents (fonciers, économiques) défendus par les acteurs, voire à des revirements au cours du temps ou à des différences d'appréciation entre les membres d'une même institution. Les conflits internes à la sphère publique sont nombreux en France, les niveaux décentralisés n'ayant pas forcément la même vision que les instances supérieures et les

différentes administrations n'ayant pas toujours les mêmes priorités (services de l'Équipement, de l'Intérieur, des Eaux et Forêts, de l'Agriculture...). La longueur des procédures peut parfois générer des conflits internes, à l'occasion du revirement d'un acteur. La mise en place d'un PPR notamment peut s'avérer conflictuelle, lorsque des intérêts privés se sentent lésés par le zonage mis en place ou lorsque les élus ne se sentent pas entendus dans leur désir de développer leur commune... ou d'être réélus. Les services déconcentrés de l'État reprochent aux acteurs locaux leur irresponsabilité lorsqu'ils accordent des permis de construire ou leur incompétence technique. Élus locaux et associations soulignent les incohérences des PPR (s'entourant parfois d'une véritable expertise bénévole pour contrer les arguments de l'administration), la méconnaissance du terrain par des personnels des services de l'État qui changent de poste tous les trois ans, le manque de concertation avec les citoyens. L'apaisement de tels conflits liés aux PPR peut passer par une recherche archivistique qui permet de contextualiser le risque et de valoriser la mémoire locale. C'est ainsi que B. Martin (206) a montré, dans le cas de la station de ski de Vars (Hautes-Alpes) et d'un PPR conflictuel, qu'une telle démarche favorise la concertation et la réappropriation territoriale du risque, apaisant ainsi les tensions entre les acteurs (service instructeur du PPR : RTM, élus et citoyens) et facilitant la recherche d'un compromis... sans pour autant empêcher certains propriétaires d'instrumentaliser le risque dans le cadre de conflits fonciers.

Les conflits peuvent également naître de la réactivation d'oppositions historiques anciennes, dont les acteurs contemporains ne sont pas toujours conscients. En France, la gestion passée des risques et des catastrophes est souvent réalisée au service d'un enjeu supérieur : maîtriser le territoire national. Pour les responsables de l'époque, le risque principal du xvii^e siècle au xix^e siècle est finalement lié à la vulnérabilité politique et administrative d'un État centralisé qui se construit peu à peu, beaucoup plus qu'aux dommages potentiels liés aux inondations, grêles, mouvements de terrain, avalanches ou autre phénomène naturel. Cet impératif structure une répartition tacite des rôles observée en Roussillon dans la gestion des inondations (Meschinot de

Richemond, 2003) : à l'État la protection contre les inondations par débordement de cours d'eau (qui font beaucoup de victimes et peuvent endommager des infrastructures stratégiques) et aux particuliers la défense contre les inondations pluviales (dont les dégâts concernent essentiellement les populations et l'économie locales). Ceci a des conséquences contemporaines puisque ce choix politique, attesté dès 1763, de privilégier l'indemnisation des inondations fluviales par manque de moyens financiers au XVIII^e siècle conduit à une sous-représentation des inondations pluviales dans les archives, alors que ce type d'aléa devient aujourd'hui préoccupant dans un contexte de concentration urbaine des enjeux. Ces choix politiques de gestion ont parfois perduré de manière implicite au XIX^e et au début du XX^e siècle, sans que les acteurs (gendarmes, préfets) en soient conscients et alors que le contexte qui les justifiait avait progressivement disparu. Ces lignes de fracture anciennes entre les populations locales et l'échelon national sont souvent réactivées à l'occasion d'événements contemporains, comme ce fut le cas dans l'Aude en 1999 (Laganier (dir.), 2006) : la violence du conflit ne peut se comprendre uniquement à travers les enjeux présents mais bien à travers le poids d'héritages anciens oubliés des acteurs eux-mêmes. Magali Reghezza précise dans le cas parisien que des « acteurs politiques locaux pensent le risque comme un instrument d'émancipation vis-à-vis de l'échelon étatique. La contestation des PPR inondation est l'occasion d'exiger un pouvoir accru » (*ibid.*, p. 286).

Dans d'autres cas, des conflits sont liés à une instrumentalisation consciente par certains acteurs de la gestion du risque au service d'enjeux jugés prioritaires. Le risque devient alors un instrument géopolitique : il peut être un alibi pour pénétrer et s'appropriier un nouveau territoire sur lequel on impose réglementations et intervention de nouveaux acteurs sans concertation avec les populations locales. L'histoire offre un certain nombre d'exemples de telles situations. Ainsi l'État français assoit entre autre son influence sur des territoires périphériques devenus français au milieu du XIX^e siècle (Savoie, Comté de Nice) en instaurant la politique de restauration des terrains de montagne

(lois de 1860, 1864 remplacées par celle de 1882), qui impliquait une très forte présence des agents de l'État sur le terrain afin de conduire des travaux de reboisement, ré-engazonnement et d'aménagement des torrents. Cette nouvelle politique de reboisement, qui coïncide avec le maximum démographique des montagnes alpines, entraîna des conflits très violents entre les tenants de l'arbre (ingénieurs voulant reboiser les terrains communaux) et les tenants du mouton (populations locales utilisant les communaux dans le cadre d'une économie vivrière). Les seconds sont considérés par les premiers comme des populations « dévastatrices et arriérées » (Brugnot et Cassayre, 2002, p. 265) et à ce titre exclues de toute concertation ou compensation du préjudice subi.

Des exemples d'instrumentalisation consciente du risque existent aujourd'hui, ce qui se traduit par une gestion des risques inadaptée aux aléas et aux besoins des populations. C'est le cas en Amérique latine, où S. Hardy et A. Sierra (2005) ont travaillé. À Managua, la focalisation sur les risques sismiques s'explique par le traumatisme de la destruction de la capitale du Nicaragua par les deux séismes de mars 1931 et décembre 1972, les autres risques, plus fréquents, étant négligés. Les acteurs politiques utilisent les risques sismiques au service de leur idéologie territoriale et de leur vision du développement urbain : les différences socio-spatiales sont accrues, les classes aisées évitant les zones à risques fréquents (inondations, coulées boueuses, glissements de terrain) et encourageant les recherches sur les risques sismiques pour s'en protéger grâce à des dispositifs coûteux. « L'affichage des risques sismiques favorise la spéculation foncière sur les marges urbaines, tandis que l'État s'est approprié à bon compte les terrains de l'ancien centre-ville de la capitale. » (*ibid.*, p. 93). À Quito (Équateur), l'accent est mis sur les risques de crues torrentielles boueuses car les autorités veulent, depuis 1941, empêcher l'urbanisation légale des versants. « La lutte contre le risque justifie alors le contrôle de l'expansion urbaine ». Le volcanisme, pourtant potentiellement plus dangereux pour la capitale de l'Équateur, focalise moins l'attention des pouvoirs publics.

③ La difficile prise en compte des risques dans l'aménagement des territoires

La gouvernance, qui émerge aujourd'hui dans un contexte de crise du politique et de la citoyenneté liée à la prise de conscience de l'incertitude qui caractérise les « sociétés du risque » (Beck, 2001), promeut une coordination accrue entre les acteurs (institutionnels, économiques ou issus de la société civile) pour définir et atteindre de manière concertée des objectifs qui doivent aussi permettre de mieux s'adapter à un environnement de plus en plus changeant. Le modèle participatif et la négociation transversale sont aujourd'hui une demande sociale qui produit de nouvelles modalités de régulation, de politiques publiques. Le terme de gouvernance permet ainsi d'opposer ces nouvelles pratiques et les principes qui les sous-tendent, par opposition aux modes traditionnels marqués par le rôle dominant d'institutions bien définies, aux relations hiérarchisées. Mais la gouvernance peut-elle vraiment résoudre les difficultés posées par la prise en compte des risques naturels dans l'aménagement des territoires ?

De nombreux obstacles théoriques et pratiques s'opposent à l'intégration de la gestion des risques dans les actions issues des processus de gouvernance (Vinet, 2010). Cela suppose que l'objectif (sinon les modalités) de réduire les risques soit partagé par les acteurs de l'aménagement du territoire, ce qui est rarement le cas. Un obstacle important réside dans le conflit évident entre le temps des catastrophes, de la prévention des risques, qui se compte en décennies voire en siècles, et le temps de l'action publique et des représentations des acteurs/aménageurs, qui se compte plutôt en terme de mandat électoral. L'efficacité des mesures de prévention s'évalue à long, voire très long terme et, dans le meilleur des cas, par une absence de catastrophe : ces deux aspects sont très difficilement compatibles avec les évolutions sociétales contemporaines centrées sur l'immédiateté et la visibilité. Il existe aussi des obstacles politiques et techniques à la prise en compte des risques naturels

dans les processus de gouvernance. La culture de la concertation n'existe pas toujours au sein des structures/États impliqués. Techniquement, les outils ou méthodes d'approche pour développer la concertation manquent... ou sont ajoutés comme maillons supplémentaires à la chaîne décisionnelle (exemple des EPCI en France), augmentant parfois l'opacité des décisions et ralentissant souvent les procédures. L'observation montre que c'est souvent la contrainte qui pousse les acteurs locaux à travailler ensemble, que cette contrainte soit celle des populations sinistrées par une catastrophe récente ou celle de l'État, imposée d'en haut. Cette dernière contrainte politique passe essentiellement par le « chantage aux financements » des bailleurs de fonds (conseils généraux, État, Union Européenne), la lourdeur des investissements nécessitant des sommes toujours plus importantes et des montages financiers toujours plus complexes.

La fragmentation gestionnaire ne facilite pas la prise en compte des risques dans l'aménagement, d'autant plus qu'elle s'articule avec un véritable mille-feuille territorial au sein duquel les risques doivent trouver leur place. La complexité naît de plans et réglementations multiples qui sont difficilement compatibles sur le terrain (PPR inondation, SAGE, contrats de rivière, périmètres Natura 2000, zonages agricoles comme les AOC, zonages urbains...). Les maires soulignent souvent l'impossibilité pour leur commune de trouver de l'espace disponible pour de nouveaux projets de développement (lotissement, déchetterie, station d'épuration) compte tenu de tous les zonages réglementaires qui pèsent sur leur territoire. Si ce constat est partagé par beaucoup, réfléchir à l'échelle intercommunale pour répartir autrement les ressources foncières ne va pas de soi et se heurte à de nombreuses réticences, comme dans les basses plaines littorales du Languedoc. Il faut y ajouter les écarts croissants entre la loi et les pratiques locales : pour reprendre un exemple lié à la gestion des inondations, l'entretien des cours d'eau non domaniaux est légalement de la responsabilité des propriétaires riverains, mais de plus en plus pris en charge dans les faits par les syndicats de rivières ou des structures intercommunales qui se substituent à des citoyens défaillants.

En France (contrairement au Japon), la maîtrise de l'occupation du sol est l'un des derniers domaines régaliens de la prévention des risques. Derrière les règles strictes édictées nationalement pour l'élaboration et la mise en application des plans de prévention des risques, la réalité est complexe et souvent conflictuelle. L'État a voulu renforcer l'outil PPR. La pression de l'État est très forte sur ses services afin d'atteindre des objectifs chiffrés mais la réalité dénote que, dans les communes où les enjeux de développements sont forts, la contrainte est négociée.

Au Japon, autour du mont Usu (Hokkaidô), le premier projet, totalement inédit dans ce pays, d'un zonage du risque contraignant pour l'occupation du sol a été abandonné en 2004. Cet abandon « s'explique autant à cause du refus d'implication financière de l'État central que pour éviter localement le casse-tête d'un tracé précis des frontières entre zones réglementées ; une façon [d'éluder] la négociation et incidemment la confrontation qui pourrait en résulter » (Augendre, 2006, p. 59).

Il n'est pas évident que la gouvernance des territoires au plus près des besoins des administrés favorise la prise en compte des risques. L'analyse de la production du risque par l'urbanisation des zones à risque a même tendance à prouver le contraire. On constate souvent l'échec d'une politique réglementaire de maîtrise de l'occupation du sol en zone à risque lorsqu'elle ne peut s'appuyer sur des catastrophes récentes ou une forte contrainte de l'État (Cuxac d'Aude). En Languedoc-Roussillon, l'occurrence récente de sinistres majeurs, la sensibilisation des populations et la volonté préfectorale garantissent une bonne prise en compte des risques. Mais cette tendance est largement conjoncturelle.

La gestion des risques, passée comme actuelle, s'avère ainsi un véritable indicateur politique et social de la maîtrise territoriale d'un espace par différents acteurs. A. Sierra (2009) précise

[...] comment les espaces à risques [à Quito et Lima] sont assimilés à des marges urbaines porteuses de stigmates. L'analyse de ces stigmates [permet de] comprendre la dimension sociale et politique du risque qui apparaît ainsi comme un mode de territo-

rialisation des marges urbaines. [...] Ces stigmates parce qu'ils rendent visible une vulnérabilité dans le développement urbain incarnent le risque et identifient la marge. L'étude de leurs dimensions historiques, politiques et sociales s'avère particulièrement utile à la géographie des risques pour comprendre ce que révèle l'existence du risque en tant qu'instrument de territorialisation urbaine.

Le risque ne peut donc plus être pensé en fonction de l'aléa d'origine, mais en fonction des territoires qu'il affecte. R. d'Ercole et P. Metzger (2009) proposent ainsi d'inverser la démarche en partant des enjeux majeurs vulnérables présents sur un territoire et non des aléas pour évaluer et gérer efficacement le risque. Effectivement, l'entrée par le territoire permet de restituer au risque sa dimension politique et de poser comme centraux les jeux de pouvoirs, rapports de force et stratégies des différents acteurs, sans oublier le poids des représentations et des perceptions. En ce sens, l'étude des risques permet de s'interroger sur les modes d'appropriation d'un espace, ce qui est bien au cœur de la démarche géographique.

→ Conclusion : la diversité des approches de la gestion des risques

La faisabilité et l'efficacité des mesures de prévention varient selon les risques, et les moyens réellement employés diffèrent selon les types d'aléas et les pays. Le tableau 25 (*Mesures de prévention par risque et leur applicabilité technique*, à consulter sur www.licence.puf.com) présente les mesures de gestion pour les principaux risques naturels. Les mesures sont évaluées en fonction de leur faisabilité et de leur efficacité technique. Il ne prend pas en compte le coût des mesures, ni leur acceptabilité sociale. L'examen en détail d'un certain nombre de mesures a montré que si certaines sont très efficaces en théorie, leur application se heurte à des problèmes technique, financier ou politique. Celle-ci dépend avant tout de la conscience du risque chez les acteurs chargés de la gestion des risques et de la volonté politique d'afficher la réduction des risques comme une priorité.



CONCLUSION GÉNÉRALE

Le thème des risques naturels en géographie s'est d'abord appuyé sur les travaux de géographes physiciens qui, associés aux spécialistes des sciences de la Terre, ont analysé les processus à l'origine d'événements précis pour en cerner les mécanismes et les facteurs de déclenchement. L'étude des aléas est donc l'un des premiers axes abordé par les géographes dans le domaine des risques naturels (mouvements de terrain, crues et inondations, phénomènes climatiques tels que cyclones, grêle, paroxysmes pluviométriques, tempêtes...). La sécheresse, les aléas biologiques ou sanitaires sont étudiés depuis moins longtemps. L'étude des vulnérabilités est elle aussi beaucoup plus récente en géographie et souffre encore d'un certain retard. La concentration des hommes et des richesses en ville explique le lien privilégié entre ce thème et les espaces urbains. Le développement des travaux sur la vulnérabilité montre comment la géographie peut se saisir de concepts qui pouvaient paraître il y a peu exclusivement économiques. Ce thème fait aujourd'hui l'objet de nombreuses recherches, à travers l'étude des perceptions et des représentations, des catastrophes passées et du poids des héritages dans la gestion contemporaine, des jeux d'acteurs et de l'instrumentalisation de la gestion des risques. Le développement de l'information préventive amène également à se pencher sur la conscience du risque, le rôle de la mémoire dans la constitution d'une véritable culture du risque. Les géographes proposent souvent une analyse renouvelée par l'approche sociospatiale, autrement dit territorialisée. Impliqués dans de nombreux programmes de recherches pluridisciplinaires, les géographes apportent une dimension synthétique, une vision intégratrice favorisant le dialogue entre des spécialistes (ingénieurs, gestionnaires, techniciens, élus, etc.) de diffé-

rentes disciplines (hydrologues, volcanologues, sociologues, économistes, historiens, etc.). La tendance actuelle est à l'intégration du risque comme une composante de la gestion raisonnée et globale d'un territoire. L'approche se veut globale et débouche sur des questions d'aménagement prenant en compte les acteurs et les représentations. Là encore, les géographes apportent leur savoir-faire en matière d'outils et de modélisation cartographique et participent à la gestion opérationnelle des risques. Cette cartographie des risques est en plein essor. Des premières cartes descriptives sur les phénomènes en passant par l'intégration des enjeux et certains indicateurs de vulnérabilité plus récemment, cette cartographie tend à devenir de plus en plus interactive et à vocation opérationnelle : cartes de vigilance, cartes d'évacuation préventive, cartes prédictives issues de modèles numériques, cartes de simulation des dommages en temps réel... Couplés au déploiement récent des technologies de l'information et de la communication (TIC), ces produits cartographiques prennent un rôle central dans la gestion quotidienne des risques sur nos territoires en rappelant le caractère éminemment géographique de cette problématique.

Cet ouvrage a été composé
par IGS-CP à l'Isle-d'Espagnac (16)

Achevé d'imprimer sur rotative Variquik
en juin 2010
par l'imprimerie SAGIM à Courtry (Seine et Marne)
N° d'impression : 11962

L'imprimerie Sagim est titulaire de la marque
Imprim'vert® depuis 2004

Ouvrage imprimé
sur papier écologique à base de pâte FSC.
Pour plus d'informations, www.fsc.org

Bibliographie générale

- ABENHAÏM L., *Canicules, la santé publique en question*, Paris, Fayard, 2003, 262 p.
- ABRAMOVITZ J., « Unnatural disasters », *Worldwatch Paper*, Washington D.C., Worldwatch Institute, n° 158, 2001.
- ALLARD P., *Éléments pour une problématique de l'histoire du risqué. Du risque accepté au risque maîtrisé. Représentations et gestion du risque d'inondation en Camargue, xviii^e-xix^e siècles. Mémoire d'HDR*, Université Aix I, 2000, n p.
- ANDJELKOVIC I., « Guidelines on Non-Structural Measures in Urban Flood Management », IHP-V/Technical documents, *Hydrology*, n° 50, International hydrological programme, Unesco, 81 p. <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001240/124004e.pdf>.
- ANTOINE J.-M. (dir.), *Les Mots des risques naturels*, Presses Universitaires du Mirail, 2008, 128 p.
- AUGENDRE M., « La cartographie et le zonage du risque volcanique au Japon : impasse ou modèle à suivre ? », in LEONE F. et VINET F. (dir.), *La Vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles*, Publications de l'Université Paul-Valéry Montpellier III, 2006.
- BANKOFF G., FRERKS G., HILHORST D., *Mapping Vulnerability*, Earthscan, 2004, 236 p.
- BARDINTZEFF J.-M., *Volcanologie*, Paris, Dunod, 1998, 285 p.
- BAROUCH G., *La Décision en miettes*, Paris, L'Harmattan, « Logiques sociales », 1989, 237 p.
- BARRAQUE B., « Risque d'inondation : Urbanisme réglementaire ou servitude négociée ? », *Espaces et Sociétés*, n° 77, 1994, p. 133-152.
- BECAT J. et SOUTADE G., *L'Aiguat del 40, inondations catastrophiques et les politiques de prévention en Méditerranée nord-occidentale*, Actes du congrès de Vernet-les-Bains, 18-20 octobre 1990, Barcelone, Generalitat de Catalunya, Universités de Perpignan et de Paris X, 1993, 484 p.
- BECERRA S., PELTIER A. (dir.), *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*, Paris, L'Harmattan, 2009, 575 p.
- BECK U., *La Société du risque. Sur la voie d'une autre modernité*, Paris, Aubier, 2001.
- BERLIOZ J., QUENET G., « Les catastrophes, définitions, documentation », in FAVIER R. et GRANET-ABISSET A.-M. (dir.), *Histoire et Mémoire des risques naturels*, Grenoble, Publications de la MSH-Alpes, 2000, p. 19-37.
- BESANCENOT J.-P., « Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines », *Environnement, Risques et Santé*, n° 4, 2002, p. 229-240.
- BESSEMOULIN P., BOURDETTE N., COURTIER P., MANACH J., « La canicule d'août 2003 en France et en Europe », *La Météorologie*, n° 46, 2004, p. 25-33.

- BESSON L., *Les Risques naturels. De la connaissance pratique à la gestion administrative*, Grenoble, Institut des Risques Majeurs, Techni.Cités, 2005, 592 p.
- BETHEMONT J., *Les Grands Fleuves. Entre nature et société*, Paris, Armand Colin, 1999, 238 p.
- BEUCHER S., *Risque d'inondation et dynamiques territoriales des espaces de renouvellement urbain : les cas de Seine-amont et de l'est londonien*, Thèse de doctorat de géographie, Université Paris X Nanterre, 2008.
- , « La gestion des inondations en Angleterre : la mise en place d'un système efficace de gouvernance du risque ? », *L'Information géographique*, n° 4, 2008, p. 27-43.
- BLAIKIE P., CANNON T., DAVIS I., WISNER B., *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*, Londres, Routledge, 1994, 471 p.
- BRAVARD J.-P., « Paris et la Seine », in BRAVARD J.-P.(dir.), *Les Régions françaises face aux extrêmes hydrologiques, gestion des excès et de la pénurie*, Paris, Sedes, « Mobilité spatiale », 2000, p. 150 sq.
- , *Les Régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des pénuries et des excès*, Paris, Sedes, 2000, 287 p.
- , « Le risque d'inondation dans le bassin du Haut Rhône : quelques concepts revisités dans une perspective géohistorique », in *Fleuves et Marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture. Sociétés préindustrielles et milieux fluviaux lacustres et palustres : pratiques sociales et hydrosystèmes*, Aix-en-Provence, CTHS, 2004, p. 391-402.
- BRENAC, « Corporatismes et politique intersectorielle : la politique de l'environnement » in COLAS D. (dir.), *L'État et les Corporatismes*, Paris, PUF, 1988, 232 p.
- BRUGNOT G. et CASSAYRE Y., « De la politique française de restauration des terrains en montagne à la prévention des risques naturels », in Favier R. (dir.), *Les Pouvoirs publics face aux risques naturels dans l'histoire*, Grenoble, publications de la MSH-Alpes, 2002, p. 261 sq.
- BRUNEL S., *Le Développement durable*, Paris, PUF, « Que sais-je ? », 2004, 128 p.
- BURBY R., FRENCH S., *Floodplain Land Use Management: a National Assessment*, Studies in Water Policy and Management, n° 5, Boulder, Westview Press, 1985, 249 p.
- BURNOUF J. et REVEAU P., « Conclusions et perspectives », in *Fleuves et Marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture. Sociétés préindustrielles et milieux fluviaux lacustres et palustres : pratiques sociales et hydrosystèmes*, Aix-en-Provence, CTHS, 2004, p. 481-487.
- BURTON-JEANGROS C., GROSSE C., NOVEMBER V. (dir.), *Face au risque*, Genève, Georg, « L'équinoxe », 2007, 253 p.
- CANNON T., « Vulnerability analysis and the explanation of "natural" disasters », in VARLEY A., *Disasters, Development and Environment*, Chichester, John Wiley & Sons, 1994, p. 13-30.

- , « Vulnerability analysis and disasters », in PARKER D.J., *Floods*, vol. 1, Londres, Routledge, 2000, p. 45-55.
- CHALINE C., DUBOIS-MAURY J., *Les Risques urbains* (2002), Armand Colin, « U », 2004, 208 p.
- CHAVE S., *Élaboration d'une méthode intégrée du risque hydrologique*, Thèse de doctorat, Université de Provence.
- CHESTER D.K., DEGG M., DUNCAN A.M., GUEST J.E., « The Increasing Exposure of Cities of Volcanic Eruptions: a Global Survey », *Environmental Hazards*, vol. 2, 2001, p. 89-103.
- CHIAPPORI P.A., *Risque et assurance*, Paris, Flammarion, « Dominos », 1997, 122 p.
- COLLECTIF, « Le climat : risques et débats », Paris, La Documentation française, *Questions internationales*, n° 38, 2009.
- CORVOL A. (dir.), *Les Sources de l'histoire de l'environnement, le XIX^e siècle*, Paris, L'Harmattan, 1999, 502 p.
- COSANDEY C. (dir.), *Les Eaux courantes. Géographie et environnement*, Paris, Belin, 2003, 240 p.
- COSANDEY C., ROBINSON M., *Hydrologie continentale*, Paris, Armand Colin, « U », 2000, 360 p.
- D'ERCOLE R., « La vulnérabilité des sociétés et des espaces urbanisés : concept, typologie, mode d'analyse », Grenoble, *Revue de géographie alpine*, n° 4, 1994.
- D'ERCOLE R., METZGER P., « La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain », *Cybergeo*, dossier « Vulnérabilités urbaines au sud », article 447, <http://www.cybergeo.eu/index22022.html>.
- DAGORNE A., DARS R., *Les Risques naturels*, Paris, PUF, « Que sais-je ? », 128 p.
- DAUPHINE A., *Risques et Catastrophes : observer, spatialiser, comprendre, gérer*, Paris, Armand Colin, 2001, 298 p.
- DE VANSSAY B., *Méthodologies de retour d'expérience post catastrophe. Espaces de Vie*, Armand Colin/VUEF, 2003, p. 331-346.
- DECROP G., « Expertise et négociation des risques : "les scènes locales de risques" ont-elles une quelconque pertinence ? », in GILBERT C. (dir), *Risques collectifs et situations de crise, apports de la recherche en sciences humaines et sociales*, Paris, L'Harmattan, 2002, p. 251-266.
- DEGARDIN F., « Urbanisation et inondations : de l'opposition à la réconciliation », *Bulletin de l'Association des géographes français*, 2002, p. 91-103.
- DENEUX M. (dir.), *Inondations dans la Somme : des leçons pour l'avenir*, Rapport d'information au Sénat, 2001.
- , *L'évaluation de l'ampleur de changements climatiques, de leurs causes et de leur impact prévisible sur la géographie de la France à l'horizon 2025, 2050 et 2100*, Rapport de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, AN n° 3603, Sénat n° 224, t. I : rapport, 296 p., t. II : auditions, 329 p.

- DESAILLY B., « Le temps des Aiguats », in BROU N., BRUNET M., CAUCANAS S., DESAILLY B., VIGNEAU J.-P. (dir.), *De l'eau et des hommes en terre catalane*, Perpignan, Llibres del Trabucaire, 1992, p. 167-217.
- DESBORDES M., NOYELLE J., *Ruissellement pluvial urbain : guide de prévention. Évaluation du risque. Éléments de méthode*, Paris, La Documentation française, 1994, 87 p.
- DOMENACH J., MARC E., « Intercommunalité et risques naturels, aspects juridiques », *Ingénieries EAT*, 1998, n° 19, p. 27-35.
- DOULET J.-F., GERVAIS-LAMBONY M.-A., *La Chine et les Chinois de la diaspora*, Neuilly, Atlante, « Clefs concours », 2000, 238 p.
- DUBOIS-MAURY J., « Les risques naturels en France, entre réglementation spatiale et solidarité de l'indemnisation », *Annales de géographie*, 2002, n° 111, p. 627-628.
- DUBREUIL V., « Un risque climatique à géographie variable : la sécheresse dans la France de l'ouest. », in LAMARRE D. (dir.), *Les Risques climatiques*, Paris, Belin, « Belin Sup Géographie », 2005, p. 147-173.
- DUPONT N., « Le risque d'inondation, le rôle des documents cartographiques », in LAMARRE D. (dir.), *Les Risques climatiques*, Paris, Belin, « Belin Sup Géographie », 2005, p. 175 sq.
- FAUGERES L., VASARHELYI P., VILLAIN-GANDOSSI C., *Le Risque et la Crise*, Malte, Foundation for International Studies, 218 p.
- FAVIER R. (dir.), *Les Pouvoirs publics face aux risques naturels dans l'histoire*, Grenoble, CNRS, MSH, 2002, 444 p.
- FAVIER R. et GRANET-ABISSET A.-M. (dir.), *Histoire et mémoire des risques naturels*, Grenoble, CNRS, MSH, 2002.
- FLAGEOLLET J.-C., *Les Mouvements de terrain et leur prévention*, Paris, Masson, 1998, 224 p.
- FOUACHE E., « *The Mediterranean World: Environment and History* », in Actes du Colloque *Environmental Dynamics and History in Mediterranean Areas*, Working Group on Geoarchaeology (IAG), Université de Paris IV, UMR 8505, EFA, EFR, Casa de Velasquez, ENS LSH/Lyon, Université de Paris IV, 24-25-26 avril 2002, Paris, Elsevier, 2003, 485 p.
- GAILLARD J.-C., « Implications territoriales et ethno-culturelles d'une crise volcanique : le cas de l'éruption du mont Pinatubo aux Philippines », *Annales de Géographie*, vol. 627-628, 2002, p. 574-591.
- , « Traditional Societies in the Face of Natural Hazards: The 1991 Mt. Pinatubo Eruption and the Aetas of the Philippines », *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, 2006, vol. 24, n° 1, p. 5-43.
- , « De l'origine des catastrophes : phénomènes extrêmes ou âpreté du quotidien ? », *Natures Sciences Sociétés*, 2007, n° 15, p. 44-47.
- , « Catastrophes dites "naturelles", développement et dialogue interculturel », in AMILHAT-SZARY A.-L., ELAME J.E., GAILLARD J.-C., GIAZZI F. (eds.), *Culture et développement : la durabilité renouvelée par l'approche interculturelle ?*, Paris, Publibook, p. 87-101.

- GAILLARD J.-C., DELFIN F., DIZON E., LARKIN J., PAZ V., RAMOS E., REMOTIGUE C., RODOLFO K., SIRINGAN F., SORIA JANNELI L., UMBAL J., « Dimension anthropique de l'éruption du Mont Pinatubo (Philippines) entre 800 et 500 ans B.P. », *L'Anthropologie*, 2005, vol. 109, n° 2, p. 249-266.
- GARRY G., GAUME E., MESCHINET DE RICHEMOND N., « Cartographie et outils de gestion des risques naturels en France », p. 18-45, in VEYRET Y., GARRY G., MESCHINET DE RICHEMOND N., *Risques naturels et aménagement en Europe*, Paris, Armand Colin, 254 p.
- GAURAZ A.L., VALENCIA N., KOSCIELNY M., GUILLANDE R., GARDI A., LEONE F., SALAUN T. « Tsunami Damages Assessment: Vulnerability Functions on Buildings Based on Field and Earth Observation Survey », in *Geophysical Research Abstracts*, vol. 11, EGU General Assembly, 2009.
- GETCHES D., « La gouvernance de bassin-versant. Des limites naturelles pour des décisions relatives aux ressources naturelles », in *Gestion négociée des territoires et politique publiques, Espace et Sociétés*, 1999, n° 97-98, p. 111-132.
- GILBERT C., « La vulnérabilité : une notion vulnérable ? À propos des risques naturels », in BECERRA S. et PELTIER A. (dir.), *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*, Paris, L'Harmattan, 2009, p. 23-51
- , *Risques collectifs et situations de crise. Apports de la recherche en sciences humaines et sociales*, Paris, L'Harmattan, 2002, 340 p.
- GLASS B., HUET P., RAT M., TORDJEMAN R., « Retour d'expérience sur l'avalanche du 9 février 1999 à Montroc, commune de Chamonix », Paris, MATE, rapport de l'IGE, 2000.
- GLEMAREC Y., « Le rôle des institutions internationales dans la prévention et la maîtrise des risques : l'exemple du Bangladesh », in VEYRET Y. (dir.), *Les Risques*, Paris, Sedes, p. 104 sq.
- GRELOT F., *Gestion collective des inondations. Peut-on tenir compte de l'avis de la population dans la phase d'évaluation économique a priori ?*, Thèse de doctorat en sciences économiques, ENSAM, 2004, 383 p.
- HARDY S. et SIERRA A. « Territoires et acteurs des risques " naturels " en Amérique latine. Les cas des villes de Managua (Nicaragua) et de Quito (Equateur) », *Bulletin de l'Association des géographes français*, t. 82-I, 2005, p. 85-95.
- HELLIER E., CARRE C., DUPONT N., LAURENT F., VAUCELLE S., *La France : la ressource en eau. Usages, gestions et enjeux territoriaux*, Paris, Armand Colin, « U », 2009, 309 p.
- HEUDE J., « Risque d'inondation et acteurs dans le bassin Missouri-Mississippi », *Bulletin de l'Association des géographes français*, t. 82-I, 2005, p. 96-105.
- HOARAU K., CHALONGE L., « La réanalyse de l'intensité des cyclones tropicaux du Pacifique Sud durant l'épisode El Niño 1982-1983 », *Actes du XXI^e colloque de l'Association internationale de climatologie*, 2008, p 335-340.

- HUBERT G., LEDOUX B., *Le Coût du risque... L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations*, Paris, Presses de l'École Nationale des ponts et chaussées, 1999, 231 p.
- HUTTER G., « Strategies for flood risk management. A process perspective », in SCHANZE J., ZEMAN E., MARSALEK J., *Flood Risk Management. Hazards, Vulnerability and Mitigation Measures*. Springer-Verlag, *NATO Science Series*, IV, « Environmental sciences », vol. 67, 2006, p. 229-246.
- IPCC, *Climate Change 2007: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, PACHAURI R.K. et REISINGER A. (eds.), Geneva, Switzerland, IPCC, 2007, 104 p.
- KERVERN G.Y., RUBISE P., *L'Archipel du danger*, Paris, Éditions Economica, 1991.
- KRAFFT M., *Les Feux de la Terre, histoires de volcans*, Paris, Gallimard, « Découvertes », n° 113, 1991, 207 p.
- LAGANIER R. (dir.), *Territoires, inondation et figures du risque. La prévention au prisme de l'évaluation*, Paris, L'Harmattan, 2006, 254 p.
- LAGANIER R., SCARWELL H.J., « Risques hydrologiques et territoires », in MORINIAUX V. (dir.), *Les Risques*, Éditions du Temps, « Géographie », 2003, p. 106-137.
- LAGANIER R., VILLALBA B., ZUINDEAU B., « Développement durable et territoire : éléments pour une recherche pluridisciplinaire », *Revue numérique, Développement Durable et Territoires* (www.revue-ddt.org), 2002.
- LAMARRE D., « Le système français de gestion des risques climatiques. Un point de vue critique », in FAVIER (dir.), *Les Pouvoirs publics face aux risques naturels dans l'histoire*, Grenoble, CNRS, MSH, 2002, p. 337-346.
- LAMARRE D. (dir.), *Les Risques climatiques*, Belin, « Belin Sup.Géographie », 2005, 224 p.
- LAMBERT R., GAZELLE F., GHOLAMI M., PRUNET C., *La Cartographie informative des zones inondables. L'exemple de Midi-Pyrénées*, in Actes du colloque « Au chevet d'une catastrophe », Presses Universitaires de Perpignan, 2001, p. 147-164.
- LANG M., LAVABRE J. (dir.), *Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations*, Éditions Quae, 2007, 234 p.
- LANG M., RENARD B., *Analyse régionale sur les extrêmes hydrométriques en France : détection de changements cohérents et recherche de causalité hydrologique*, Congrès SHF « Variations climatiques et hydrologie », Paris, 27-28 mars 2007, 8 p.
- LE ROY LADURIE E., « L'historien face à l'histoire climatique et à l'attitude des autorités en cas de conjoncture "climato-périlleuse" », in FAVIER R. (dir.), *Les Pouvoirs publics face aux risques naturels dans l'histoire*, Grenoble, Publications de la MSH-Alpes, 2002, p. 13-29.
- LE TREUT H., *Nouveau climat sur la Terre : Comprendre, prédire, réagir*, Paris, Flammarion, 2009.
- LEDoux B., *La Gestion du risque inondation*, Paris, Éditions Tec et Doc, 2006, 766 p.

- LEFEVRE C., SCHNEIDER J.L., *Les Risques naturels majeurs*, Gordon and Breach, « Géosciences », 2002, 306 p.
- LEMARTINEL B., *Au chevet d'une catastrophe : les inondations des 12 et 13 novembre 1999 dans le sud de la France*, Actes du colloque Médi-Terra de Perpignan, Presses Universitaires de Perpignan, 2001, 198 p.
- LEONE F., « Implications territoriales et socio-économiques des menaces naturelles : une approche spatiale assistée par SIG en Martinique (Antilles françaises) », *Annales de Géographie*, n° 627-628, 2002, p. 549-573.
- , *Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes « naturelles » : contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones)*, Paris, Edilivre, « Universitaire », 2008, 336 p.
- LEONE F., PAGNEUX E., « Système d'Information Géographique et Indicateurs de Risques Naturels en Méditerranée : le projet SIG RINAMED », *Revue tunisienne de géographie*, n° 40, 2009, p. 87-120.
- LEONE F., VINET F., « 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 », Publications de l'Université Paul-Valéry Montpellier III, « EA GESTER », *Géorisques*, vol. 1, 2006, p. 9-25.
- LEONE F., VINET F. (dir.), « La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques », Publications de l'Université Paul-Valéry Montpellier III, *Géorisques*, vol. 1, 2006, 140 p.
- , « *La Cartographie des risques naturels* », Publications de l'Université Paul-Valéry Montpellier III, *Géorisques*, vol. 2, 2009.
- LEONE F., VINET F., DENAIN J.-C., BACHRI S., « 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*, vol. 82, n°1-2 (numéro spécial risques et territoires), 2007, p. 77-90.
- LLASAT M.C., BARRIENDOS M., BARRERA. A., RIGO T., « Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th Century. Climatological and Meteorological Aspects from Historical Documentary Sources and Old Instrumental Records », *Journal of Hydrology*, vol. 313, n° 1-2, 2005, p. 32-47.
- LLASAT M.C., « L'aléa météorologique dans les situations d'inondations extraordinaires à échelle régionale au sud de l'Europe : de la période 1840-1870 jusqu'à l'événement de 1999 », *La Houille Blanche*, vol. 2, 2007, p. 38-43.
- LONGUEPEE J., *Les dynamiques territoriales à l'épreuve des risques naturels. L'exemple du risque d'inondation en basse vallée de la Canche*, Thèse de doctorat en sciences économiques, Dunkerque, 2003, 414 p.

- LORION D., « Endiguements et risques d'inondation en milieu tropical. L'exemple de l'île de la Réunion », *Norois*, vol. 201, n° 4, 2006, p. 45-66.
- MARTIN B., « Expertise et risques majeurs : le point de vue du géographe », *Droit de l'environnement*, n° 142, 2006, p. 314-323.
- MASSON M., GARRY G., BALLAIS J.-L., *Cartographie des zones inondables, approche hydrogéomorphologique*, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme, Villes et Territoires, Paris, 1996, 100 p.
- MERCIER D., *Le Commentaire de paysage en géographie physique*, Paris, Armand Colin, « U », Paris, 2004.
- MERIAUX P., ROYET P., FOLTON C., *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations*, MATE, Éditions Cemagref, 2001, 191 p.
- MESCHINET DE RICHEMOND N., « Les sociétés rurales catalanes face aux inondations catastrophiques (France, XVIII^e-XX^e siècle) » in FOUACHE E. (dir.), *The Mediterranean World Environment and History*, Elsevier, 2003, p. 137-146.
- , « Statut et perception des catastrophes passées : vers une histoire géopolitique des risques naturels » in MORINIAUX V. (dir.), *Les Risques*, Nantes, Éditions du Temps, 2003, p. 138-156.
- , (dir.), *Quelles archives aujourd'hui pour mieux gérer les risques demain ?*, Montpellier, PULM, 2010.
- MIRANDA A., « Une présence silencieuse, mémoire et oubli des éruptions du Vésuve au XX^e siècle » in FAVIER R. ET GRANET-ABISSET A.-M. (dir.), *Histoire et mémoire des risques naturels*, Grenoble, Publications de la MSH-Alpes, 2000, p. 191 sq.
- MOISSELIN J.-M., DUBUISSON B., « Évolution des valeurs extrêmes de températures et de précipitations au cours du XX^e siècle en France », *La Météorologie*, 8^e série, n° 54, 2006, p. 33-42.
- MORINIAUX V. (dir.), *Les Risques*, Nantes, Éditions du Temps, 2003.
- MUNICH RE, *Topics Geo. Natural catastrophes 2008. Analyses, Assessments, Positions*, Munich Re Group, 2009, p. 39.
- NOVEMBER V., *Les Territoires du risque. Le risque comme objet de réflexion géographique*, Berne, Peter Lang, 2002.
- , « La mise en espace des risques ou comment la géographie humaine rend compte des risques », in BURTON-JEANGROS C., GROSSE C., NOVEMBER V. (dir.), *Face au risque*, Genève, Georg, « L'équinoxe », 2007, p. 117-135.
- PARKER D.J., « Floodplain development policy in England and Wales », *Applied Geography*, vol. 15, n° 4, 1995, p. 341-363.
- PARKER D.J. (dir.), *Floods*, London, Routledge, 2 vol., 2000, 748 p.

- PASKOFF R., *Le Changement climatique et les espaces côtiers. L'élévation du niveau de la mer : risques et réponses Mission interministérielle de l'effet de serre*, Actes du colloque d'Arles, 12 et 13 octobre 2000, La Documentation française, 2001, 98 p.
- PAULET J.P., *Les Représentations mentales en géographie*, Paris, Anthropos, 2002, 152 p.
- PAYRASTRE O., *Faisabilité et utilité du recueil de données historiques pour l'étude des crues extrêmes de petits cours d'eau, étude de cas de quatre bassins versants affluents de l'Aude*, thèse ENPC, Champs sur Marne, 2005, 392 p.
- PEGUY C. P., *Jeux et enjeux du climat*, Paris, Masson, 1989, 255 p.
- PEGUY C. P., *Espace, temps, complexité ; vers une métagéographie*, Belin, Reclus, 2001, 283 p.
- PELLETIER P., « Le Japon sans risques ? », in VEYRET Y. (dir.), *Les Risques*, Paris, Sedes, 2003, 161 p.
- PELLING M., « What Determines Vulnerability to Floods: a Case Study in Georgetown », Guyana, *Environment and Urbanization*, vol. 9, n° 1, p. 203-226.
- PELLING M., *The vulnerability of cities. Natural disaster and social resilience*, Earthscan Publications Ltd., 2003, 256 p.
- PELTIER A., *La Gestion des risques naturels dans les montagnes d'Europe occidentale. Étude comparative du Valais (Suisse), de la vallée d'Aoste (Italie) et des Hautes-Pyrénées (France)*, Thèse de doctorat de géographie, Toulouse II le Mirail, Geode, UMR 5602, CNRS, 2 vol., 2005, 741 p.
- PERETTI-WATELL P., *La Société du risque*, La Découverte, « Repères », 2001, 124 p.
- PHILIP H., BOUSQUET J.-C., MASSON F., *Séismes et risques sismiques. Approche sismotectonique*, Paris, Dunod, « Sciences SUP », 2007, 340 p.
- PICON B., *L'Espace et le temps en Camargue*, Actes Sud, 1988, 232 p.
- PICON B., ALLARD P., CLAEYS-MEKDADE C., KILLIAN S., *Gestion du risque inondation et changement social dans le delta du Rhône. Les catastrophes de 1856 et 1993-1994*, Cemagref, Éditions Quae, 2006, 124 p.
- PIGEON P., « Évaluation des politiques de gestion des risques naturels », in VEYRET Y., GARRY G., MESCHINET DE RICHEMOND N., *Risques naturels et aménagement en Europe*, Paris, Armand Colin, 2004, p. 72-75.
- PIGEON P., *Géographie critique des risques*, Éditions Economica, 2005, 217 p.
- PIGEON P., *L'Environnement au défi de l'urbanisation*, Rennes, PUR, « Espace et territoires », 2007, 189 p.
- POTTIER N., *L'Utilisation des outils juridiques de prévention des risques d'inondation : évaluation des effets sur l'homme et l'occupation des sols dans les plaines alluviales (application à la Saône et à la Marne)*, Thèse de doctorat, CERREVE, École des ponts et chaussées, 1988, 436 p.

- POTTIER N., RELIANT C., HUBERT G. ET VEYRET Y., « Les plans de prévention des risques naturels à l'épreuve du temps : prouesses et déboires d'une procédure réglementaire », *Annales des Ponts et Chaussées*, vol. 105, 2003, p. 40-48.
- POURSOULIS G., DALONGEVILLE R., HELLY B., « Destruction des édifices minoëns et sismicité récurrente en Crète (Grèce) », *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, n° 4, 2000, p. 253-265.
- QUARANTELLI E.L. (dir.), *What is a Disaster? Perspectives on the Question*, London, Routledge, 1998, 312 p.
- REGHEZZA M., *Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine : la métropole parisienne face au risque de crue centennale*, Thèse de doctorat de géographie, Université Paris X Nanterre, 2006, 382 p.
- RENARD B., *Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France*, Thèse INP Grenoble, Lyon, Cemagref, 20 septembre 2006, 361 p.
- RIBAS-PALOM A., « La géographie française et le risque inondation de la géographie physique à la géographie humaine », *Cahiers de géographie du Québec*, vol. 38, n° 103, 1994, p. 7-20.
- Rousseau J.-J., « Lettre à M. de Voltaire (18 août 1756) », in *Œuvres complètes*, tome IV, Paris, Gallimard, « Bibliothèque de la Pléiade », 1969, p 1108 sq.
- SAURI-PUJOL D., ROSET-PAGE D., RIBAS-PALOM A., PUJOL-CAUSSA P., « The "Escalator Effect" in Flood Policy: the Case of the Costa Brava », Catalonia, Spain, *Applied geography*, 2vol. 1, 2001, p. 127-143.
- SCHOENEICH P., « Risques naturels, espace vécu et représentations : le nécessaire décodage de la mémoire » in FAVIER R. et GRANET-ABISSET A.M. (dir.), *Histoire et mémoire des risques naturels*, Grenoble, MSH-Alpes, 2000, p. 249-270.
- SIERRA A., « Espaces à risque et marges : méthodes d'approche des vulnérabilités urbaines à Lima et Quito », *Cybergéo, Vulnérabilités urbaines au sud*, article n° 456, 2009, <http://www.cybergegeo.eu/index22232.html>.
- SIRVEN N., « De la pauvreté à la vulnérabilité : Évolutions conceptuelles et méthodologiques », *Monde en développement*, vol. 4, n° 140, 2007, p. 9-24.
- SOUTADE G., *Les Inondations d'octobre 1940 dans les Pyrénées-Orientales*, Conseil général, Direction des archives départementales, Perpignan, 1993, 351 p.
- , *Les Tremblements de terre dans les Pyrénées-Orientales et en Catalogne. De l'imaginaire au réel*, Perpignan, Éditions du Trabucaire, 1998, 263 p.
- SRI HADMOKO D., *Les Mouvements de versant dans les monts Menoreh, Java, Indonésie : variabilité spatio-temporelle, impacts, déclenchement, et analyse de la susceptibilité*, Thèse de doctorat, Université Paris 1, 2009, 284 p.

- THOURET J.-C., LEONE F., « Aléas, vulnérabilités et gestion des risques naturels », in MORINIAUX V. (dir.), *Questions de géographie. Les risques*, Paris, Éditions du Temps, 2003, p. 37-70.
- THOURET J.-C., « Aléas et risques volcaniques », *Annales de géographie*, n° 627-628, 1999, p. 503-523.
- , « Aléas et risques volcaniques : comprendre pour prévoir et mieux gérer pour durer », *Annales de géographie*, n° 627-628, 2002, p. 503-523 (http://www.armand-colin.com/revues_article_info.php?idr=5&idnum=289178&idart=2475).
- THOURET J.-C., D'ERCOLE R., « Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales », *Cahiers des Sciences Humaines*, vol. 32, n° 2, 1996, p. 407-422.
- THOURET J.-C., D'ERCOLE R., DOLLFUS O., ASTE J.-P. (dir.), « Croissance urbaine et risques naturels dans les montagnes des pays en voie de développement », *Revue de géographie alpine*, numéro spécial, t. 82, n° 4, 1994.
- ULLMANN A., *Surcotes dans le Golfe du Lion et conditions atmosphériques : variabilité contemporaine et future (1905-2100)*, Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille I., 2008, 250 p.
- VASSALO N., « La monarchie de la maison de Savoie face aux catastrophes naturelles : les "atti di visita" pour les ravinements et tempêtes », in Favier R. (dir.), *Les pouvoirs publics face aux risques naturels dans l'histoire*, Grenoble, CNRS. MSH, 2002, p. 105-129.
- VEYRET Y. (dir.), *Géographie des risques naturels*, dossier n° 8023, La Documentation française, « Documentation Photographique », 2001, 64 p. (avec diapositives et transparents).
- , *Les Risques*, Paris, Sedes, 2003, 252 p.
- VEYRET Y., *Gestion des risques naturels en France. De l'aléa à la gestion*, Paris, Hatier, « Initial », 2004, 251 p.
- VEYRET Y., BEUCHER S., BONNARD J.-Y., « Risques naturels et territoires », *Bulletin de l'Association des géographes français*, vol. 82, n° 1, 2005, p. 63-74.
- Vie le Sage R., *La Terre en otage*, Paris, Seuil, 1989.
- VINET F., *Le Risque-grêle en agriculture*, Lavoisier-Tec & Doc, 2000, 258 p.
- , *Crués et inondations dans la France méditerranéenne. Les crués torrentielles des 12 et 13 novembre 1999 (Aude, Tarn, Pyrénées Orientales et Hérault)*, Nantes, Éditions du Temps, 2003, 224 p.
- , *Le risque inondation. Diagnostic et gestion*, Éditions Lavoisier Tec & Doc, 2010, 328 p.
- VINET F., MESCHINET DE RICHEMOND N., « Territoires et acteurs du risque d'inondation torrentielle en France méditerranéenne », *Bulletin de l'Association des géographes français*, n° 1, 2005, p. 116-126.
- VOLTAIRE, *Poème sur le désastre de Lisbonne*, 1756.
http://www.voltaire-integral.com/Html/09/13_Lisbonne.html.

Voir aussi <http://www.site-magister.com/volrous2.htm>.

WACKERMANN G. (dir.), *La Géographie des risques dans le monde*, Paris, Ellipses, 2005, 501 p.

WHITE P., PELLING M., SEN K., SEDDON D., RUSSELL S., FEW R., « Disaster Risk Reduction. A Development Concern », London, DFID, 2005.

WISNER B, BLAIKIE P, CANNON T, DAVIS I., *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters*, London, Routledge, 2004, 134 p.

WISNER B., LUCE H.R., « Disaster Vulnerability: Scale, Power, and Daily Life », *Geojournal*, vol. 30, n° 2, 1993, p. 127-140.

Figure 7

Synthèse graphique de la vulnérabilité humaine face à trois menaces naturelles majeures en Martinique

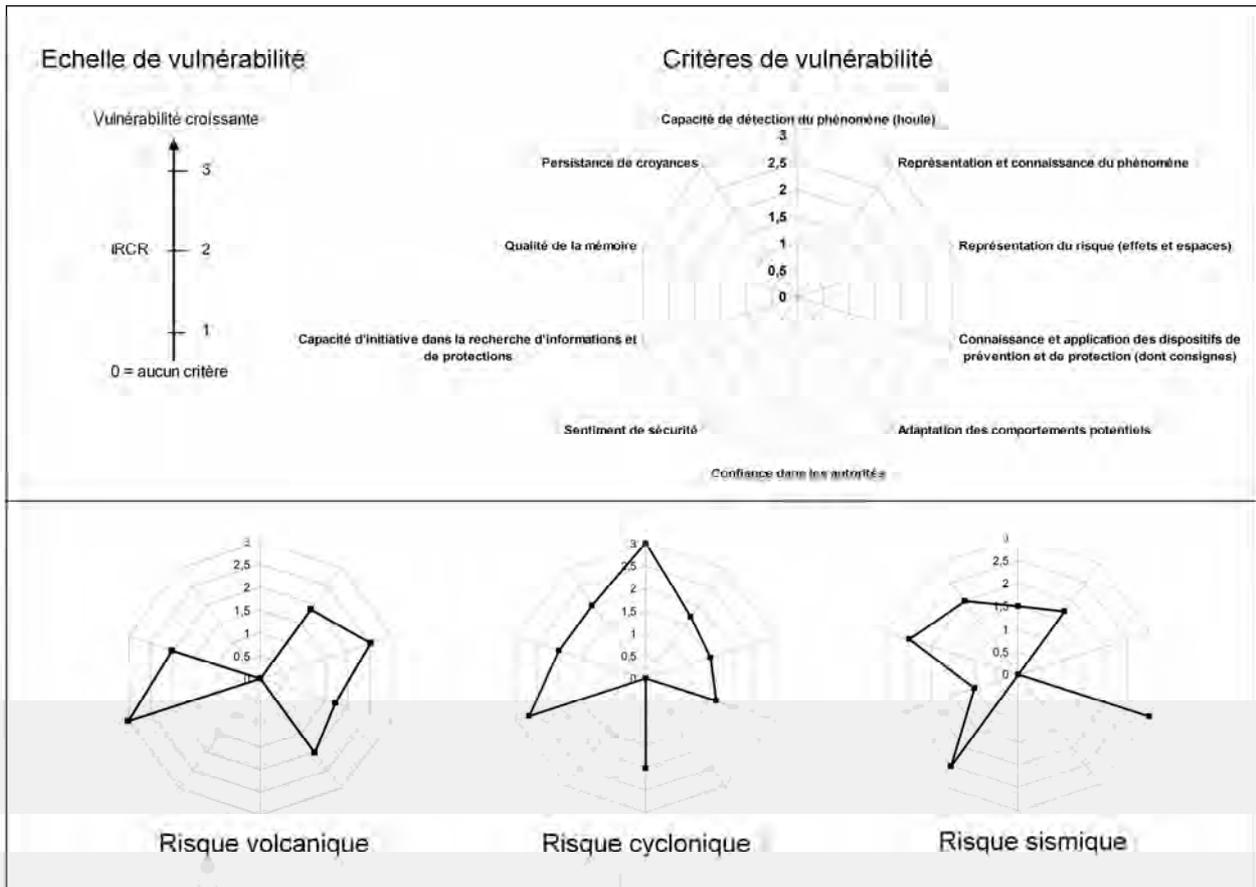


Figure 11

Les 1 521 volcans actifs et émergés du globe

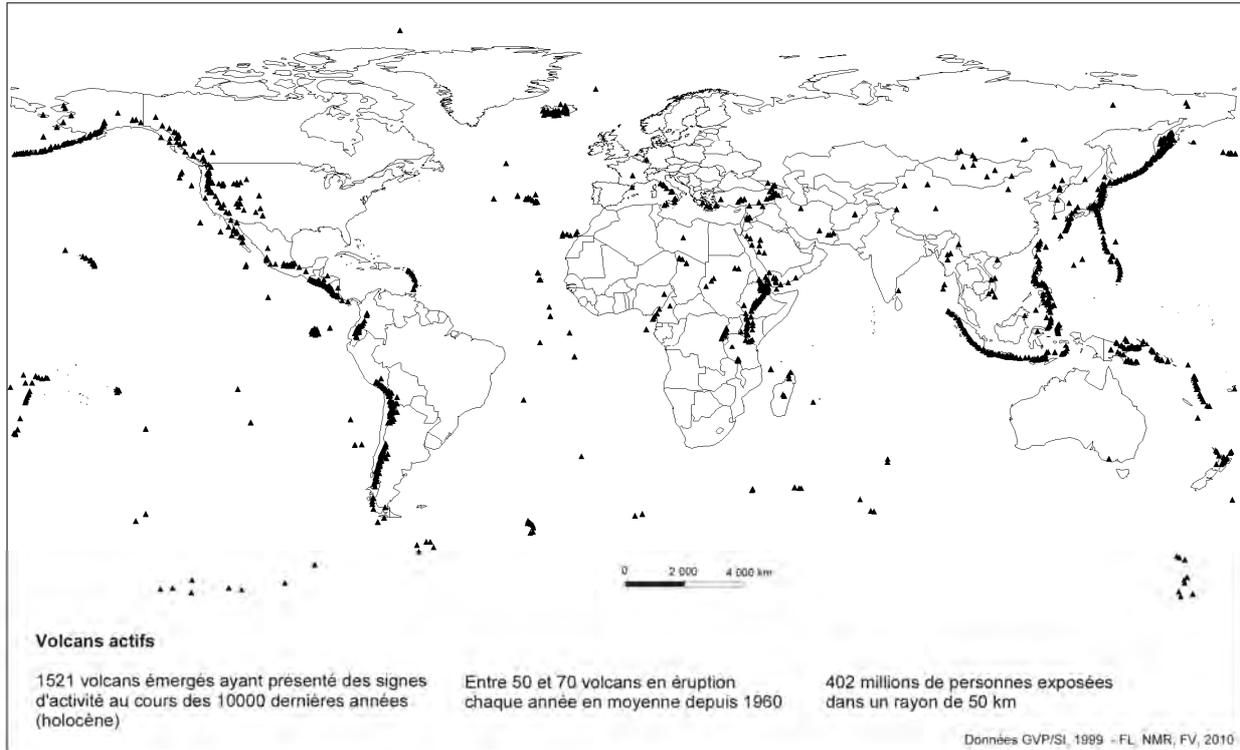


Figure 13
Répartition mondiale des séismes sur 30 ans (1979-2008)

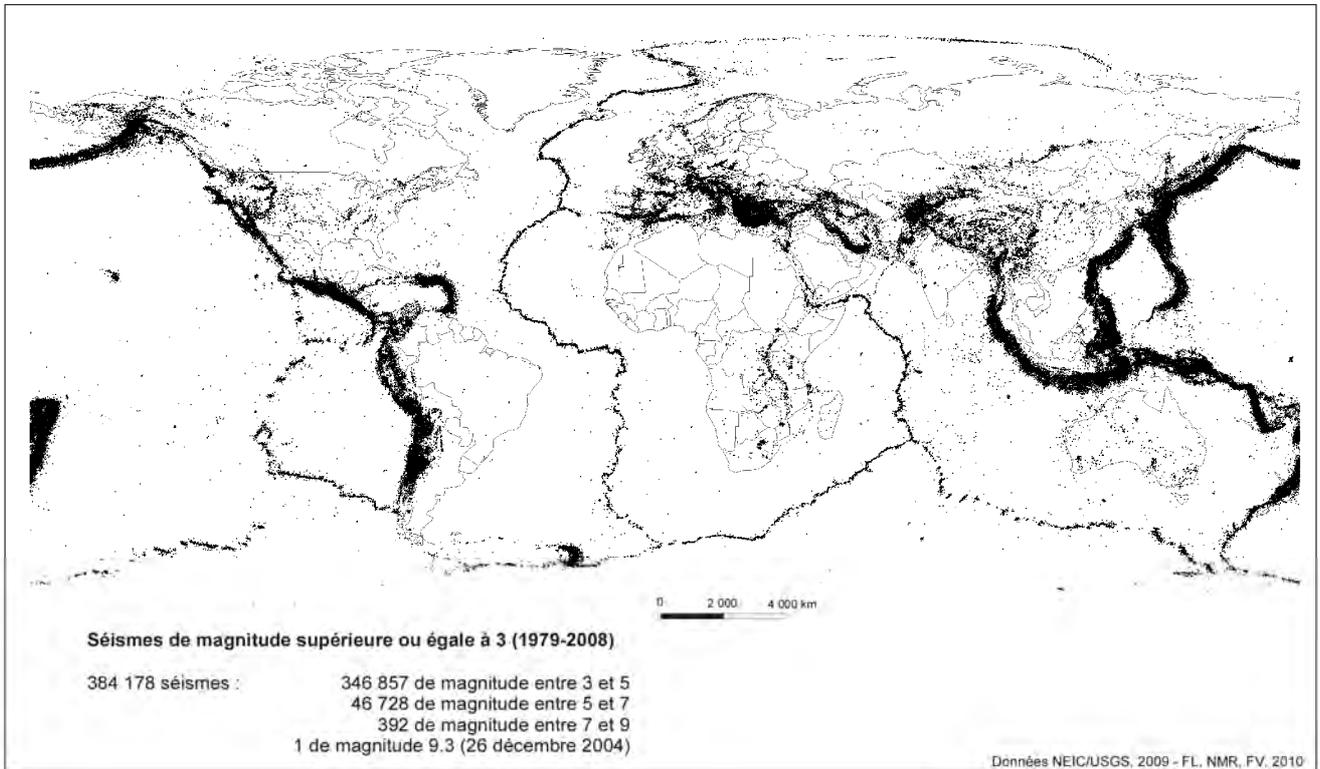


Figure 20

Courbe hauteur/débit au pont romain de Sommières sur le Vidourle

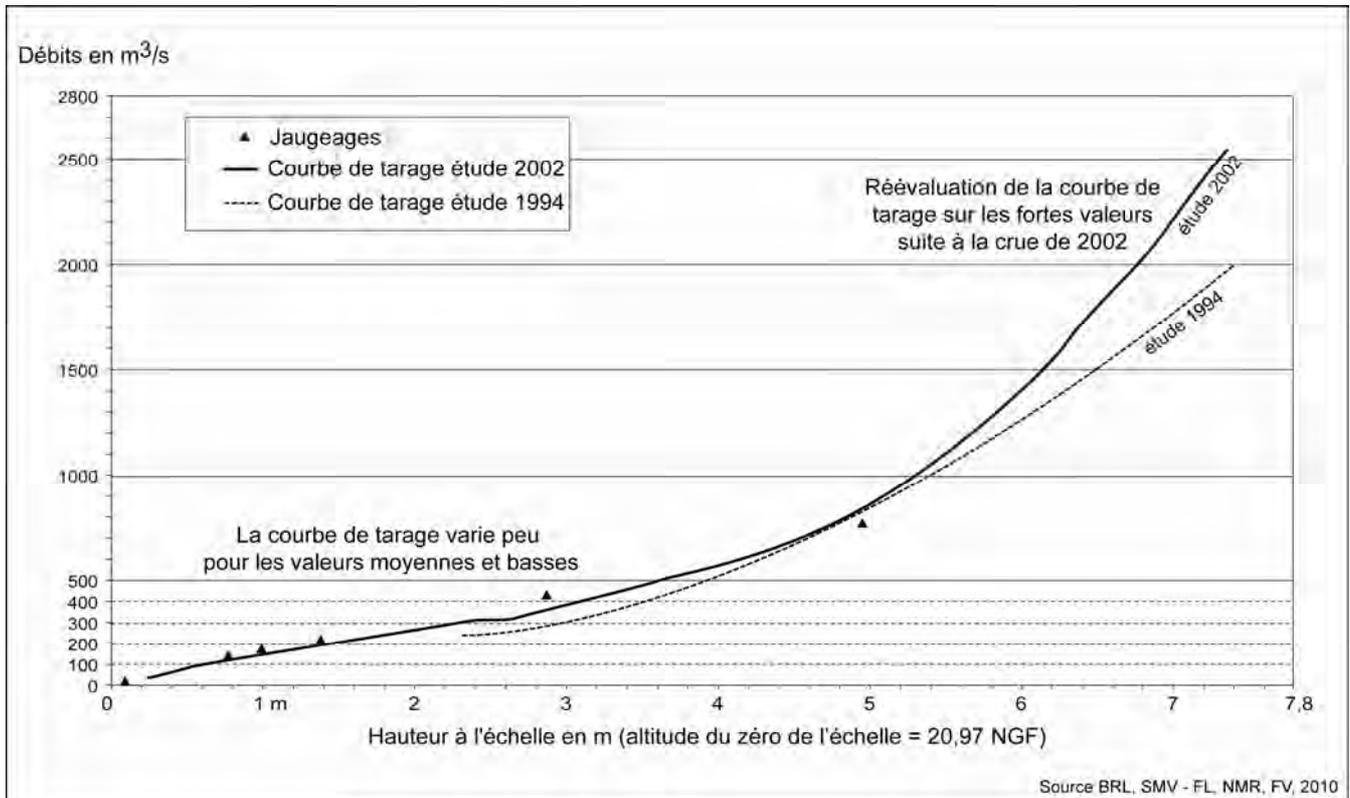


Figure 23

Précipitations et crues dans le bassin du Vistre en septembre 2005

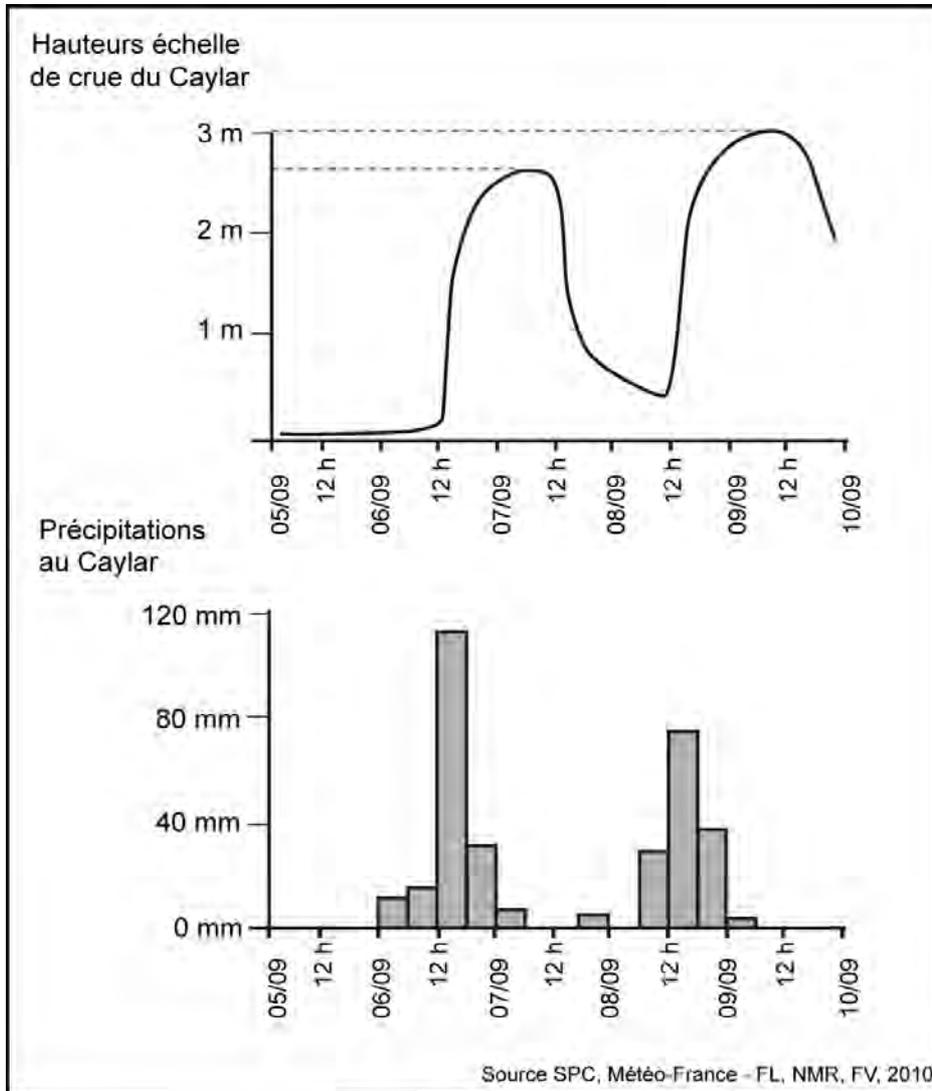


Figure 24

Nombre de morts liés aux feux de forêts dans le monde sur 30 ans (1979 à 2008)

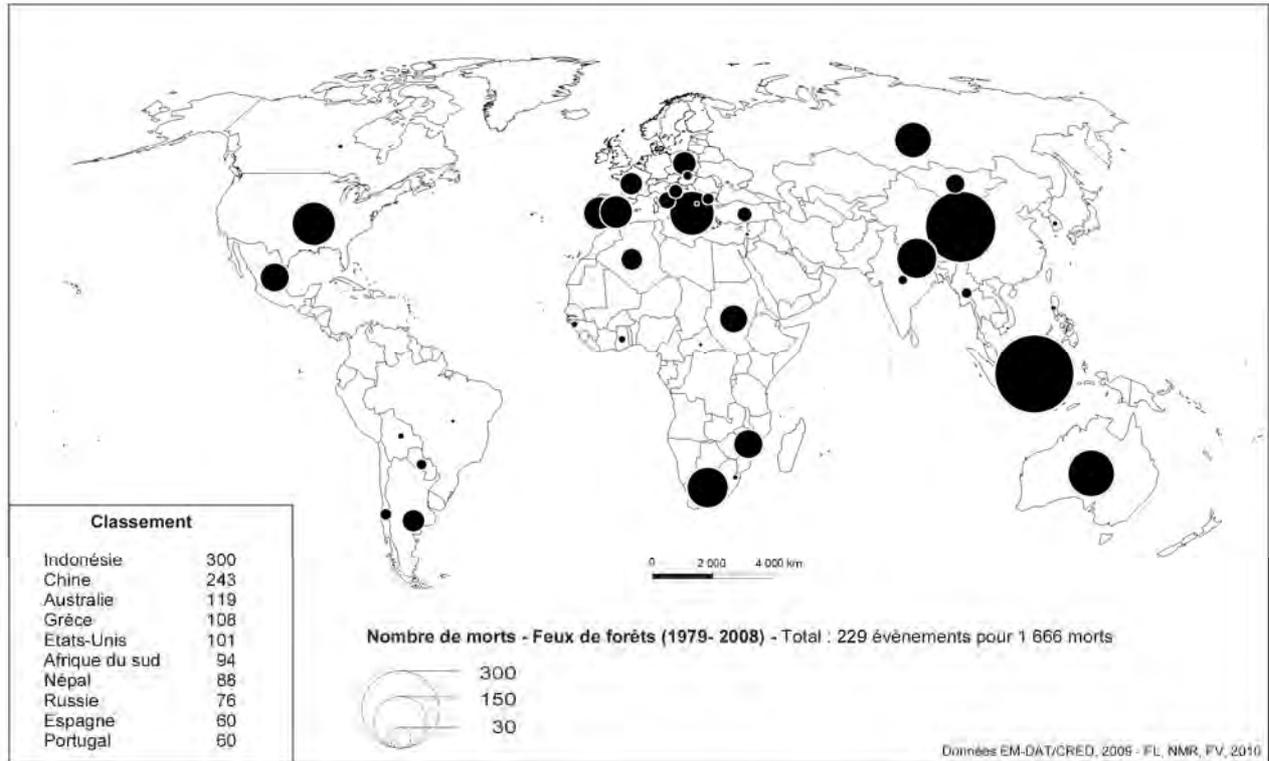
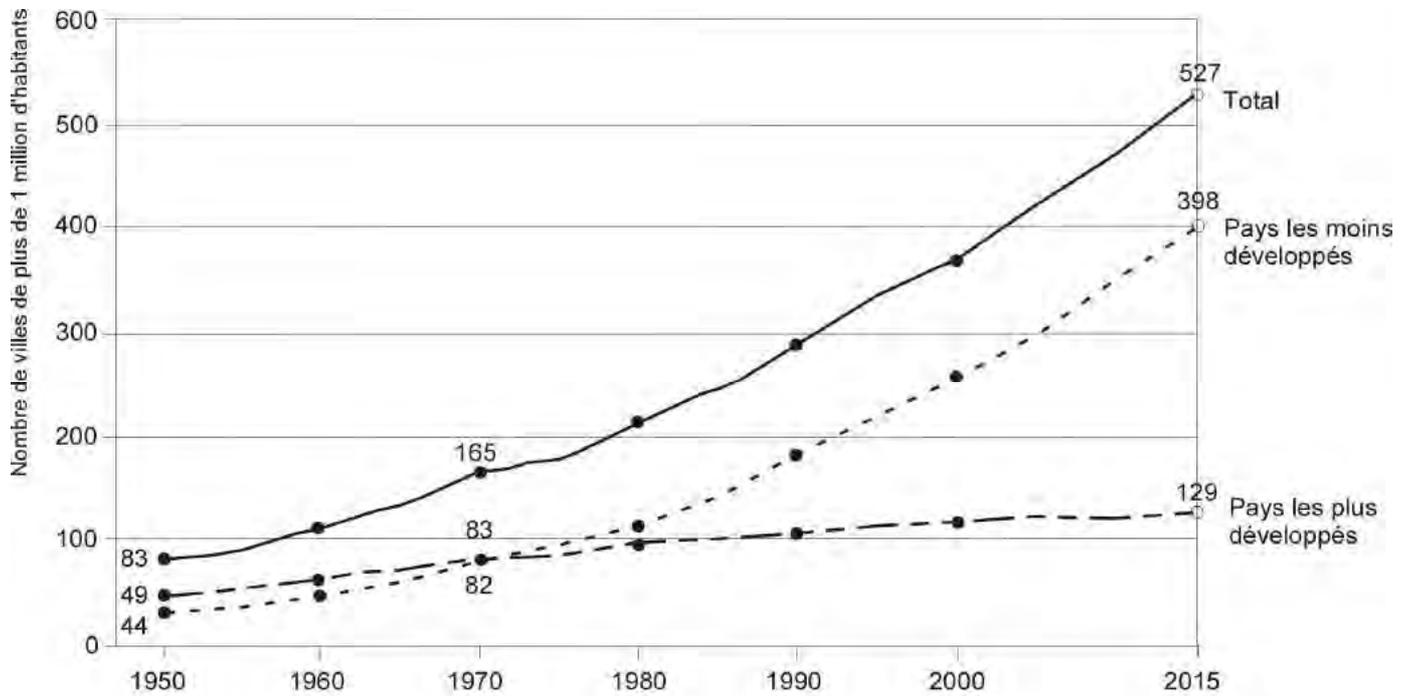


Figure 29

Évolution comparée du nombre de villes de plus d'un million d'habitants dans le monde depuis 1950 et projections pour 2015



Modifié d'après Nations Unies/DHA, 2002 - FL, NMR, FV, 2010

Figure 34

Évolution des pertes en cas d'inondation, avec ou sans protection

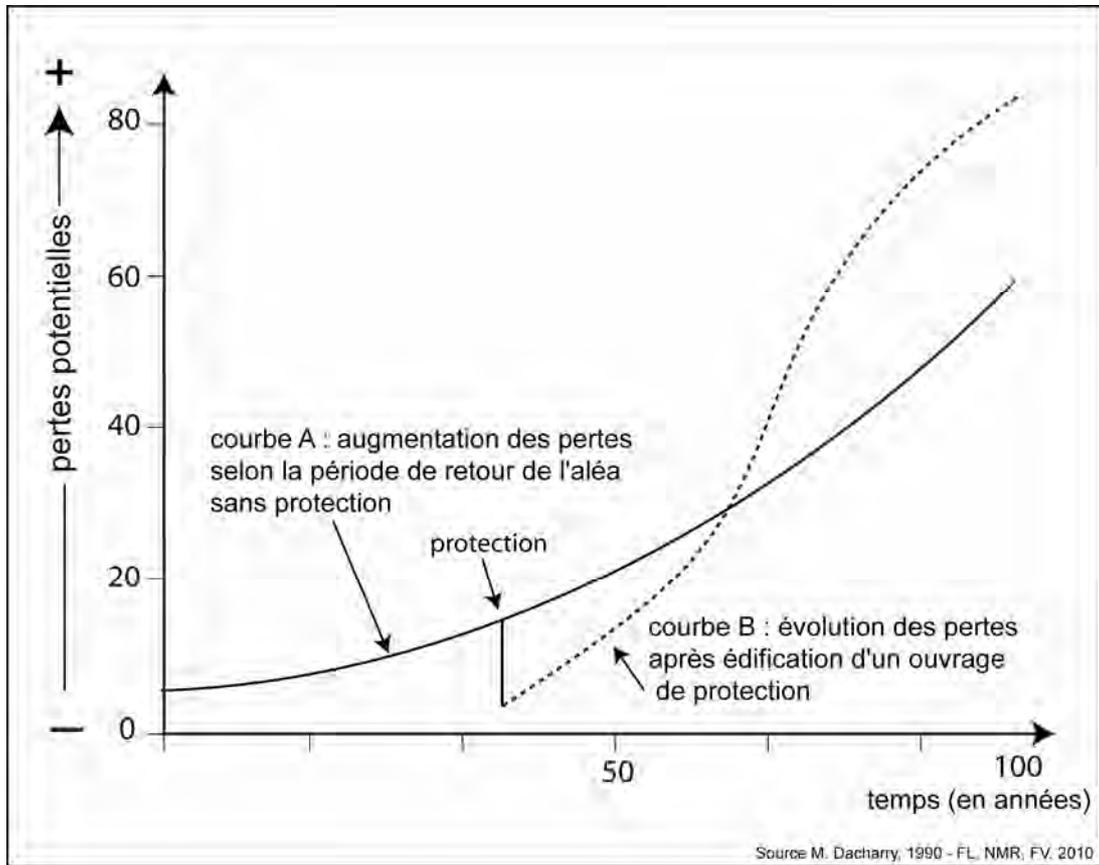


Figure 36

Principales règles de construction parasismique préconisées pour les maisons individuelles

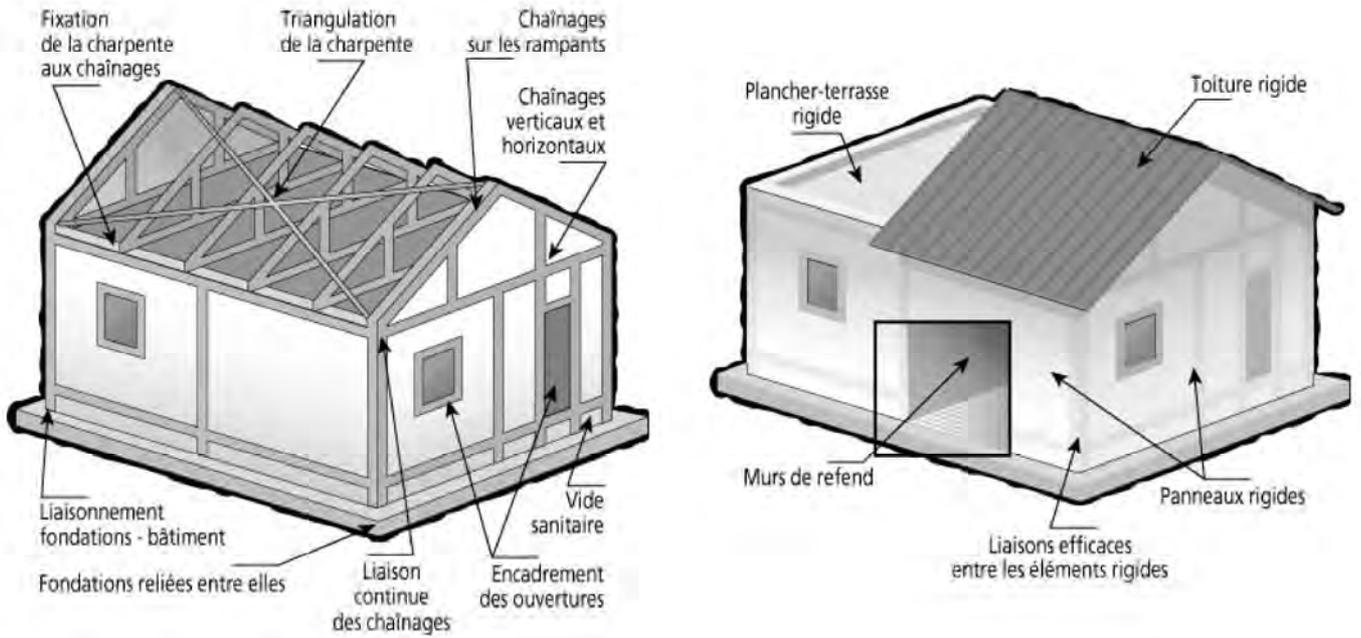


Tableau 1

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

Aléa	Appellation	Critères principaux	Nombre de niveaux	Source principale
Échelles de magnitude pure (paramètres physiques)				
Séismes	Échelle de magnitude locale (MI) de Richter et variante Gutenberg (MS)	Amplitude maximale des ondes de surface	ouverte	Richter, 1935 ; Gutenberg & Richter, 1936 ; Gutenberg, 1945
	Échelle de magnitude des ondes de volume (Mb) de Gutenberg et Richter	Amplitude maximale des ondes de volume	ouverte	Gutenberg & Richter, 1956
	Échelle de magnitude de moment de Kanamori (Mw)	Moment sismique	ouverte	Kanamori, 1977
Vents forts	Échelle 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
	Échelle de Douglas (état de la mer)	Hauteur moyenne des vagues	10	http://www.wmo.ch
	Échelle de TORRO (T-scale) (tornades)	Vitesse du vent	12	http://www.torro.org.uk
	Échelle Australienne (cyclones tropicaux)	Vitesse maximale du vent (3 secondes)	5	Crowder, 1995
Tsunami	Échelle de Iida	Hauteur maximale du runup	7	Iida, 1963
	Échelle de Murty & Loomis	Énergie potentielle	?	Murty & Loomis, 1980
	Échelle d'Hatori	Amplitude de l'onde et distance du séisme	?	Hatori, 1986
	Échelle d'Abe	Amplitude de l'onde et distance du séisme	?	Abe, 1981
Grêle	Échelle de TORRO (grêle)	Diamètre des grêlons et dommages	11	Webb et al, 2001 et http://www.torro.org.uk
Mouvements de terrain	Échelles de Leone (tous types de mouvements)	Multicritères	variable	Leone, 1996
	Échelle de Mouroux et al. (gonflement-retrait)	Mouvement différentiel unitaire	?	Mouroux et al, 1988
Éruption volcanique	Indice d'explosivité volcanique (VEI)	Volume des tephra et hauteur du panache éruptif	9	Newhall & Self, 1982
Impact de météorite	Échelle de Turin	Énergie cinétique et probabilité de collision	10	Binzel, 1999 et 2004

Échelles mixtes (paramètres physiques et dommages)

Vents forts	Échelle de Fujita (tornades)	Vitesse moyenne du vent à 10 m de hauteur et dommages	13 (6 utilisés)	Fujita, 1981
	Échelle 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
	Échelle de Saffir-Simpson (cyclones)	Vitesse moyenne du vent et dommages	5	Simpson et al, 1981
Avalanche	Échelle d'intensité des avalanches	Divers critères physiques et dommages sur les infrastructures	?	http://www.anena.org
Incendie de forêt	Échelle du CEMAGREF	Vitesse de progression et dommages divers	6	http://www.cemagref.fr
Multi-aléas	Échelles du MEDD	Paramètres physiques et dommages divers	5	GSC et al., 2002 et Chiroiu, 2004

Échelles d'intensité pure (dommages)

Séismes	Échelle Mercalli modifiée (MM)	Dommages divers dont dommages aux bâtiments	12	Wood & Neumann, 1931
	Échelle Medvedev-Sponheuer-Karnik (MSK)	Dommages divers dont dommages aux bâtiments	12	Sponheuer et al, 1964
	Échelle Macrosismique Européenne (EMS-98)	Dommages divers dont dommages aux bâtiments	12 (5 pour bâti)	Grünthal, 1998
	Échelle Japan Meteorological Agency (JMA ou Shindo)	Dommages divers dont dommages aux bâtiments	7	http://www.jma.go.jp
	Échelle HAZUS	Dommages aux infrastructures, aux réseaux et aux personnes	variable	FEMA, 1999
	Échelle de Rossi-Forel	Dommages divers dont dommages aux bâtiments	10	Tiedemann, 1992
Vents forts	Échelle de Leicester et al.	Dommages aux bâtiments résidentiels	10	Leicester & Reardon G, 1976
Tsunami	Échelle "macro-tsunami" de Leone	Dommages aux bâtiments	6	Leone et al, 2007
	Échelle de Sieberg	Dommages divers	6	Sieberg, 1927
	Échelle de Soloviev	Dommages divers	7	Soloviev, 1970
	Échelle d'Ambraseys	Dommages divers	6	Ambraseys, 1962
	Échelle de Shuto	Dommages divers	?	Shuto, 1991
	Échelle de Papadopoulos & Imamura	Dommages divers	12	Papadopoulos & Imamura, 2001
Mouvements de terrain	Échelle de Leone (tous types de mouvements)	Dommages aux bâtiments, réseaux, biens, fonctions et personnes	variable	Leone, 1996

	Échelle DRM (tous types de mouvements)	Dommages aux bâtiments	5	DRM, 1990
	Échelle du NHRC (glissements)	Dommages aux bâtiments	?	NHRC, 1999
	Échelle du BRED (subsidence)	Dommages aux murs	6	BRED, 1981
	Échelle de Mouroux et al. (gonflement-retrait)	Dommages aux bâtiments	?	Mouroux et al, 1988
	Échelle d'Alexander (glissements de terrain)	Dommages aux bâtiments	7	Alexander, 1988
	Échelle de Zihri (effondrement de cavités)	Dommages divers (multi-dimensionnelle)	variable	Zihri, 2004
Éruption volcanique	Échelle de Baxter et al. (coulées pyroclastiques, Montserrat)	Dommages aux bâtiments	6	Baxter et al., 2005
	Échelle 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

FL, NMR, FV, 2010

Tableau 2

Exemples de facteurs et critères de vulnérabilité pour différents types d'enjeu
en vue d'un diagnostic

Enjeux vulnérables	Principaux critères de vulnérabilité	Type de facteur
Personnes (ex. d'un individu) <i>(vulnérabilité humaine)</i>	Représentations du risque (menaces, effets, espaces) Comportements potentiels Connaissance des mesures de protection et de prévention Vécu Résistance physique et mentale Confiance dans les autorités Implantation géographique et la distance au danger Accessibilité Possibilité de fuite Niveau de protection physique	Psycho-sociologique Psycho-sociologique Psycho-sociologique Psycho-sociologique Physiologique et psycho-sociologique Psycho-sociologique Géographique Géographique Géographique Physique
Communauté (ex. d'une minorité ethnique) <i>(vulnérabilité sociale)</i>	Cohésion sociale et solidarité Marginalisation Niveau d'organisation et de préparation Entretien de la mémoire collective Conscience du risque Niveau de corruption Pauvreté Dépendance économique Ségrégation socio-spatiale Continuité des actions Spéculation foncière Accès aux services Niveau d'éducation Poids des traditions Représentation institutionnelle	Socio-culturel Socio-économique Institutionnel et organisationnel Socio-culturel et institutionnel Psycho-sociologique Socio-économique et institutionnel Socio-économique Socio-économique Géographique et socio-économique Politico-administratif Economique Socio-économique Socio-économique Socio-culturel Institutionnel
Infrastructures et biens (ex. bâtiments) <i>(vulnérabilité structurelle ou physique)</i>	Résistance physique Distance au danger Entretien et contrôle	Physique Géographique Politico-administratif
Réseau (ex. d'un réseau routier) <i>(vulnérabilité fonctionnelle)</i>	Résistance physique Alternative de fonctionnement (connexité) Capacité de contrôle Dépendance	Physique Géographique Organisationnel Géographique
Un système territorial (ex. d'une île) <i>(vulnérabilité territoriale)</i>	Taille Isolement géographique (enclavement) Possibilité d'alternatives (ressources et équipements vitaux) Exposition au danger Niveau de dépendances entre les réseaux vitaux Croissance urbaine Mobilité géographique Coopération régionale Outils de régulation de l'occupation du sol	Géographique Géographique Géographique et socio-économique Géographique Géographique et organisationnel Socio-économique et géographique Socio-économique et géographique Institutionnel Institutionnel

Tableau 5

Critères de classification des catastrophes naturelles retenus par la société Munich Réassurance (2009)

Critères retenus par Munich Réassurance (un ou plusieurs)	Catégorie 1 : <i>Small-scale loss event</i>	Catégorie 2 : <i>Moderate loss event</i>	Catégorie 3 : <i>Severe catastrophe</i>	Catégorie 4 : <i>Major catastrophe</i>	Catégorie 5 : <i>Devastating catastrophe</i>	Catégorie 6 : <i>Great natural catastrophe</i>
Morts	1 à 9	10 à 19	Plus de 20	Plus de 100	Plus de 500	Des milliers
Blessés	...	...	...	...	...	...
Sinistrés/sans-abris	...	...	...	...	...	Des centaines de milliers
Dommages/coût (US \$, valeur 2008)	Mineurs, échelle ponctuelle	Dommages au bâti et autres biens	Pertes totales > 50 millions de \$ (US)	Pertes totales > 200 millions de \$ (US)	Pertes totales > 500 millions de \$ (US)	Pertes totales exceptionnelles et pertes aux biens assurés considérables
Gestion	...	...	...	...	...	Demande d'assistance à l'échelle nationale ou internationale

Tableau 7

Typologie du bâti (classes de vulnérabilité) adaptée à l'analyse des dommages en cas de tsunami (Indonésie)

Critères d'identification 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		

Famille	Type de carte	Exemple de carte	Échelle	Famille d'usage	Producteur de la carte
Cartes d'aléa s.l.	Carte de localisation des phénomènes historiques	Carte de localisation des phénomènes avalanches (CLPA)	1/25 000	Informatif et scientifique	Cemagref
	Carte de facteurs d'aléas	Carte mondiale des failles actives (carte sismotectonique)	1/25 000 000	Scientifique	Commission de la carte géologique du Monde
	Carte de susceptibilité (phénomène)	Carte de susceptibilité au retrait-gonflement des argiles	1/50 000	Informatif	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
	Carte d'aléa probabiliste	Zonage sismique de la France	1/10 000 000	Réglementaire	Ministère de l'environnement
	Carte d'aléa déterministe	Atlas hydrogéomorphologiques régional de zones inondables (région LR)	1/10 000 à 1/25 000	Informatif	Direction régional de l'Environnement LR
Cartes d'enjeux d'exposition	(ou) Carte d'enjeux humains	Carte de la population communale en zone inondable en Languedoc-Roussillon	1/2 500 000	Informatif	Direction régional de l'Environnement LR
	Carte d'enjeux fonctionnels	Carte de hiérarchisation fonctionnelle des éléments du système d'alimentation en eau potable de la ville de Quito (Équateur)	1/400 000	Opérationnel	Municipalité de Quito / IRD
	Carte d'enjeux économiques	Carte des activités économiques (entreprises) en zone inondable dans la vallée de l'Orb	1/25 000	Informatif	Syndicat Mixte de la Vallée de l'Orb (SMVO) & Master GCRN
Cartes de vulnérabilités (propension au dommage)	Carte de facteurs physiques de vulnérabilité	Carte de classification du bâti en fonction de sa sensibilité aux séismes (ville de Nice)	1/50 000	Opérationnel	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
	Carte de facteurs humains de vulnérabilité	Carte intégrée des facteurs de vulnérabilité de la population exposée au volcan Cotopaxi (Équateur)	1/200 000	Opérationnel	Thèse R. D'Ercole (IFEA)
	Carte de facteurs fonctionnels de vulnérabilité	Carte du niveau de réduction possible de l'accessibilité du DMQ (Quito) en cas de perte des éléments clefs du réseau routier	1/400 000	Scientifique et opérationnel	Thèse F. Demoraes
Cartes d'impacts (dommages constatés)	Carte d'impacts humains	Carte des victimes d'inondation dans le Sud de la France	1/50 000	Informatif	Laboratoire GESTER/UM3
	Carte d'impacts matériels	Carte du niveau d'endommagement des résidences de la Nouvelle Orléans suite au cyclone Katrina	1/5 000	Opérationnel	City of New Orleans
	Carte d'impacts fonctionnels (dysfonctionnements)	Carte des foyers privés d'électricité après la tempête de février 2009	1/10 000 000	Informatif	ERDF / météo France
	Carte d'impacts économiques	Carte annuelle des catastrophes naturelles les plus coûteuses dans le monde	1/50 000 000	Informatif	Assurances Munich RE
Cartes de risque (impacts potentiels)	Carte de risque multi-critère (indices)	Carte de l'indice de risque sismique des villes méditerranéennes	1/1 000 000	Scientifique	Laboratoire GESTER/UM3
	Carte d'exposition au risque *	Carte des populations exposées à de la submersion marine en méditerranée occidentale	1/500 000	Scientifique	Laboratoire GESTER/UM3 et Association Arc latin
	Carte de pertes et dommages potentiels**	Carte de simulation des pertes économiques liées aux destructions de résidences du Conté d'Harris (Texas, USA) en cas de cyclone	1/250 000	Informatif	Agence fédérale des situations d'urgence (FEMA), USA
	Carte de dysfonctionnement potentiel**	Carte d'impact de la rupture d'une station sur l'ensemble du réseau de métro parisien	1/200 000	Opérationnel	Thèse J.F. Gleyze
Cartes mentales***	Carte de perception des espaces menacés ***	Carte du niveau de perception collective des zones exposées à une future éruption de la montagne Pelée (Martinique)	1/100 000	Scientifique	Laboratoire GESTER/UM3
	Carte de comportements potentiels***	Carte de perception des itinéraires d'évacuation privilégiés en cas de lahars sur les flancs du mont Pinatubo (Philippines)	1/40 000	Scientifique	Gaillard et al.
Cartes de prévention	Carte de maîtrise de l'occupation du sol	Zonage réglementaire de type PPR naturels	1/10 000	Opérationnel	Préfectures
	Carte de vigilance/alerte	Carte de vigilance crue	1/10 000 000	Informatif	Ministère de l'écologie, SCHAPI
	Carte de prévision des phénomènes	Carte de prévision des trajectoires cycloniques	1/20 000 000	Informatif et opérationnel	National Hurricane Center (NOAA, USA)
	Carte de simulation des dommages ****	Carte de prévision des dommages en cas de séisme	1/10 000 000	Opérationnel	WAPMERR.ORG
	Carte d'action/évacuation	Plan des itinéraires d'évacuation en cas de séisme au sein d'un établissement scolaire (PPMS)	1/1 000	Opérationnel	Rectorat de la Martinique
	Carte des mesures/moyens de protection/prévention	Carte d'action de certains plans communaux de sauvegarde (PCS)	1/10 000	Opérationnel	Société Prédic services

* L'exposition au risque peut être déduite de la position des éléments exposés sur une zone d'aléa. La quantification de ces enjeux permet aussi d'en déduire la risque encouru en terme de pertes potentielles (cf. carte d'enjeux ou d'exposition)

FL, NMR, FV, 2010

** Les cartes d'impacts potentiels sont établies pour des scénarios de référence

*** Une mauvaise perception des espaces menacés ou une mauvaise appréciation des itinéraires d'évacuation peuvent être considérés également comme des facteurs de vulnérabilité humaine (cf. carte de facteurs humains de vulnérabilité)

**** La simulation des dommages (scénarios) prend un caractère d'autant plus utile à l'aide à la décision lorsqu'elle est élaborée en temps réel ou à très courte échéance.

Tableau 8 — Typologie des principales familles de cartes relatives à l'évaluation et à la gestion des risques naturels

Tableau 10

Classification des dépressions tropicales et des cyclones selon leur intensité

Degré	Vitesse moyenne des vents	Surcote marine	Impacts potentiels
Dépression tropicale	< 17 m/s (63 km/h)	< 1 m	<ul style="list-style-type: none"> • Dommages légers.
Tempête tropicale	17 à 33 m/s (63 à 118 km/h)	Environ 1 m	<ul style="list-style-type: none"> • Dommages possibles aux réseaux filaires aériens • Dommages légers dans les jardins et les cultures
À partir d'une vitesse de vent moyen de 118 km/h, l'intensité du cyclone est classée en fonction des cinq degrés de l'échelle Saffir-Simpson.			
Classes	Vitesse moyenne des vents	Surcote marine	Impacts potentiels
1	33 à 42 m/s (118 à 153 km/h)	1,2 à 1,8 m	<ul style="list-style-type: none"> • Peu ou pas de dommages aux habitations. • Dommages limités aux maisons mobiles, à la végétation et aux panneaux de signalisation. • Inondations côtières • Dommages légers aux quais et jetées.
2	43 à 49 m/s (154 à 177 km/h)	1,8 à 2,7 m	<ul style="list-style-type: none"> • Dommages possibles aux toitures, portes et fenêtres des habitations. • Dommages importants aux maisons mobiles. • Les panneaux de signalisation sont arrachés. • Dommages importants à la végétation. Les petits arbres sont déracinés. • Les routes et les plaines basses sont inondées avant l'arrivée de l'ouragan. • Dommages importants aux quais et jetées. • Les petites embarcations sont arrachées de leurs amarres.
3	50 à 58 m/s (178 à 210 km/h)	2,7 à 4,0 m	<ul style="list-style-type: none"> • Dommages à la structure des bâtiments légers. • Caravanes et mobiles homes sont emportés. • Dommages importants à la végétation. Les grands arbres sont déracinés. • Inondations importantes sur les terrains côtiers. • Les habitations côtières sont endommagées par les vagues et les débris.
4	59 à 69 m/s (210 à 249 km/h)	4,0 à 5,5 mètres	<ul style="list-style-type: none"> • Dommages importants à la structure des bâtiments non-renforcés. • Dommages importants au rez-de-chaussée des habitations dus aux inondations. • Dommages importants aux cultures. • Érosion importante sur les plages.
5	Plus de 69 m/s (249 km/h)	Plus de 5,5 m	<ul style="list-style-type: none"> • Dommages importants à la végétation naturelle et destruction des cultures. • Destruction des toitures, des portes et des fenêtres. • Dommages importants aux charpentes des bâtiments renforcés. • Destruction des habitations légères.

Tableau 15
Complexité des niveaux de risques urbains métropolitains

Niveau	Aléa	Dommages	Evaluation économique	Vulnérabilités urbaines		
				Type de vulnérabilité	Facteurs physiques	Facteurs sociaux
1	Phénomène physique (éruption volcanique, inondation, mouvement de terrain...)	Dommages à une infrastructure (réseau routier, ferré, téléphonique, d'eau potable, aéroport, maison de retraite)	Coût direct lié au dommage matériel (réparation, remplacement)	Matérielle (susceptibilité à l'endommagement de l'espace urbain)	Exposition du réseau, vétusté, existence de protections pour ce réseau (étanchéité, réseau enterré, alimentation électrique de secours autonome)	Planification préventive du risque, moyens humains et matériels immédiatement disponibles, préparation et réactivité des acteurs locaux, nationaux
2	Dommages à une infrastructure (réseau routier, ferré, téléphonique, d'eau potable, aéroport, maison de retraite)	Dégradation de la trame relationnelle du réseau entraînant des perturbations y compris au-delà des limites de la ville (impossibilité de suivre un itinéraire antérieur, rallongement des temps de transports, interruption du service)	Coût de la réorganisation de la structure (à l'identique ou non)	Structurelle (susceptibilité du territoire urbain à propager l'endommagement matériel)	Taille du réseau, maillage (nœuds, chemins alternatifs ou doublés)	Capacité de mise en place de solutions de remplacement pour assurer la continuité du service, capacité d'adaptation à l'évolution des besoins
3	Dégradation de la trame relationnelle du réseau entraînant des perturbations (impossibilité de suivre un itinéraire antérieur, rallongement des temps de transports, interruption du service)	Conséquences directes et indirectes pour l'environnement urbain (manque de communication, de synergies entre acteurs, chômage technique, perte de clientèle, faillites d'entreprises)	Coût pour d'autres enjeux (y compris indirects et à long terme), coût de la perturbation ou de l'arrêt d'activité pour les entreprises et services utilisateurs, manque à gagner	Fonctionnelle (susceptibilité du territoire urbain à subir des perturbations fonctionnelles)	Durée de la perturbation, possibilité matérielle de continuer le service par d'autres moyens	Dépendance vis-à-vis du service, adaptabilité sociale des populations/clients

FL, NMR, FV, 2010

Source : d'après M. Reghezza, 2006, modifié.

Tableau 17
 Classement archivistique et type d'information
 sur les événements naturels dommageables en France

Types de sources	Nature/série	Informations utiles pour la gestion des risques
Archives départementales	Série C : administration provinciale d'Ancien Régime	Archives des intendances générales provinciales et des états dans lesquels on trouve nombre de demandes d'indemnisations et des cadastres anciens.
	Série F : fonds divers, archives anciennes, modernes et contemporaines	Dons et acquisitions, fonds d'archives privées (série close, on peut y trouver des photos et cartes postales anciennes, photos RTM).
	Série L : administration et tribunaux de la période révolutionnaire (1789-1800)	On peut y trouver des états de "secours pour pertes occasionnées par des accidents fortuits".
	Série M : administration générale, économie et politique (1800-1940)	Informations diverses dont police, santé publique, statistiques population, agriculture, eaux et forêts (Voir surtout sous-séries 1M et 7M pour les observations météo, états de pertes annuelles pour incendies, grêles et inondations, secours aux sinistrés).
	Série O : administration et comptabilité communale (1800-1940)	On peut y trouver des informations sur des travaux de réparation et leur coût, sur la voirie vicinale et l'urbanisme des villes. (en Haute Garonne, la sous-série 9 O donne des informations sur les cours d'eau non navigables).
	série P : finances, cadastres, poste, douanes, depuis 1800	Anciens plans cadastraux (mais peuvent aussi être dans d'autres séries, J notamment).
	Série S : travaux publics et transport (1800-1940)	Fonds versés par les Ponts-et-Chaussées, voies nationales et départementales, ponts, cours d'eau, données météo XIXe et XXe siècles.
	Série T : instruction publique, sciences et arts (1800-1940)	Archives, bibliothèques, musées, sociétés et académies savantes (en Haute Garonne, sous-série 5T : météo).
	Série Z : sous préfectures (1800-1940)	Informations diverses dont l'agriculture, la santé publique, les affaires militaires, la voirie et les canaux d'arrosage.
	Série J : fonds divers entrés depuis 1944.	Documents entrés par don, achat et dépôt depuis 1944 (on peut y trouver des plans cadastraux (Pyrénées-Orientales), papiers officiels et privés, fonds d'érudits divers).
Série W : versements postérieurs à 1940.	Documents en attente d'un classement définitif, plans cadastraux et versements récents de services techniques comme les DDE (dans les Pyrénées-Orientales, les dossiers de sinistrés des crues de 1940-1942 sont classés sous cette cote, par commune).	
Archives communales antérieures à 1790	Série CC : finances, impôts et comptabilité.	On peut y trouver des réductions d'impôts pour mauvaises récoltes.
	Série DD : Biens communaux, eaux et forêts, travaux publics, voirie.	Réparations routes, ponts, ports, édifices publics, exploitation de mines, incendies, inondations et sinistres divers.

	Série GG : culte, instruction publique, assistance publique.	On peut y trouver des informations sur les épidémies.
	Série II : documents divers.	On peut y trouver des cartes et plans.
Archives communales postérieures à 1790	Série D : administration générale de la commune.	On peut y trouver des informations sur l'urbanisme et sur les assurances, accidents, incendies.
	Série F : population, économie sociale, statistique.	On peut y trouver des statistiques agricoles et des observations météo.
	Série I : police, hygiène publique, justice, a.	On peut y trouver des informations sur les épidémies, sinistres divers (inondations, incendies, neige) et les secours.
	Série O : travaux publics, voirie, moyens de transport, régime des eaux.	Informations sur les rivières, canaux, digues, ports; associations et syndicats de cours d'eau ou canaux.
	Série Q : assistance et prévoyance.	On peut y trouver des informations sur des secours d'urgence.
	Série R : instruction publique, sciences, lettres et arts.	Académies et sociétés savantes, bibliothèques, musées et observatoires, sites classés.
Archives des SDIS	CRSS : compte rendu de sortie de secours	Centre de secours concerné, date et chronologie de l'intervention, lieux, causes, actions menées et moyens engagés, victimes et sinistrés...
Archives minières	DADT : dossier d'arrêt des travaux miniers (depuis 1980)	Dossier constitué par l'exploitant pour les services de l'État, avec un bilan des effets des travaux miniers sur l'environnement, y compris les risques et nuisances.
Archives de la direction de la climatologie de Météo-France	Base de données climatologiques françaises (BDCLIM)	Conservation et reconstitution de séries statistiques fiables et exploitables (sur les 2 derniers siècles)

Tableau 22

Acteurs et territoires d'action dans la gestion des risques naturels

Grandes familles d'acteurs	Type d'acteur	Échelles d'action	Exemples français ou étrangers	Action, rôle principal
Acteurs institutionnels		Échelle internationale	PNUD (programme des Nations unies pour le Développement), Communauté Européenne, FAO	
		Échelle nationale	État (ministères de l'Intérieur, de l'Équipement, de l'Agriculture, de l'Écologie et du Développement Durable, de la Recherche)	Prévention (connaissances des aléas, des vulnérabilités, information du public), protection, gestion de crise et organisation des secours, indemnisation et reconstruction
		Échelle régionale	Préfectures, DREAL (dir. régio. de l'envir., de l'aménagt et du logement), EPTB (établissement public territorial de bassin, ex : EPALA), SPC (services prévision crues)	Prévention, surveillance des aléas, protection, alerte, gestion de crise
		Échelle locale	Maire, élus français / Local Flood Defense Comittees (anglais)	Prévention, protection, gestion de crise (PCS) / gestion des protections locales contre les inondations.
Acteurs privés	Entreprises	Échelle internationale	bBanques et grandes entreprises internationales (Unilever, Boeing, IBM)	autoprotection, plan de gestion de crise, coopérations internationales
		Échelle nationale	EDF, SNCF / CFF suisses...	Autoprotection, plan de gestion de crise, parfois formation et astreinte des personnels
		Échelle régionale	RATP, entreprises de transport régionaux (RhB dans le canton suisse des Grisons)	Protection, plan de gestion de crise (formation et astreinte des personnels), scénarios
		Échelle locale	PME, musées	Selon secteurs d'activité, aide à la reconstruction, formation professionnelle à la mitigation
Acteurs scientifiques, techniques	Experts, universitaires	Échelle internationale	Nations unies (renforcer capacités de gestion des catastrophes par le financement de programmes d'aide au développement, la coopération internationale)	

		Échelle nationale	AFPS, ANENA, BRGM / US Geological Survey...	Prévention, REX, information, recherche fondamentale et appliquée	
		Échelle régionale	CETE Méditerranée (Centre d'étude technique de l'équipement), Inspection générale des carrières (Paris)	Prévention, recherche fondamentale et appliquée sur les aléas, conseil technique et protection	
		Échelle locale	Université du Colorado, laboratoires de recherche...	Recherche fondamentale et appliquée (aléas et vulnérabilités), formation, bases de données	
Regroupement de partenaires internationaux		Échelle régionale, nationale et des communautés	Alliance contre les feux de forêt (créée en 2007 sous l'égide de la FAO et de la Commission européenne, regroupe 47 organisations telles que services forestiers nationaux, universités, entreprises privées, organisations gouvernementales, non gouvernementales et intergouvernementales). Elle prépare et met en œuvre des directives volontaires de lutte et de prévention contre les feux de forêt et le renforcement de la coopération internationale pour la gestion des feux.		
Société civile	Médias	Échelle internationale	RFI / CNN	Information du public, sources documentaires	
		Échelle nationale	Journaux (<i>Le Monde...</i>), télévisions (TF1 / BBC)		
		Échelle régionale	Journaux, chaînes de télévisions et de radios régionales, locales ou d'agglomération. Médias spécialisés (chaînes TV Météo aux USA)		
		Échelle locale		Information du public, messages d'alerte	
	ONG, associations d'aide aux victimes, fédérations d'associations	Échelle internationale	MSF, Pompiers sans frontières / Oxfam, Care		Action d'urgence, prévention (programmes de soutien au développement, alerte préventive et construction d'abris contre les cyclones au Bangladesh), lobbying
		Échelle nationale	Croix-Rouge française, France Nature Environnement / Sierra Club (USA)		Action d'urgence et prévention / prévention, information, recherche, échanges
		Échelle régionale	Regroupement d'associations locales (Fédération départementale des associations de sinistrés de l'Aude, <i>Yayasan IDEP Foudation</i> en Indonésie)		Action d'urgence, prévention, information, aide au développement
		Échelle locale	Assoc. de sinistrés, de protection de l'environnement (Action pour l'environnement à Boulogne-Billancourt, ADESA d'Arles) / <i>Neighborhood Emergency Response Teams</i> (USA)		Aide à la reconstruction, prévention, information du public, veille juridique / entraînement aux situations de crise

Professionnels de la gestion du risque	Bureaux d'études, conseil	Échelle internationale	National Hurricane Center de Miami	Recherche fondamentale et appliquée (risques cycloniques), surveillance et alerte	
		Échelle nationale	Météo-France / Hawaiian Volcano Observatory	Recherche fondamentale et appliquée sur les aléas, information, surveillance et alerte	
		Échelle régionale	SOGREAH, Cemagref	Recherche appliquée, modélisation des aléas, études techniques	
		Échelle locale	Predict (Languedoc-Roussillon), Hydratec	Surveillance météo, hydro des aléas, alerte, modélisation	
	(Ré)assureurs	Échelle internationale	Munich Re Group	Évaluation, modélisation des coûts des catastrophes, assurance	
		Échelle nationale	Caisse centrale de réassurance, Compagnies d'assurance (MAIF, AXA)	Prévention, assurance	
		Échelle régionale	Programmes d'assurance à l'échelle des états (USA)	Indemnisation, aide à la reconstruction	
		Échelle locale			
	Professionnels de la gestion de crise	Échelle internationale	Comité international de la Croix-Rouge, du Croissant-Rouge (planification des secours d'urgence, renforcement des capacités de préparation aux crises)		
		Échelle nationale	Ministère de l'Intérieur, Sécurité Civile	Action d'urgence, prévention	
		Échelle régionale	Préfecture, SDIS, SAMU / Garde nationale (USA, mobilisée sur l'ordre des gouverneurs en cas de catastrophe)	Action d'urgence	
		Échelle locale	Pompiers, secouristes	Action d'urgence, protection	
			FL, NMR, FV, 2010		

Tableau 25

Mesures de prévention par risque et leur applicabilité technique

			Modes de gestion du risque								
			Maîtrise de l'aléa	Maîtrise des enjeux		Réduction de la vulnérabilité structurelle, humaine et fonctionnelle*					
Grands types d'aléa	Facteurs	Sous types	Réduction de l'aléa (protections structurelles)	Maitrise occ. du sol	Relocalisation des enjeux	Réduction vulnérabilité	Information & éducation	Vigilance, prévision, alerte	Gestion crise	Évacuation	Assurance (marché)
Aléas climatiques	Températures	Vague de froid	0	0	0	XX	XX	XX	XX	~0	X
		Gel de printemps	XX	X	X	X	X	XX	X	~0	XX
		Vague de chaleur/canicule	0	~0	~0	X	XXX	XX	XX	~0	X
		Chutes de grêle	XX	~0	~0	~0		X		~0	XXX
	Précipitations	Brouillard	X	XX	X	~0		XX	X	~0	
		Erosion coulée de boue	XX	XXX	X			XX	XX	~0	XX
		Pluies verglaçantes	0	~0	~0	XX	X	XX	XX	~0	
	Préc. & Temp.	Chutes de neige	0	~0	~0	XXX	X	XX	XXX	~0	XXX
		Sécheresse	XX	~0	~0	~0	XX	XXXX	XXX	X	X
		Incendie de forêt	XX	XXX	XX	XX	XXX	XX	XXXX	XXX	
	Vents forts	Tempête	0	~0	~0	XX	XX	XXX	XX	~0	XX
		Cyclone	0	~0	X	XX	XXX	xxx	XXX	XX	X
		Tornade	0	~0	~0	XX	XX	XX	XXX	X	XX
Aléas hydroclimatiques		Submersion marine	XX	XXX	XXX	X	XX	XX	XX	XX	X
		Crue lente	XXX	XXX	X	XX	XX	XXX	XX	XXX	X
		Crue torrentielle	XX	XXX	XX	X	XX	XX	XXX	X	X
		Avalanches	XX	XXX	XX	XX	XXX	XX	X	XX	
Aléas morpho-dynamiques		Coulées de boue, Lahars	XX	XXX	XX	XX	XX	XX	XX	X	
		Retrait-gonflement	~0	XX	X	XXX	X	X	~0	~0	X
		Mvts de terrain	X	XXX	XXX	X	XX	XX	XX	XXX	
Aléas géodynamiques		Séisme	0	XX	~0	XXX	XX	0	XXX	~0	X
		Tsunami	X	X	X	X	XXX	XX	XXX	XX	
		Volcanisme	X	XXX	X	XX	XXX	XXX	XXX	XXX	
		Mouvements gravitaires	X	XXX	XXX		XX	XXX	X	XXX	

Aléas extraterrestres		Météorite	X	~0	~0	~0	~0	X	0	0	
------------------------------	--	-----------	---	----	----	----	----	---	---	---	--

* Pour chaque type de risque et chaque mode de gestion on a considéré la faisabilité des mesures, leur efficacité potentielle : la mesure réduit-elle significativement le risque ?

Ou bien, peut-elle favoriser des actions susceptibles de réduire le risque ? Par exemple pour le risque sismique la maîtrise de l'occupation du sol est théoriquement possible mais en réalité elle est difficilement applicable, sauf localement.

Critères :

0 = L'application de la mesure n'est pas possible (sans objet) ou n'a aucun effet sur la réduction du risque

X = L'application de la mesure peut réduire faiblement le risque dans certains cas marginaux

XX = L'application de la mesure réduit le risque

XXX = L'application de la mesure entraîne la quasi suppression du risque

Critères :

0 = l'application de la mesure n'est pas possible (sans objet) ou n'a aucun effet sur la réduction du risque.

X = l'application de la mesure peut réduire faiblement le risque dans certains cas marginaux.

XX = l'application de la mesure réduit le risque.

XXX = l'application de la mesure entraîne la quasi-suppression du risque.



L I C E N C E

G É O G R A P H I E

Aléas naturels et gestion des risques

Les grandes questions

- Au croisement entre aléas et vulnérabilités, comment se définit et évolue la géographie actuelle des risques naturels ?
- Les villes et les pays du Sud sont-ils de plus en plus menacés ?
- Comment, par qui et avec quels outils les risques naturels sont-ils gérés ?

Le manuel permet de mieux comprendre la complexité de l'étude et de la gouvernance des risques naturels, ainsi que leur prise en compte dans l'aménagement, à travers l'évolution des concepts et des méthodes, l'étude des aléas et des vulnérabilités contemporaines, des acteurs et des outils de gestion.

Le plan de travail

Première partie - Une problématique géographique récente

- I. L'émergence de la géographie des risques
- II. Les composantes du risque
- III. Du risque à la catastrophe
- IV. L'évaluation des risques

Deuxième partie - Les aléas d'origine géodynamique

- I. Éléments et méthodes de classification des aléas naturels
- II. Les éruptions volcaniques
- III. Les séismes et tsunamis
- IV. Les mouvements de terrain

Troisième partie - Les aléas d'origine hydroclimatique

- I. Les aléas climatiques directs
- II. Les aléas climatiques indirects

Quatrième partie - Les vulnérabilités au cœur des risques naturels

- I. Contrastes géographiques
- II. Risques et histoire : le poids des héritages

Cinquième partie - La gestion des risques naturels

- I. Approches et outils de la gestion des risques
- II. Gouvernance des risques et aménagement des territoires

Les auteurs

Frédéric Leone, professeur des universités, Nancy Meschinet de Richemond, maître de conférences agrégée et Freddy Vinet, professeur des universités agrégé, enseignent la géographie des risques naturels à l'Université Paul Valéry Montpellier III.

« Licence » : les livres de référence pour réussir votre licence

Compléments sur le web : www.licence.puf.com

ISBN : 978-2-13-057432-3



15 €