



**HAL**  
open science

# Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain

Frédéric Leone

► **To cite this version:**

Frédéric Leone. Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain. Environnement et Société. Université de Grenoble, 1996. Français. NNT : . tel-00721876

**HAL Id: tel-00721876**

**<https://theses.hal.science/tel-00721876>**

Submitted on 30 Jul 2012

**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.

# THESE

présentée par  
**Frédéric LEONE**

pour obtenir le titre de  
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE JOSEPH FOURIER  
GRENOBLE I  
SCIENCES, TECHNIQUES ET MEDECINE

(Arrêtés ministériels du 5 juillet 1984 et du 30 mars 1992)

Spécialité : Géographie  
(Risques Naturels)

---

## CONCEPT DE VULNERABILITE APPLIQUE A L'EVALUATION DES RISQUES GENERES PAR LES PHENOMENES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN

---

janvier 1996

Soutenue publiquement le 03/01/1996 devant le jury composé de :

Mr J.P. Asté (professeur associé à l'Université Joseph Fourier, Grenoble I)  
Mr O. Dollfus (professeur à l'Université de Paris VII)  
Mr J.C. Flageollet (professeur à l'Université Louis Pasteur, Strasbourg I)  
Mr A. Morel (professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble I)  
Mr P. Mouroux (chargé de recherches au BRGM de Marseille)  
Mr E. Leroi (chargé de recherches au BRGM de Marseille)

Président  
Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur

Thèse préparée au sein du Laboratoire de la Montagne Alpine (LAMA, URA 344 du CNRS, Grenoble),  
de l'Institut de Géographie Alpine (Université Joseph Fourier, Grenoble I) et de la Direction de la Recherche du  
Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM, Projet Risques Naturels, Marseille)

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) qui a financé ce travail dans le cadre de son Projet de Recherche sur les Risques Naturels ainsi que toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à son élaboration durant ces trois années. Ces remerciements s'adressent en particulier à Jean Pierre Asté qui a placé sa confiance en moi pour mener à bien ces recherches dont il est l'initiateur. Il a su m'apporter un soutien moral et scientifique permanent. Je remercie également toute l'équipe du BRGM de Marseille et en particulier Eric Leroi et Pierre Mouroux qui ont accordé une attention particulière à ce travail. Ma reconnaissance s'adresse également à Alain Morel pour l'intérêt qu'il a pu porter à mes recherches.

Ce travail m'ayant conduit en Equateur, je tiens à remercier l'équipe de l'ORSTOM de Quito pour son soutien logistique et en particulier Eric Cadier et sa famille ainsi qu'Emmanuel et Sophie Gautier qui ont facilité mes recherches tout en me faisant découvrir ce beau pays. Merci aussi à la société JPA Consultants qui a mis gracieusement à notre disposition ses outils de traitement des données numériques ainsi qu'au CIFEG pour sa participation financière.

L'autre terrain d'études ayant été le Diois, je remercie le lieutenant des sapeurs pompiers Christian Rey qui m'a assisté tout au long de mes recherches locales et qui a su me faire profiter de sa connaissance parfaite de cette région qui m'est pourtant familière. Merci aussi à Olivier Cuzin, étudiant de maîtrise à l'IGA avec qui j'ai mené ces investigations drômoises, à Mr Pinard de la direction de la sécurité civile qui a facilité l'accès à certains dossiers, à Mr Talon de la DDE de Die et à l'association "Avenir de Boulc" pour leur aimable collaboration.

Mes remerciements s'adressent également à tout le personnel de l'Institut de Géographie Alpine de Grenoble et en particulier à Huguette Vivian, Georges Rovera, Michel Marin, Annie-Pierre Mesclon et Anne Pierson.

Je ne peux clore ce chapitre sans remercier mes nombreux amis grenoblois et en particulier mes deux compères, Lahcen et Elkin.

Enfin, merci encore à Gini, la plus fidèle des compagnes.

# SOMMAIRE

<i>INTRODUCTION GENERALE</i> .....	7
<i>CHAPITRE I - CONCEPTS ET REALITES DU RISQUE GENERE PAR LES MOUVEMENTS DE TERRAIN</i> .....	9
1. Introduction.....	9
2. Etat des concepts propres aux analyses de risque .....	10
3. Réalités du risque mouvements de terrain.....	32
4. Conclusion du premier chapitre.....	53
<i>CHAPITRE II - ANALYSES DE CAS</i> .....	55
1. Introduction.....	55
2. La catastrophe de la Josefina (Equateur, printemps 1993) : un événement convulsif aux effets induits dévastateurs.....	56
3. Les événements du Diois (Drôme, France, Janvier 1994) : des phénomènes dispersés mais aux effets cumulables.....	78
4. Le glissement de terrain de la Salle-en-Beaumont (Isère, France) : une catastrophe au retentissement national .....	113
5. Conclusion du second chapitre .....	117
<i>CHAPITRE III - L'EVALUATION DE LA VULNERABILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN</i> .....	119
1. Introduction.....	119
2. La quantification de la vulnérabilité .....	120
3. Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité et du risque .....	148
4. Conclusion du troisième chapitre .....	163
<i>CONCLUSION GENERALE</i> .....	165
<i>ANNEXES</i> .....	167
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i> .....	263
<i>LISTE DES FIGURES</i> .....	275
<i>LISTE DES TABLEAUX</i> .....	279
<i>LISTE DES ANNEXES</i> .....	281
<i>TABLE DES MATIERES</i> .....	283

## ***INTRODUCTION GENERALE***

Les mouvements de terrain occupent une place de choix parmi les phénomènes naturels générateurs de risques. Ils se déclenchent préférentiellement dans des zones où prédominent des conditions d'équilibre des sols relativement précaires et sont le plus souvent aggravés par des sollicitations hydrauliques, sismiques ou anthropiques. Leurs effets sont parfois catastrophiques et leur prévention apparaît aujourd'hui en France et dans plusieurs autres pays comme une nécessité s'inscrivant dans une politique globale de réduction des risques naturels.

Le travail entrepris dans cette thèse tente d'éclairer sous un angle nouveau la perception du risque mouvements de terrain et s'insère donc dans le cadre général de cette prévention. Il est structuré autour de la notion de "vulnérabilité", concept peu exploré, tant sur le plan fondamental qu'au niveau de ses applications, qui concerne directement la prévision des conséquences des phénomènes naturels.

Toute la difficulté de la démarche entreprise est d'adapter ce concept de vulnérabilité à une évaluation quantitative des pertes pressenties. Cela nécessite dans un premier temps de redéfinir et d'adapter les concepts propres aux analyses de risque au cas spécifique des mouvements de terrain, d'extraire ensuite un maximum d'informations de cas historiques, de manière à pallier les carences existantes en matière de données statistiques sur les dommages imputables aux mouvements de terrain, puis d'établir, grâce à ce retour d'expérience, des propositions méthodologiques.

Le premier chapitre de ce travail est donc consacré d'abord à une adaptation des concepts propres aux analyses de risques. Les notions de risque encouru, spécifique et global y sont redéfinies dans une perspective générale et théorique de prise de décision. On essaie de montrer ensuite que la définition de la vulnérabilité retenue est une composante fondamentale de l'appréciation quantitative du risque et en quoi elle se démarque d'approches existantes plus qualitatives. On en propose ensuite une structuration en composantes principales qui servira de base, dans le chapitre III, à des développements méthodologiques d'évaluation du risque.

La suite de ce chapitre met l'accent sur les réalités du risque mouvements de terrain, en proposant une description détaillée et illustrée par de nombreux exemples historiques, de la diversité des phénomènes considérés, de leurs conséquences humaines ou économiques et de l'importance des phénomènes induits.

Le second chapitre illustre quelques unes des composantes de la vulnérabilité. On étudie pour cela la diversité des dommages générés par des mouvements de terrain au moyen de différentes procédures de recueil de données et d'observations. Cette étude repose sur trois analyses en retour de cas récents : la catastrophe de la Josefina survenue en Equateur et les événements français du Diois et de la Salle-en-Beaumont. Ces analyses portent non seulement sur la diversité des dommages, préjudices et dysfonctionnement apparus mais également sur la nature des phénomènes impliqués, leur distribution, leur intensité et leur éventuel enchaînement. A l'issue de ces dernières, un certain nombre d'enseignements viennent enrichir notre connaissance du thème de la vulnérabilité en portant

notamment des éclairages nouveaux sur les notions de processus et de modes d'endommagement propres aux mouvements de terrain.

Ces analyses répondent à un besoin primordial de voir se développer en matière de mouvements de terrain de véritables constats d'endommagement ainsi que des bilans consolidés d'événements dispersés.

Dans le troisième chapitre on tente de développer une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité censée s'appliquer à l'ensemble des phénomènes de mouvements de terrain. Elle repose sur une tentative de quantification du concept lui-même en reprenant les bases théoriques de sa définition et en mettant à profit un certain nombre d'informations tirées des constats d'endommagement. Cette quantification passe par une réflexion sur les notions d'intensité des phénomènes et de modes d'endommagement des éléments qui y sont exposés. Elle s'articule autour de matrices dites d'endommagement, coeur même de la méthodologie.

Le principe méthodologique est ensuite appliqué sur quelques cas fictifs en guise d'illustration.

# **CHAPITRE I**

## **CONCEPTS ET REALITES**

### **DU RISQUE GENERE PAR LES MOUVEMENTS DE TERRAIN**

#### **1. Introduction**

Les mouvements de terrains sont des phénomènes fréquents et dispersés qui se caractérisent par une grande diversité. Leurs manifestations sont parfois lourdes de conséquences, aussi bien sur le plan humain que matériel. Que ces phénomènes soient déclarés ou potentiels, la préoccupation première des aménageurs est d'en limiter les effets potentiels. La stratégie de prévention alors mise en oeuvre repose sur des notions et concepts hérités dans le meilleur des cas, des analyses dites de risque.

Ce chapitre premier mène tout d'abord une réflexion approfondie et une structuration illustrée de ces notions et concepts, tels qu'ils peuvent être appliqués notamment au cas spécifique des phénomènes de mouvements de terrain. Il étudie en particulier le concept de vulnérabilité, notion fondamentale permettant de décrire ce que sera l'effet dommageable d'un phénomène pressenti. La définition qui en est proposée s'intègre dans une formalisation théorique et analytique du risque et de la prise de décision. Le but est d'arriver à quantifier la vulnérabilité et donc le risque pour différents scénarios, et d'apprécier ainsi l'opportunité, notamment économique, des stratégies de prévention proposées pour un niveau d'acceptabilité donné de ce risque.

La suite de ce chapitre est consacrée à la présentation des réalités du risque mouvements de terrain. Après une description détaillée de la diversité des phénomènes mis en jeu, il illustre l'impact économique et humain de ces phénomènes dans le monde, et de manière plus détaillée en France. Il s'achève sur la description des principaux phénomènes induits que peuvent générer les mouvements de terrain.

## 2. Etat des concepts propres aux analyses de risque

### 2.1. Présentation

Les analyses de risque technologique ou naturel, font appel à un certain nombre de concepts et notions apparemment bien établis mais auxquels correspondent souvent des divergences de définition qui peuvent devenir déroutantes pour le néophyte et même pour le spécialiste.

Or il semble primordial, en cette décennie consacrée à la prévention des catastrophes naturelles (cf. Boutros-Ghali, 1994), d'adopter un vocable commun indispensable à toute tentative d'harmonisation des politiques internationales de prévention et de gestion des risques naturels.

Malgré des efforts de définition qui vont dans ce sens<sup>1</sup> et qui mettent un terme à des années de laxisme sémantique, il a paru important dans ce chapitre de rappeler quelques unes de ces notions, et d'approfondir, redéfinir et illustrer tout particulièrement les concepts fondamentaux de risque et de vulnérabilité.

Cette réflexion permet de commencer à structurer ce travail de thèse et de montrer sous quel angle on va exploiter ces concepts : en l'occurrence sous des aspects méthodologiques.

### 2.2. Le concept de risque

#### 2.2.1. Au sens commun

Le terme de risque a été popularisé par les médias depuis un certain nombre d'années déjà, notamment du fait de certaines menaces technologiques apparues avec le développement de l'énergie nucléaire et des premières analyses de risque qui en ont découlé (cf. Rasmussen, 1974).

Sa définition la plus précise et concise apparaît dans le dictionnaire Littré : "péril dans lequel entre l'idée de hasard".

Il faut retenir de cette définition littéraire l'idée d'événement dommageable, de danger, de péril, de perte et celle d'aléa.

En résumé, ce terme recouvre une dualité fondamentale réunissant deux notions indépendantes, celle de **perte** et celle de **probabilité**. Cette probabilité traduisant les chances qu'a le phénomène de se matérialiser.

Certains glissements de sens apparaissent dans le domaine des sciences de la terre avec l'emploi abusif du terme "Risque naturel" qui semble être le plus souvent la mauvaise traduction du terme anglo-saxon "*Geological hazard*"<sup>2</sup> qui pour sa part a un sens beaucoup plus précis en désignant l'aspect aléatoire du phénomène naturel dommageable (l'aléa en français), donc sa probabilité d'occurrence.

---

<sup>1</sup> Voir en particulier le glossaire multilingue (350 termes), relatif à la gestion des catastrophes et préparé dans le cadre de la décennie internationale de la prévention des catastrophes naturelles (DIPCN) par le département des affaires humanitaires de l'UNDRO (Godefroy *et al*, 1992).

<sup>2</sup> De nombreuses études techniques, dont en particulier les célèbres Plans d'Exposition aux Risques (P.E.R.), les cartes Z.E.R.M.O.S. ou certains inventaires départementaux, comportent le générique "risque naturel" alors qu'elles portent le plus souvent sur l'analyse des seuls aléas.



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

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

### 2.2.2. Au sens théorique

Si on arrive à quantifier les deux notions de pertes et de probabilité d'occurrence pendant une période donnée, on peut exprimer le risque comme le produit des deux, ce qui correspond à la définition de l'espérance mathématique (Canceill, 1983). Le risque se traduit alors comme l'**espérance mathématique des pertes** ou **du dommage**.

Ce principe est à peu près admis par un certains nombre d'organisations (C.C.E., Ministère de l'environnement., U.N.E.S.C.O.-U.N.D.R.O.), mais son application semble difficile notamment dans le cas de phénomènes naturels complexes tels que les mouvements de terrain.

Cela tient à première vue à la difficulté :

- d'une part de comptabiliser dans une même unité les vies humaines perdues, les biens détruits, les atteintes à l'environnement, les préjudices sociaux, etc. ;
- d'autre part d'affecter à ces phénomènes une probabilité d'occurrence du fait de la méconnaissance et de la complexité des mécanismes mis en jeu.

Cependant, puisque l'espérance mathématique rend compte en théorie de la notion de risque, on peut essayer d'adapter cette définition au cas des phénomènes de mouvements de terrain. On propose ci-dessous une tentative de formulation analytique du risque qui reprend les bases de celle avancée par Varnes (1984), précurseur en la matière. Cette spéculation purement théorique permet de structurer ce concept et d'en dégager les composantes fondamentales qu'il faudra par la suite considérer pour toute tentative d'évaluation quantitative (*cf. chap. III*).

En supposant un **élément exposé** donné, le risque encouru par cet élément peut être appelé **Risque spécifique** ou unitaire ( $R_s$ ) par opposition au **Risque global** ( $R_g$ ) encouru par une communauté donnée constituée d'un ensemble de ces éléments exposés.

Notons au passage que le terme "d'élément exposé" est préférable à son équivalent anglo-saxon "élément à risque" ("*element at risk*", selon Varnes, 1984) qui introduit trop prématurément la notion de risque.

2.2.2.1. Notion de risque spécifique

On propose la définition du risque spécifique suivante qui peut se définir comme l'espérance mathématique de l'endommagement d'un élément exposé donné (fig. I.1):

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

avec Po : probabilité d'occurrence du phénomène ;  
 Pa : probabilité pour que le phénomène atteigne l'emplacement de l'élément exposé ;  
 Pp : probabilité pour que l'élément exposé soit présent au moment où le phénomène l'atteint ;

et D : niveau d'endommagement potentiel de l'élément exposé si le phénomène l'atteint (vulnérabilité au sens strict).

La mesure de ce risque spécifique, à établir pour une période de retour donnée, s'effectue sur une échelle de valeurs comprises entre 0 et 1 valable aussi pour chacune de ces composantes. La valeur 0 correspond à un risque nul (par exemple en plein désert puisque D = 0 du fait de l'absence d'élément exposé) et la valeur 1 étant réservée à un risque total.

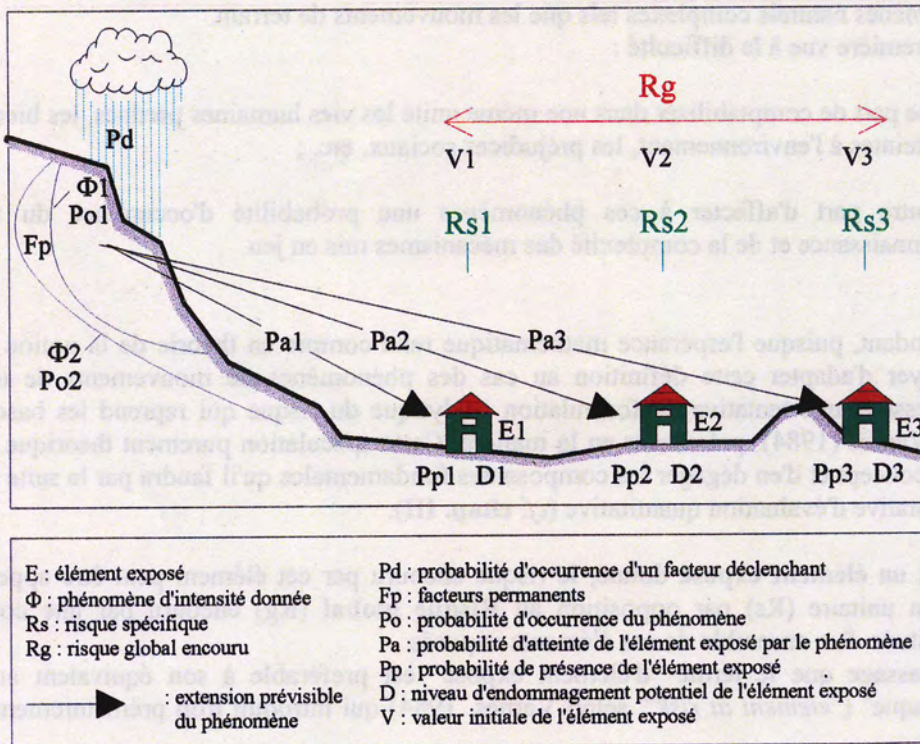


Figure I.1 - Illustration des différentes composantes entrant dans la définition analytique du risque : application au cas des phénomènes de mouvements de terrain.

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

- **Po** est ce qui reste de l'aléa, toujours selon le sens donné par Varnes (1984). Elle correspond à la probabilité de voir se produire un phénomène potentiellement dommageable d'intensité donnée dans une période de temps et un secteur donné

Dans le cas particulier des phénomènes de mouvements de terrain, cette occurrence du phénomène est fonction :

- de **facteurs de prédisposition ou de présomption** (facteurs dits permanents  $F_p$ ) : morphologie du terrain avec tous ses attributs, nature des matériaux, degré de saturation en eau, mode d'occupation du sol. Il s'agit de la dimension spatiale de cet aléa ;

- d'une **probabilité d'occurrence**  $P_d$  (au sens strict) de **facteurs aggravants** ou de **déclenchement**, qui sont soit naturels (conditions hydro-météorologiques, activités sismique ou volcanique), soit anthropiques (travaux de terrassement, d'excavation ou de chargement, fuites de réseaux). Il s'agit de la dimension temporelle de ce même aléa. Soit :

$$P_o = fct (F_p, P_d)$$

- **Pa** représente la probabilité spatiale pour que le phénomène atteigne l'élément exposé en supposant que ce dernier soit présent ( $P_p = 1$ ) à ce moment là.  $P_a$  correspond à une valeur relative calculée pour un élément exposé donné par rapport à un autre élément exposé. Le terme employé de "probabilité" reste ici critiquable, étant donné que la dimension temporelle n'intervient pas. A défaut, on peut parler de chance (ou de malchance !) qu'a le phénomène d'atteindre l'élément exposé pour des conditions géométriques de déclenchement données.

Par exemple (**fig. I.2a**), vis à vis de phénomènes de chutes de blocs, un élément exposé donné aura plus de chance d'être touché s'il est sur la zone de réception des blocs, dans une cuvette par exemple (cas 2), plutôt que s'il est situé sous la zone de propagation des blocs (cas 1), en supposant que ceux-ci aient une trajectoire rebondissante, ou bien à l'abri d'un obstacle (cas 3). On peut même affiner le raisonnement pour l'élément répondant au cas 1. En effet, selon Ritchie (1963), la pente du talus influence le mode de chute du bloc et donc la probabilité pour que l'élément soit atteint (**fig. I.2b**) : pour des pentes très raides, supérieures à  $75^\circ$ , le bloc qui se détache du haut du talus ou qui provient d'un fond supérieur, a de grandes chances d'effectuer une chute directe jusqu'au pied du talus sans impacts intermédiaires. Pour des pentes voisines de  $65^\circ$ , la probabilité d'impacts intermédiaires sur le talus avec rebondissements donnant au bloc une composante horizontale de vitesse le propulsant loin du pied du talus est beaucoup plus élevée. Il semble que ces valeurs de pente soient d'ailleurs les plus dangereuses eu égard aux trajectoires qu'elles engendrent. Enfin, pour des pentes plus faibles de  $45$  à  $35^\circ$ , les blocs auront tendance à rouler ou glisser sur la pente (LPC, 1978).

Cette grandeur est intéressante à considérer car elle permet de différencier les phénomènes de propagation tels que les coulées, les éboulements, certains glissements, etc., de phénomènes plus localisés tels que les effondrements ou les affaissements qui vont endommager seulement les éléments situés à leur aplomb.

Elle sous entend donc qu'on considère l'extension prévisible du phénomène depuis sa source et que l'on soit donc capable, en théorie, de modéliser ses trajectoires.

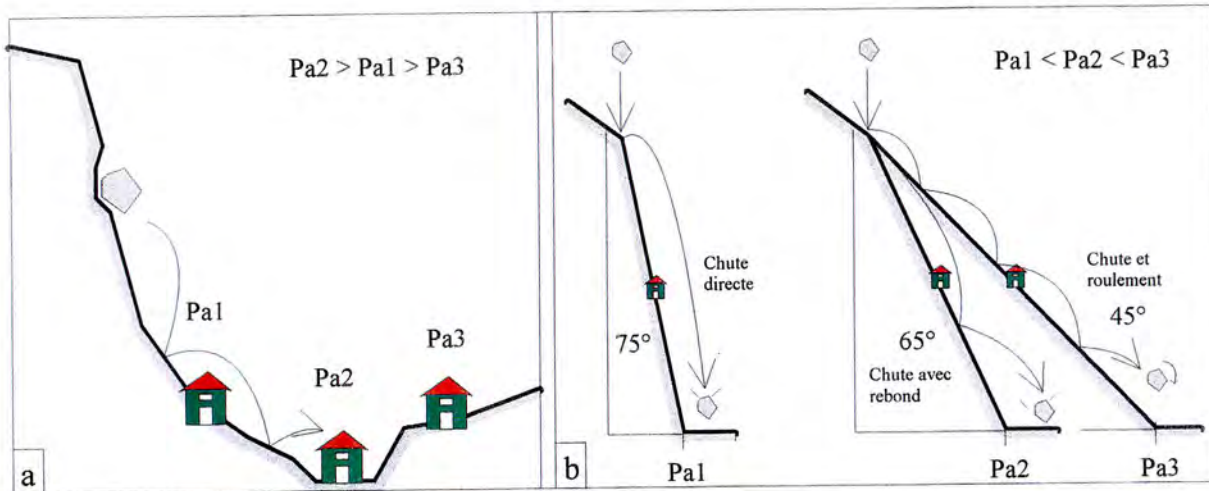


Figure 1.2 - Probabilités  $P_a$  pour qu'un bloc atteigne un élément exposé. a : suivant la position de l'élément ; b : suivant la pente de la trajectoire (b modifié d'après Ritchie, 1963 in LPC, 1978)

-  $P_p$  caractérise la probabilité temporelle de présence de l'élément exposé au moment où le phénomène se déclenche, ou mieux encore lorsque celui-ci l'atteint si on connaît sa vitesse de propagation qui peut être très variable suivant sa nature. Cette composante s'applique préférentiellement aux éléments exposés mobiles tels que des personnes, des véhicules, etc.

Par exemple, une personne qui circule sur une route aura moins de chance d'être touchée directement par un phénomène dynamique qu'une autre personne qui occupe en permanence une habitation située sous le même phénomène. Il s'agit d'une considération qui peut paraître à première vue un peu futile, mais qui devient souvent dans la réalité un critère de priorité pour entreprendre une action de réduction du risque.

Suivant l'échelle de temps à laquelle on raisonne pour évaluer un quelconque risque, et si celle-ci est importante,  $P_p$  permet d'introduire pour certains éléments structurels (matériels) fixes, la notion de **durée de vie de l'élément**. Comme par exemple celle d'une infrastructure routière prévue pour résister à un certain nombre d'années et pour laquelle on évalue un risque de destruction élevé du fait de l'imminence d'un écroulement rocheux. Le risque deviendrait plus faible, si cet écroulement rocheux survenait au delà de la durée de vie prévue de cette infrastructure.

A contrario on peut concevoir que la décision de construire un tel ouvrage par exemple, va dépendre le plus souvent de sa rentabilité économique, c'est-à-dire de son amortissement, donc de sa durée de vie qui pourra alors être fixée sur la base d'un calcul de risque minimum de perdre cet ouvrage. L'évaluation du risque spécifique s'impose alors dans ce cas comme un critère théorique de **prise de décision**.

Notons que la considération de  $P_p$  permet aussi de considérer le risque encouru par des éléments inexistantes mais prévus, soit par des projets d'aménagement mal pensés, soit par des circonstances de développement favorables : on pense par exemple à l'urbanisation potentielle d'un secteur du territoire desservi par une sortie d'autoroute en projet (zone dortoir périurbaine) (cf. Dumolard & Jin, 1993).

-  $D$  représente le niveau d'endommagement potentiel de l'élément exposé sous l'effet du phénomène pressenti d'intensité donnée ou en d'autres termes ce qu'on appellera par la suite la **Vulnérabilité** au sens strict, c'est-à-dire au sens technique du terme dans le cadre des évaluations de risque (cf. §. 2.3.2, chap. I).

### 2.2.2.2. Notion de risque global encouru

Le passage au risque global  $R_g$  encouru par une communauté exposée donnée s'effectuera en sommant les risques spécifiques des différents éléments composant cette communauté, mais après quantification en terme de pertes, des niveaux d'endommagement  $D$  de chacun des éléments exposés.

Cette quantification prend en compte la notion de **valeur unitaire initiale**, c'est-à-dire avant endommagement potentiel, de l'élément exposé. Cette valeur peut être de nature économique, humaine, ou fonctionnelle suivant la nature de l'élément considéré et les applications recherchées.

Le risque global encouru correspond ainsi à une quantification économique (monétaire), humaine ou fonctionnelle des dommages potentiels, ou en d'autres termes aux **pertes potentielles**, comme on l'a dit précédemment. On pourra alors parler de risque économique, humain ou fonctionnel suivant la nature des pertes considérées.

Son expression analytique sera de la forme :

$$R_g = \sum_i R_{s_i} * V_{i_i}$$

avec  $R_g$  : risque global encouru par une communauté exposée donnée ;  
 $R_s$  : risque spécifique encouru par chaque élément exposé, constituant de cette communauté ;  
 $V_i$  : valeur unitaire initiale de chaque élément exposé ou d'un ensemble d'éléments exposés ayant le même niveau d'endommagement  $D$ .

Les pertes encourues peuvent être exprimées, soit en valeur absolue, par exemple pour les coûts ou les préjudices humains (nombre de morts, de blessés potentiels, etc.), soit en valeur relative par rapport à un capital de départ de mêmes natures de valeurs initiales correspondant à différents éléments exposés.

Pour une communauté exposée donnée, c'est-à-dire circonscrite dans la zone d'effet supposé d'un phénomène pressenti, ce capital de départ d'un même type de valeurs correspond à ce qu'on appellera les **enjeux** (la mise de départ), par opposition aux pertes (le résultat). Ces enjeux peuvent donc être de nature économique, humaine ou fonctionnelle et toute la difficulté sera de les exprimer, comme les pertes, dans une même unité.

### 2.2.2.3. Risque et théorie de la décision

Cette formalisation mathématique du risque s'inscrit dans un processus de prise de décision, couramment appelé "théorie statistique de la décision" (Lagadec, 1981 et 1992 ; Cohen, 1992). Elle traduit le fait que l'appréciation du risque n'a de raison d'être qu'en fonction des décisions susceptibles d'être prises pour en atténuer les conséquences et que s'il y a décision à prendre, le décideur retiendra celle qui conduit à l'espérance des pertes la plus acceptable.

Ce n'est pas parce que la quantification exacte des probabilités et du dommage n'est pas accessible qu'il faut nier l'importance de ce concept et de sa formalisation mathématique : l'une peut éclairer l'autre, et aider à ce qu'il soit employé correctement, même sous une forme qualitative. C'est en essayant de définir cette espérance mathématique qu'on conserve à l'esprit que risque et probabilités ne désignent pas la même chose, ni en français, ni en mathématiques.

Il est pourtant important et souvent réalisable, de classer les risques. Même si on ne peut avoir des valeurs exactes de dommages et de probabilité, on peut leur affecter des valeurs numériques tenant lieu d'indicateurs, ce qui permet de comparer les risques entre eux en mettant en oeuvre différents scénarios (Canceill, 1982).

Cette démarche quantificatrice du risque est devenue courante et fiable depuis le début des années 1980 dans le milieu du risque technologique <sup>3</sup> (cf. Leroy & Signoret, 1992 et Kervern & Rubise, 1992) mais rares sont encore les applications dans le milieu des risques naturels et plus particulièrement de ceux générés par les phénomènes de mouvements de terrain. On peut néanmoins citer, concernant ces phénomènes, les applications menées par l'U.S. Geological Survey (Bernknopf *et al.*, 1988) et les réflexions méthodologiques sur le sujet de Thomas (1975), Einstein (1988), Kienholz (1992) ou Bocquet & Charre (1984).

Pour mettre en application théorique la définition analytique du risque spécifique qu'on vient de développer, on propose en **figure I.3** une structuration simplifiée du raisonnement pouvant être suivi lors d'une expertise de risque mouvements de terrain. Elle s'articule sous une forme arborescente et permet d'introduire des paliers successifs de réflexion et de prise de décision, au niveau desquels l'expert peut par exemple proposer des mesures graduelles de réduction du risque, soit passives, soit actives.

Par souci de simplification, ce schéma théorique représente ici les valeurs extrêmes des composantes du risque. Il va de soi que pour un cas réel, tous les intermédiaires seront envisageables, ce qui se traduira par des valeurs variables du risque suivant les scénarios retenus.

Ce schéma peut être aisément transposable à d'autres types de phénomène dangereux, naturels ou non. L'analyse des deux dernières étapes qui le composent constitue le coeur de cette thèse.

On verra dans le §. 2.3.2.3. du **chapitre I**, que la prise de décision dépend aussi de l'utilité de prendre telle ou telle mesure répondant à un type de dommage particulier, et que le risque peut alors s'exprimer par une fonction de risque dont la valeur dépend d'une fonction d'utilité.

---

<sup>3</sup> Elle fait appel le plus souvent à la théorie des graphes. Elle se matérialise par la construction d'arbres d'événements ou de défaillances et découle d'une démarche d'analyse déductive. Il s'agit de méthodes préconisées en particulier par la directive SEVESO qui s'applique depuis 1984 à certaines industries à haut risque. Elle a donné naissance à une nouvelle discipline scientifique appelée la Cindynique (du grec "*Kindinos*" signifiant "le danger") (cf. Faugères, 1990).

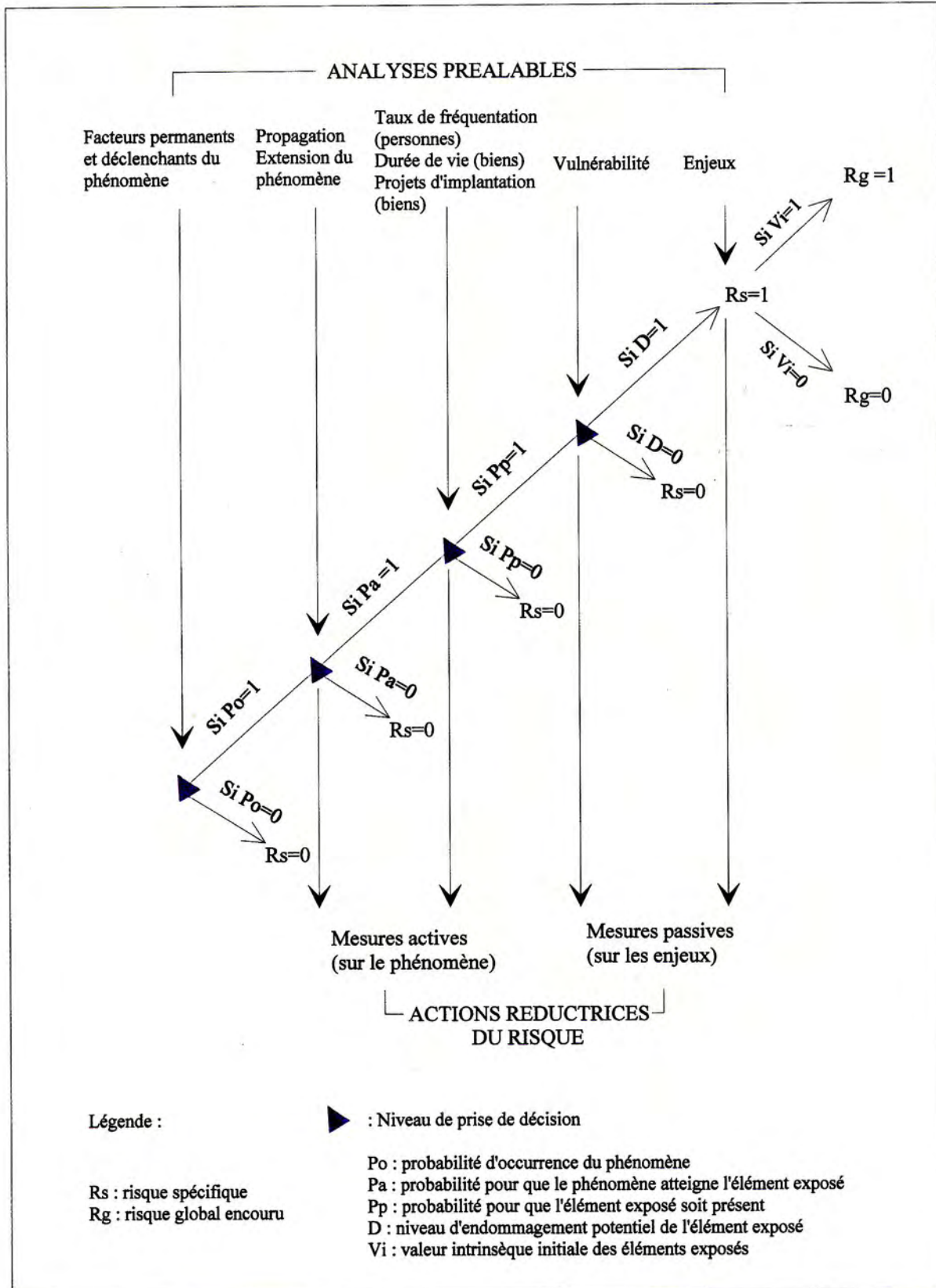


Figure I.3 - Etapes d'expertise du risque naturel.

## 2.3. Le concept de vulnérabilité

### 2.3.1. La vulnérabilité au sens large : l'approche qualitative

#### 2.3.1.1. Définition

« La vulnérabilité apparaît dans certaines communications comme un système articulé autour d'un grand nombre de variables, naturelles et humaines, dont la dynamique dans le temps et dans l'espace peut engendrer des situations plus ou moins dangereuses pour une société exposée ».

Cette citation tirée d'un article de D'Ercole (1994b) dressant une synthèse de diverses contributions portant sur le thème de la vulnérabilité <sup>4</sup>, traduit bien la grande confusion qui règne en général autour de ce concept, d'où des difficultés à le structurer, tant les approches et les définitions en sont variées et parfois même divergentes ; certains auteurs parlant même de "vulnérabilité aux risques" (cf. Chardon, 1994).

Néanmoins, la définition la plus appropriée pour définir cette notion assez vague semble être, toujours selon D'Ercole (1994b), "**la propension variable d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique**". On la qualifiera ici de "vulnérabilité au sens large" par opposition au sens plus strict et appliqué qu'on lui donnera dans le paragraphe suivant et qui prévaudra dans la suite de ce travail.

La démarche la plus couramment employée pour étudier cette vulnérabilité *largo sensu* semble être celle de l'analyse des facteurs qui concourent à son existence, selon une approche plutôt **qualitative** qui est décrite en règle générale par des sociologues, des économistes, des psychologues, des historiens et des géographes.

Les facteurs le plus souvent retenus et analysés par ces différents auteurs, et qui déterminent la vulnérabilité des sociétés d'une façon générale vis-à-vis des phénomènes naturels, sont passés en revue et illustrés par des exemples de cas de mouvements de terrain ci-dessous.

#### 2.3.1.2. Le facteur démographique et l'urbanisation croissante

Cela est surtout vrai pour certains pays en développement où l'on assiste de plus en plus à une implantation, souvent anarchique, précaire, concentrée et pas toujours contrôlée, des populations dans des zones exposées et dangereuses. On peut citer l'exemple de la ville de Manizales en Colombie (Chardon & Thouret, 1994 et Chardon, 1994) qui connaît depuis les années 1960 une urbanisation croissante, amplifiée depuis 1980. Elle a poussé les personnes les plus démunies à coloniser les versants abrupts (les pentes peuvent y avoisiner 40°) qui délimitent le plateau, site originel de la ville, et qui sont sujets à de nombreux glissements.

Autre exemple avec celui de Mayotte (archipel des Comores, océan Indien) (Bougère, 1994), où l'observation des agglomérations, hormis quelques exceptions, montre partout une extension des zones construites qui ont doublé de superficie. Autrefois limitées à la surface plane comprise entre les ruptures de pentes littorales et la mangrove ou la plage, les constructions escaladent désormais les pentes, entraînant des replats par déblai/remblai vers l'aval, dans des terrains aptes aux mouvements de masse et aux glissements.

Dans ces pays en voie de développement, selon Masure (1989), les grandes villes doublent tous les douze à quinze ans et les quartiers pauvres tous les sept ans au plus (**fig. I.4**).

<sup>4</sup> Il s'agit des actes du colloque "croissance urbaine et risques naturels principalement dans les pays en développement" qui s'est tenu à Clermont-Ferrand (Université Blaise Pascal) les 2 et 3 décembre 1994.



Dans les vingt prochaines années, le bâti et les infrastructures complémentaires à réaliser dans les zones urbanisées seront équivalents à ce qui s'est construit jusqu'ici au cours des quelques millénaires qui constituent notre histoire. En l'an 2000, 50% de la population mondiale vivra dans des villes et sera concentrée sur moins de 0,4% de la superficie des continents.

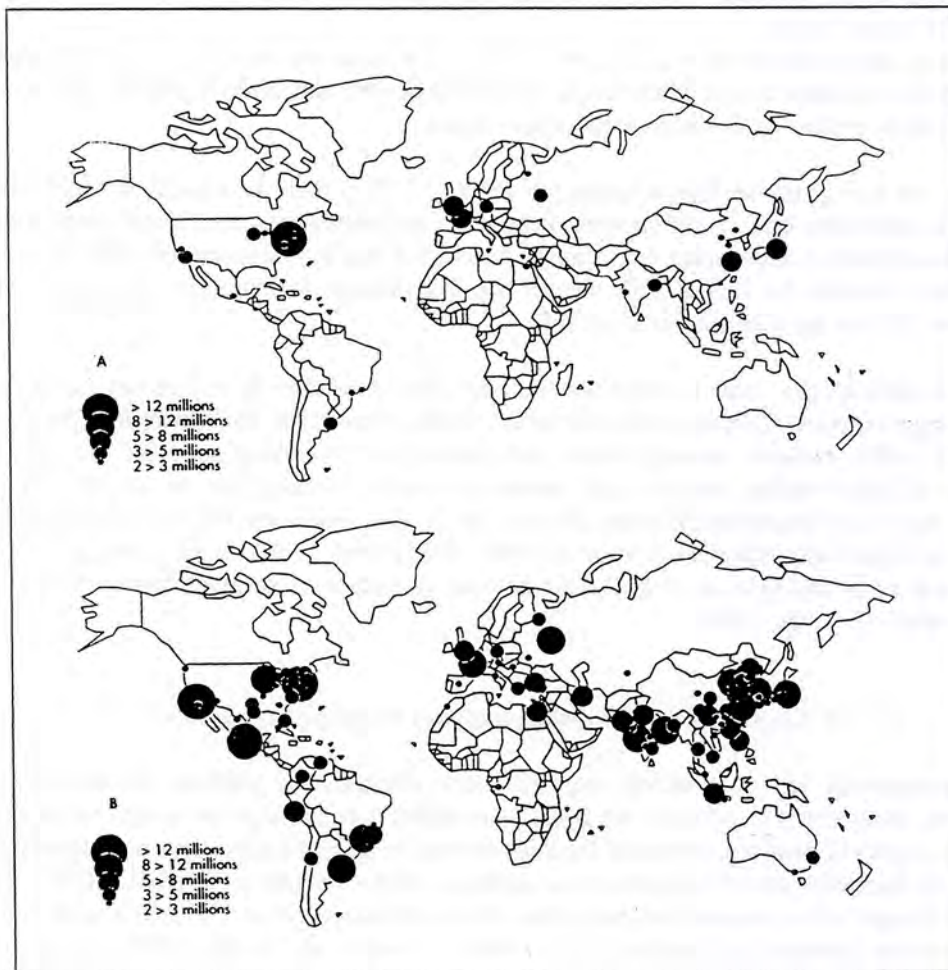


Figure 1.4 - Evolution démographique, en millions d'habitants, des grandes métropoles mondiales entre 1950 (A) et 1990 (B) (d'après Brun & Williams, 1983 et l'Annuaire démographique des Nations Unies, in Thouret & D'Ercole, 1994).

On voit donc que les villes seront l'objet principal des préoccupations en matière de risques naturels dans les prochaines années à venir. Le risque n'apparaît pas comme une simple menace sur l'existence de la ville et de ses habitants, mais bel et bien comme une composante fondamentale de sa structuration et de l'évolution de son urbanisation (November, 1994). Dans les pays en développement, la vulnérabilité y est d'autant plus grande que la société y est déjà segmentée et que divers dysfonctionnements y sont exacerbés (Chardon & Thouret, 1994).

### 2.3.1.3. Les facteurs socio-économiques

Pour ce qui est des pays en développement, la toile de fond est généralement constituée par le processus d'urbanisation dans un contexte de crise ou de fluctuations économiques. L'exode rural, la spéculation foncière et l'attrait exercé par la ville constituent autant de facteurs poussant les gens à s'implanter sur des terrains dangereux (D'Ercole, 1994b).

Par exemple, des observations sur le développement urbain de dix grandes agglomérations d'Amérique latine (Collin-Delavaud, 1994) laissent apparaître que cette vulnérabilité y est "forcée" vis-à-vis des phénomènes naturels car il n'y a pas d'autres possibilité que de gagner les pentes environnantes pour pouvoir rester à proximité du centre ville et bénéficier de ses commodités, faute de moyens de

locomotion individuels. De plus, pour les derniers arrivants les terrains les moins chers sont souvent ceux de moins bonne qualité.

Le cas des pays industrialisés est quelque peu distinct. L'occupation de zones supposées dangereuses est davantage liée à la spéculation foncière qu'à la qualité des terrains ou la recherche d'un espace vital, et se fait parfois au mépris de la réglementation en vigueur.

Par exemple, un travail sur ce thème mené par Pigeon (1991) dans le massif du Chablais (Savoie, France), laisse apparaître que les dommages récents aux infrastructures concernent principalement les habitations nouvellement implantées. La pression foncière actuelle y accentue en effet la dispersion de l'habitat sur les versants des vallées. Elle fournit des illustrations remarquables à la notion de mitage telle qu'elle est définie par Cabanne *et al.* (1984).

Cette pression anthropique vient en règle général perturber l'équilibre du milieu naturel et entretenir à son tour le risque inhérent. Cela est particulièrement vérifié dans le cas de phénomènes de mouvements de terrain. En effet, certains aménagements mal pensés peuvent venir modifier les paramètres de stabilité d'un sol déjà rendus précaires par certaines conditions naturelles du milieu. On pense par exemple aux effets de l'imperméabilisation des sols sur le déclenchement de laves torrentielles, comme par exemple à Bourg Saint Maurice (France) en 1981 (Flageollet, 1989) ou à l'impact de la destruction d'anciens systèmes de drainage sur le déclenchement de glissements, comme à Sainte Adresse en Seine Maritime (France) (Ledoux, 1989).

#### 2.3.1.4. Les facteurs psycho-sociologiques et comportementaux

Ils concernent les populations exposées aux phénomènes naturels et conditionnent leur comportement, notamment en situation de crise. La manière dont le risque est perçu est un des facteurs qui influence le plus la décision d'évacuer les lieux en cas de crise. Plus les gens sont conscients du fait que leur vie est menacée, plus facilement ils accepteront cette évacuation (UNDRO, 1987). Il est donc important de comprendre comment les personnes exposées perçoivent et vivent le risque, quelle en est leur représentation mentale (*cf.* Burton *et al.*, 1968 ; Goulter & Myska, 1987 ; Peterson, 1988 ; Laforge & Thouret, 1990 ; D'Ercole, 1991 ; D'Ercole & Rançon, 1994).

Par exemple, D'Ercole (1993), à propos d'une enquête réalisée sur les flancs du volcan Cotopaxi (Equateur), révèle que la perception du risque associé à d'éventuels "lahars" est très variable suivant le groupe social auquel appartiennent les personnes interrogées, mais aussi suivant leur âge, leur situation par rapport au volcan et la présence ou non d'obstacles visuels entre leur domicile et le volcan.

Ces perceptions sont généralement influencées par l'héritage socio-culturel de la société exposée. Cela peut se traduire par des attitudes fatalistes vis à vis du danger confortées par le discours souvent alarmiste et sensationnaliste des médias (Bermudez, 1994) et une résignation liée à certaines croyances, aux religions, aux superstitions (*cf.* Bjønness, 1986 ; Colbeau-Justin, 1994) ou à la confiance aveugle en certaines personnalités locales pas toujours compétentes (*cf.* D'Ercole & Moncayo, 1991).

De plus, la mémoire collective vis à vis des catastrophes passées s'atténue et se déforme avec le temps, si bien que certaines populations n'hésitent pas à revenir vivre sur les lieux d'une ancienne tragédie, quelques années plus tard, mettant de nouveau leur vie en péril. Les exemples sont nombreux de constructions récentes détruites par exemple dans nos montagnes dans des secteurs où glissements et écroulements ont déjà frappé dans le passé.

L'exemple de Roquebillière dans l'arrière pays Niçois (France) en est l'illustration même (Bodelle & Weber, 1981). Le glissement qui s'y est produit en 1926 (Bénévent & Maury, 1927 et Meneroud, 1976), faisant 19 victimes, avait pourtant connu des précédents, notamment lors du fort séisme de 1564 (*cf.* Cadiot, 1979), sans parler de mouvements plus anciens encore.

Sur un autre exemple concernant cette fois-ci la commune d'Aigueblanche en Savoie (France) (cf. Asté & Barfety, 1978), cette perte de mémoire collective s'est faite au bout d'environ une trentaine d'années. Trente années qui ont suffi à faire oublier la destruction d'une habitation en 1937 par une chute de blocs et à reconstruire au même endroit. En 1977, la nouvelle habitation était à son tour détruite par une nouvelle chute de blocs, accompagnée cette fois-ci du décès d'une automobiliste!

Enfin, un des plus tragiques événements illustrant cette perte de mémoire collective, est sans nul doute la catastrophe d'Armero (Colombie, 13 novembre 1985) et ses 20 000 victimes ensevelies sous un "lahar" monstrueux en provenance du volcan Nevado del Ruiz. Elle s'est en effet produite dans des circonstances très similaires, à partir de la même source et au même endroit que deux autres catastrophes survenues en 1845 (1 000 morts) et 1595 (Vié le Sage, 1989 et Mojica *et al.* in Voight, 1990).

### 2.3.1.5. Les facteurs techniques et fonctionnels

Il s'agit de l'ensemble des facteurs qui viennent compromettre la sécurité des personnes en cas de crise. Cela va de certaines déficiences techniques affectant les infrastructures de protection (vices de construction, sous dimensionnement d'ouvrages de protection), aux problèmes d'efficacité des systèmes de prévision, de surveillance, d'alerte, d'organisation des secours, d'évacuation, etc.

Cela englobe aussi des aspects propres à la prévention du risque, tels que les difficultés de communication entre les divers acteurs impliqués (scientifiques, décideurs, journalistes, populations), les problèmes d'information des populations exposées, de fiabilité des méthodes et outils utilisés, de niveau de compétence et de formation des personnels techniques ou scientifiques, etc.

Concernant les difficultés de communication entre scientifiques et décideurs, Velásquez *et al.* (1995) citent l'exemple du glissement survenu sur le quartier de Villatina (Medellin, Colombie, 1988, 500 morts). En effet, alors qu'à cette époque de nombreux experts développaient des méthodes de zonage de l'aléa sur cette ville, l'administration qui assurait le découpage des zones à risque, n'avait pas pris en compte les phénomènes susceptibles de se déclencher hors du périmètre urbanisé et de s'y propager. Il paraît donc important d'explicitier les arguments techniques et scientifiques pour ceux qui prennent les décisions ou qui définissent la législation.

Autre exemple, avec la tragédie d'Armero précédemment citée, qui rappelle avec ses 20 000 victimes que ces problèmes de communication peuvent conduire au pire. En effet, selon Vié le Sage (1989), ces personnes auront payé de leur vie la surdité des autorités en charge de leur protection du fait de dysharmonies constatées dans les relations entre responsables de la protection civile colombienne et scientifiques. Par ailleurs, B. Voight (1990), après une reconstitution des faits, confirme que la tragédie d'Armero a été "la conséquence pure et simple d'une accumulation d'erreurs humaines, résultat de mauvaises appréciations, d'indécisions et d'un aveuglement bureaucratique. Les autorités repoussèrent toute action préventive à la dernière minute, préférant ne pas supporter les coûts d'une évacuation prématurée ou d'une fausse alerte".

Le cas du glissement en cours à Séchilienne, dans le département de l'Isère (France) (cf. Antoine *et al.*, 1987), est un exemple de mauvaise circulation de l'information entre scientifiques et populations exposées, via les médias et les décideurs. En effet, la difficulté pour les scientifiques de se prononcer sur l'occurrence du phénomène, l'absence de véritables scénarios de risque et la retenue des décideurs à s'engager clairement dans une politique de prévention à long terme, ont contribué à générer la psychose d'une catastrophe imminente auprès des populations et du grand public en général.

Une psychose qui a été largement entretenue par les médias, certes, mais souvent sur la base de révélations scientifiques incomplètes et quelque peu maladroites (cf. article de D. Foing, paru dans *l'Événement du Jeudi*, semaine du 3 au 9 juin 1993). Ce constat n'enlève rien au risque réel encouru sur Séchilienne, mais incite à la prudence en matière de vulgarisation de l'information scientifique pour ne point tomber dans le catastrophisme prématuré.

Quant au cas du glissement de la Salle-en-Beaumont (8 janvier 1994, Isère, France, 4 morts), celui-ci pose le problème de la fiabilité des méthodes conventionnelles d'évaluation de l'aléa mouvements de terrain dans les procédures P.E.R., à partir des données et outils dont disposent les experts au moment de l'analyse. La zone glissée avait en effet été classée auparavant en zone de risque nul par les experts, bien que certains signes d'instabilité passées y aient été identifiés (cf. §.4, chap. II).

### 2.3.1.6. Les facteurs institutionnels et politico-administratifs

Ils se surimposent souvent aux facteurs précédents, quand ils n'en sont pas la cause même. Il s'agit des politiques laxistes en matière de prévention et de gestion des risques, des divers blocages institutionnels rendant inopérantes les actions de réduction des risques ou des pressions diverses exercées sur les populations exposées ou bien sur les autorités compétentes.

Autant de facteurs qui sont monnaie courante dans les pays en développement où la gestion des risques naturels et les problèmes environnementaux en général ne sont pas encore devenus des priorités. Certains pays commencent pourtant à affirmer une volonté politique de mise en place de nouvelles stratégies de réduction des risques naturels et de pallier les carences institutionnelles existantes en lançant de nouveaux programmes de planification. C'est le cas par exemple de l'Etat colombien, depuis 1989, avec le lancement des plans P.I.D.E.M., P.A.D.E.M.<sup>5</sup>, du plan opérationnel local d'urgence, des plans de contingence thématique ou sectoriels et du plan sanitaire d'urgence (De Pablos, 1989).

Ces facteurs peuvent aussi jouer dans les pays développés et conduire à des situations d'autant plus aberrantes que bien souvent la planification du risque existe mais qu'elle n'est pas toujours appliquée ou opérationnelle.

Le laxisme dont a fait preuve l'Etat italien suite au glissement de Senise (ville du sud du pays, dans la région de Basilicata) survenu en juillet 1986, en est un exemple. La réparation des dommages et le relogement des personnes n'ayant pu être menés à bien, les gens ont continué pendant plusieurs mois à utiliser les bâtiments, les routes et les services urbains pourtant endommagés tandis que ces dommages s'accroissaient de jour en jour du fait d'une poursuite du glissement et d'une extension de la zone d'instabilité (Alexander, 1991). Pourquoi avoir laissé traîner une telle situation, au risque de s'exposer à de nouveaux dangers, alors même que ce pays a manifestement les moyens de la résoudre, ou du moins de protéger ses citoyens ?

Un autre exemple de négligence concerne la crue meurtrière du Grand Bornand (14 juillet 1987, Haute Savoie, France, 23 morts). Consécutivement à la catastrophe, les autorités françaises ont préféré invoquer la fatalité (cf. J.Chirac, premier ministre de l'époque, *conférence de presse du 16 juillet 1987*) alors même que le risque de crue torrentielle était connu sur cette commune, P.E.R. à l'appui et reconnu par arrêté préfectoral. La négligence de l'Etat a fait que manifestement cet arrêté n'avait pas été pris en compte lors de l'installation du camping où se trouvèrent les victimes du 14 juillet (Vié le Sage, 1989).

<sup>5</sup> P.I.D.E.M., ou "plan intégral de développement urbain de la municipalité de Manizales " qui prend en compte la dimension risque dans les programmes de planification urbaine et P.A.D.E.M. ou "plan intégral pour la prévention des désastres et gestion de crise" qui est un programme pivot dont les 15 projets et 56 activités de mitigation sont liés étroitement aux autres programmes (De Pablos, 1989).

### 2.3.2. La vulnérabilité au sens technique : l'approche quantitative

#### 2.3.2.1. Présentation

Les approches traditionnelles d'évaluation de la vulnérabilité, telles qu'elles viennent d'être illustrées précédemment, reposent sur des protocoles d'analyse mal définis, très variables d'un auteur à l'autre et par conséquent difficilement généralisables ou transposables.

Ce constat est dû à un manque de structuration du concept lui-même et de ses composantes. C'est pourquoi, compte tenu du fait que le but recherché à travers ces approches est de réduire la vulnérabilité, il apparaît nécessaire de mesurer celle-ci en lui donnant un sens beaucoup plus technique que ce qui a pu être fait jusqu'à présent et d'élaborer une **théorie de la vulnérabilité** qui permette de dégager des méthodes d'analyse reproductibles.

Cette théorie de la vulnérabilité s'articule autour de notions relativement nouvelles, qu'il va falloir expliciter. Elle se fonde essentiellement sur la notion d'élément exposé ou vulnérable, à partir duquel il s'agit de mesurer les conséquences potentielles en cas de manifestation d'un phénomène dommageable. Elle définit donc une démarche semi-quantitative, voire quantitative et s'inscrit dans le cadre général de la théorie de la décision exposée au §. 2.2.2.3 du **chapitre I**. En effet, la finalité de l'approche quantitative est d'aider les décideurs à formuler leur politique de prévention, suivant des techniques d'évaluation qui visent à mettre en balance les répercussions de catastrophes potentielles et les coûts entraînés par la réalisation de mesures visant à en limiter les effets.

#### 2.3.2.2. Définition

La définition la plus appropriée pour définir cette vulnérabilité technique, ou *stricto sensu* est la suivante :

*grandeur pouvant être évaluée par le niveau d'endommagement constaté ou potentiel d'un élément exposé donné, soumis à l'action d'un phénomène déclaré ou pressenti, d'intensité donnée.*

Ce niveau sera mesuré par un **taux d'endommagement** compris entre 0 et 1, un dommage nul donnant la valeur 0 et un dommage total la valeur 1. D'un point de vue théorique, il pourra être calculé en référence à la valeur initiale de l'élément exposé, avant endommagement.

Cette définition laisse apparaître les trois notions fondamentales de la vulnérabilité :

- la notion d'élément exposé ;
- la notion d'interaction entre phénomène et élément exposé ;
- la notion de niveau d'endommagement potentiel de l'élément exposé.

C'est sur la base de l'explicitation de ces trois notions que seront développés et structurés en détail dans le **chapitre III**, les premiers fondements d'une théorie de la vulnérabilité.

Cette définition permet de replacer la vulnérabilité dans un contexte théorique de prise de décision et de définition mathématique du risque. Elle correspond, conformément à la formulation analytique proposée dans le §. 2.2.2.1 du **chapitre I**, à la variable **D** de l'équation du risque spécifique.

### 2.3.2.3. Fonction d'utilité

Toujours sur le plan de la théorie de la décision, il n'est pas toujours possible de traduire ce niveau d'endommagement D, ou de conséquences potentielles, en unité monétaire (par exemple pour des dommages environnementaux ou esthétiques). De la même façon, suivant le contexte décisionnel dans lequel on se trouve, un niveau d'endommagement D donné n'aura pas toujours les mêmes répercussions. Par exemple, la possibilité d'apparition de fissures non-réparables sur une habitation pourra être tout à fait tolérable pour un propriétaire qui ne veut pas vendre, alors qu'elle pourra devenir une cause de difficultés de vente, et probablement de dévalorisation du bien, pour quelqu'un qui désirerait s'en séparer. Ces préjudices seront fonction de l'état du marché de l'immobilier au moment de la prise de décision.

Sur le plan probabiliste (Canceill, 1983 et Einstein, 1988) cette variabilité des conséquences en fonction du contexte décisionnel se traduit par ce qui est classiquement appelé **fonction d'utilité**,  $U(D)$ . Celle-ci doit représenter une sorte d'indicateur de l'intérêt attaché à telle ou telle situation et dont les conséquences ne sont pas forcément monétaires.  $U$  représente l'utilité de prendre telle ou telle mesure s'appliquant à un niveau d'endommagement potentiel D.

Dans certains cas complexes, la fonction d'utilité est elle-même le résultat d'un calcul d'espérance mathématique. Canceill (1983) rappelle que cette fonction d'utilité se retrouve dans la bibliographie sous les synonymes les plus divers : fonction de gain ou fonction de perte, fonction de coût, fonction de poids, fonction objectif ou fonction économique.

### 2.3.2.4. Fonctions d'endommagement

Toute la difficulté d'une évaluation de la vulnérabilité réside donc dans l'appréciation de ce que sera le niveau d'endommagement potentiel D recherché.

D'une façon générale et simpliste, le niveau d'endommagement D d'un élément exposé E donné est fonction de la nature, d'une part du phénomène  $\Phi$  impliqué et d'autre part de cet élément exposé E. Soit:

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

Une telle fonction décrivant l'interaction élément/phénomène en terme d'endommagement potentiel est appelée **fonction d'endommagement**, ou par extension, fonction de vulnérabilité.

L'introduction de cette fonction d'endommagement nécessite de distinguer 3 grandes familles d'éléments exposés. Il s'agit :

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

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

- de la fonction d'endommagement structurel, qui s'applique aux biens physiques et qui définit les **dommages structurels** (ou matériels) ;
- de la fonction d'endommagement corporel, qui s'applique aux personnes et qui définit les **dommages corporels** ou **préjudices corporels** ;

- de la fonction d'endommagement fonctionnel, qui s'applique aux activités et fonctions diverses, et qui définit les dommages fonctionnels, ou plutôt **perturbations fonctionnelles** ou **dysfonctionnements**.

Chaque type de fonction d'endommagement est défini par un certain nombre de variables, ou facteurs, que l'on peut classer de la façon suivante (cf. **fig. I.6**) :

- **Fonctions d'endommagement structurel et corporel** : le niveau d'endommagement structurel ou corporel d'un bien matériel ou d'une personne interagissant avec un phénomène est fonction de l'intensité du phénomène, de la sensibilité de ce bien ou de cette personne et de la durée de cette interaction.

Cette fonction peut être étendue à la prise en compte de phénomènes induits, soit directement, soit indirectement par le phénomène d'origine et susceptibles d'entraîner à leur tour des dommages structurels ou corporels. Sa courbe théorique représentative est présentée en **figure I.5** dans le cas de biens structurels.

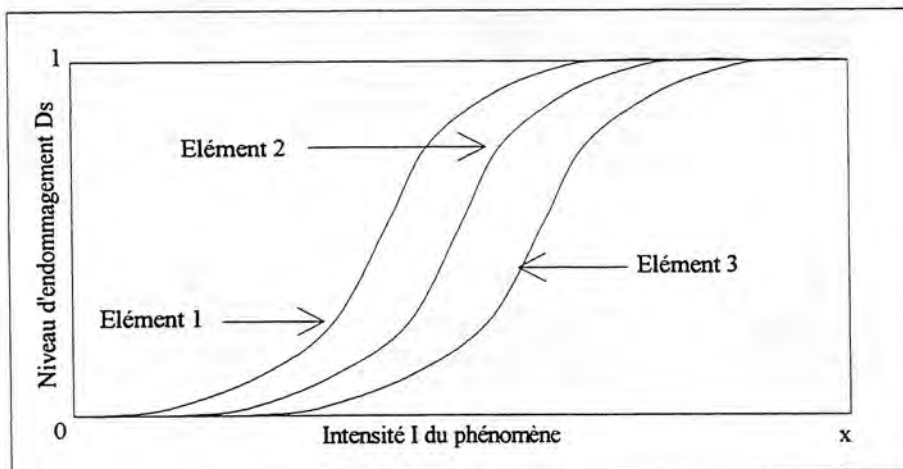


Figure I.5 - Courbes théoriques d'endommagement pour des éléments structurels de résistance croissante de 1 à 3.

- Dans le cas des biens structurels, la sensibilité est généralement définie par des **facteurs de résistance** ou au contraire de fragilité mécanique.

- Dans le cas des personnes, la sensibilité peut se décomposer en sensibilités intrinsèque SI et extrinsèque SE suivant la nature des facteurs qui la définissent :

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

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

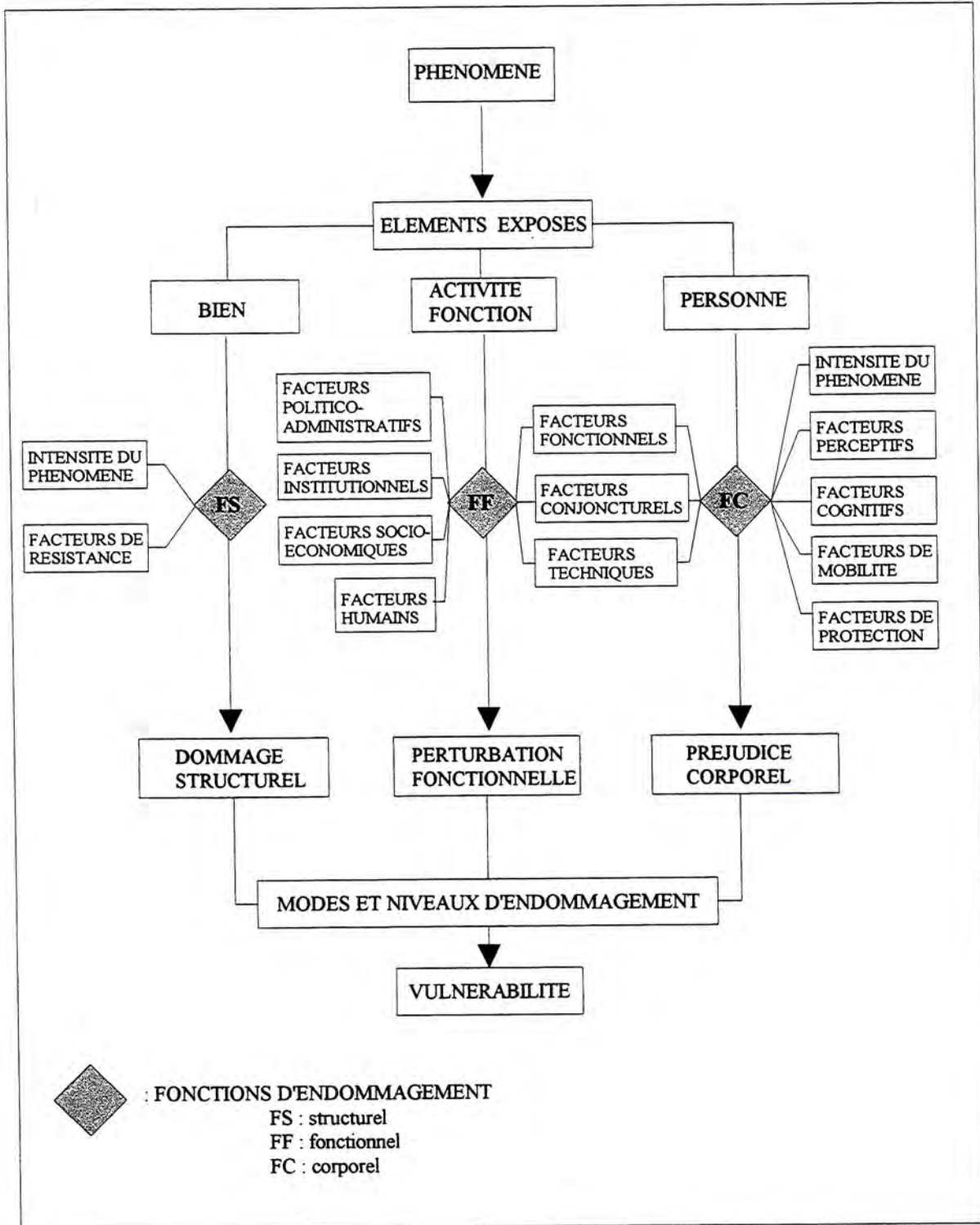


Figure I.6 - Les composantes de la vulnérabilité .



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

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

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

- **Le processus d'endommagement** caractérise l'action préférentielle du phénomène sur l'élément exposé. On peut aussi l'appeler "**sollicitation** apportée par le phénomène". On verra dans le **chapitre III** qu'il en existe plusieurs types pour les phénomènes de mouvements de terrain et que cela peut constituer un nouveau procédé de classification de ces phénomènes.

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

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

Concrètement, en matière de recherche sur le thème de la vulnérabilité, les efforts doivent porter sur les deux notions fondamentales d'intensité du phénomène et de mode d'endommagement des éléments exposés. Conformément aux fonctions d'endommagement décrites précédemment, l'évaluation des dommages corporels et fonctionnels dépend principalement des dommages structurels. Il convient donc d'apporter une attention particulière à la notion d'endommagement structurel. C'est d'ailleurs surtout à ce niveau d'analyse qu'apparaît la spécificité des phénomènes de type mouvements de terrain et donc l'originalité de ce travail de recherche.

En d'autres termes, perfectionner notre connaissance de la vulnérabilité reviendra à compléter progressivement la matrice de correspondance, en terme de mode et niveau d'endommagement, entre types d'éléments exposés et types de phénomènes impliqués. Cette approche, exposée ici de manière formelle, peut tout à fait s'appliquer à d'autres types de phénomènes générateurs de risque.

## 2.4. Notions de gravité et d'acceptabilité du risque

**Gravité** et **acceptabilité** sont deux notions liées qui font traditionnellement partie de la terminologie propre à la gestion de risques. Il s'agit de notions apparemment subjectives variables suivant les contextes socio-économiques et culturels, mais qu'on peut tenter de formaliser à partir de quelques exemples.

### 2.4.1. Gravité d'un événement

Dans un sens commun, la gravité est une grandeur caractéristique de l'ampleur des pertes consécutives à un événement. Pour les spécialistes du risque technologique elle prend un sens plus précis en correspondant "au dommage maximum associé à un accident ou à un danger". Elle est selon Kervern & Rubise (1991), une grandeur à deux dimensions définie par le nombre de victimes et le montant économique des dégâts, ce qui semble à première vue assez restrictif.

En effet, si on prend l'exemple suivant, on s'aperçoit que ces deux critères ne sont pas suffisants pour mesurer cette grandeur : en effet, on a du mal à différencier en terme de gravité, les conséquences de deux tremblements de terre identiques en magnitude (6,9 selon Richter), tels que celui d'Arménie (1988) et celui de San Francisco (1989) ? Le premier entraîna moins de 200 victimes mais pour un coût des dommages de plusieurs centaines de millions de dollars, alors que le second fit 25 000 morts et des dégâts seulement de l'ordre de 1 million de dollars.

On conçoit donc que la gravité des dommages doit s'apprécier sur des échelles de valeurs non seulement économiques, compte tenu notamment du délicat problème de chiffrage monétaire d'une vie humaine, mais à partir d'autres types de valeurs ; celles-là même qui composent la "**dimension cachée du risque**" et que l'on néglige trop souvent. En effet, un événement potentiel pourra avoir un coût, certes monétaire ou humain, mais également de tout autre ordre : par exemple affectif, esthétique, environnemental, etc.

On propose donc d'étendre la gamme de critères permettant de mesurer la gravité et de définir celle-ci **comme une échelle de mesure des dommages quantifiés en terme de pertes**<sup>6</sup>, ces pertes pouvant être de quatre ordres :

- économique direct (pertes en capital) ;
- économique indirect (pertes en revenus) ;
- humain (blessés, morts, etc.) ;
- fonctionnel (personnes privées de logement, d'accès aux services publics, etc. ; personnes subissant un préjudice esthétique, affectif, etc.).

Sur un plan graphique, pour un événement donné, le report de chaque niveau de perte associé sur des axes gradués, permet d'obtenir ce qu'on appellera **l'aire ou surface de gravité** de l'événement en question (**fig. I.7**). Cela permet de comparer visuellement entre eux différents bilans, soit de catastrophes passées, soit de scénarios de risque.

Plutôt que de reporter des valeurs absolues, on peut exprimer ces pertes par un indice, compris entre 0 et 1, calculé par rapport au stock initial de valeurs correspondantes sur la zone soumise à l'**effet direct** du phénomène. On obtient ainsi une appréciation relative des pertes par rapport à une situation d'origine, avant endommagement.

<sup>6</sup> Elle correspond, conformément à la définition analytique du risque global proposée dans le §. 2.2.2.1 du chapitre I, au produit  $D*V$ , avec  $D$  pour niveau d'endommagement potentiel (vulnérabilité *s.s.*) et  $V_i$  pour valeur unitaire initiale des éléments exposés.

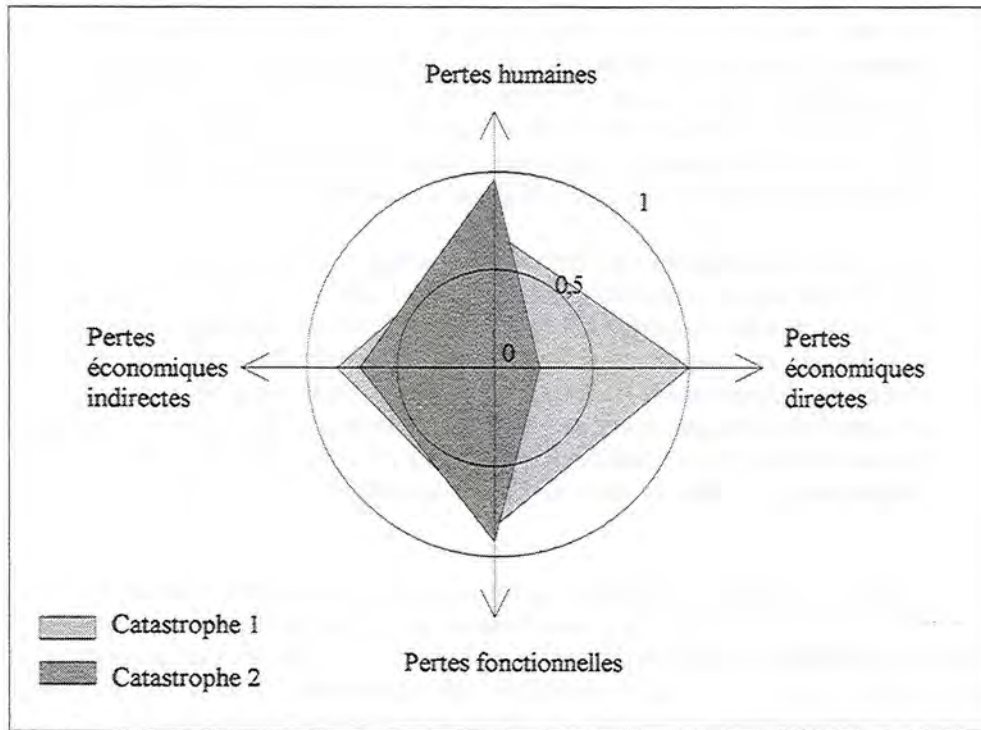


Figure I.7 - L'aire de gravité.

#### 2.4.2. Acceptabilité du risque

De manière théorique, l'acceptabilité, ou le degré de tolérance vis-à-vis d'un phénomène pressenti, est fonction d'une part de la **probabilité**  $P$  de subir des dommages et d'autre part de la **gravité**  $G$  potentielle de ces dommages. Graphiquement, et pour une communauté exposée donnée, cela permet de tracer "un espace du risque encouru" dans lequel "une chute de bloc" et "un écroulement de falaise" par exemple, n'occuperont vraisemblablement pas la même position (fig. I.8a).

On peut y définir trois niveaux distincts d'acceptabilité théorique du risque encouru, pour lesquels la perception de  $G$  semble plus décisive que celle de  $P$  pour entreprendre des actions de réduction adaptées (fig. I.8b):

- Le **premier niveau** correspond à un risque jugé tolérable par la communauté exposée. C'est par exemple le cas de nombreuses communautés vivant dans les pays en développement et qui ont appris à vivre avec des phénomènes dommageables devenus le plus souvent endémiques.

- Il laisse place à un **second niveau** pour lequel le risque devient tolérable sous conditions de prise de mesures de réduction. Celles-ci peuvent être soit "**actives**", soit "**passives**". C'est la configuration la plus souvent rencontrée dans les pays industrialisés compte tenu en particulier de moyens financiers élevés.

- **Les mesures actives** se définissent par des actions directes sur le phénomène et ses causes. Le but en est de réduire la probabilité de manifestation, si celui-ci n'est que potentiel, ou bien l'intensité et l'extension, si au contraire il est déjà déclaré. Cela se traduit le plus souvent par des mesures techniques (travaux de drainage, de terrassement, d'abattage, d'ancrage par exemple pour les phénomènes de mouvements de terrain) (cf. D.R.M., 1985b).

Un des exemples les plus impressionnants est celui du glissement japonais de Jizukiyama survenu en juillet 1985 et qui fit 29 victimes (Sassa, 1988 et Asté, 1991). Son traitement immédiat (dès le deuxième jour) et à grand frais (réhabilitation totale des 25 hectares détruits) par le gouvernement japonais, témoigne du besoin prioritaire de ce pays de reconquérir des espaces vitaux, aussi minimes soient-ils, ainsi que d'un niveau d'organisation élevé face à la gestion des crises.

- **Les mesures passives**, qui peuvent être menées simultanément, visent à limiter les effets potentiels du phénomène, en agissant sur les éléments exposés, soit directement au niveau de leur comportement (par exemple avec des mesures de confortement pour les édifices, ou bien d'information pour les personnes) soit indirectement en les protégeant du phénomène (mesures techniques ou juridiques, par exemple). Les parades techniques sont par exemple couramment employées le long des axes de communication (filets pare-blocs, écrans rigides, tournes, etc.) pour se protéger de phénomènes de chutes de blocs de volumes modérés.

- Enfin, le **troisième niveau** correspond à un risque jugé intolérable. Il se traduit le plus souvent par une fuite ou bien une évacuation préventive de la communauté exposée, compte tenu de l'impossibilité de limiter le phénomène ou bien de s'en protéger. On pénètre dans le champ des mesures de surveillance du phénomène, d'alerte et d'évacuation des populations et d'organisation des secours, c'est-à-dire de toutes les composantes d'une situation de crise. Il s'agit d'une configuration fréquemment rencontrée dans le cas de phénomènes de mouvements de terrain de grande ampleur, pouvant mobiliser des volumes de plusieurs millions de m<sup>3</sup>, lorsque certains signes précurseurs ont pu être identifiés (cf. Asté & Leroi, 1994). Cependant, le passage à cet état de crise peut être plus ou moins progressif, voire organisé, suivant la vitesse d'évolution du phénomène et le niveau de préparation de la communauté exposée.

On peut citer l'exemple du glissement de Séchilienne en France, où l'on se dirige très progressivement vers une évacuation et un relogement des 300 habitants les plus exposés. Ces mesures étant facilitées depuis peu par la prise de nouvelles dispositions réglementaires permettant une indemnisation préventive des victimes potentielles (décret du 2 février 1995).

Dans la réalité, on s'aperçoit que le degré de tolérance vis à vis d'un niveau de risque donné est très variable suivant le contexte socio-économique et culturel de la communauté exposée. Par exemple, une société plutôt fataliste aura tendance à banaliser un risque jugé difficilement supportable par une autre société plus responsabilisée vis à vis de la gestion de ce risque, voire insupportable par une communauté "hyper-protégée" et quelque part un peu déresponsabilisée (cf. **fig. I.8c**).

Une des explications rationnelles, permettant de distinguer ces attitudes, outre la peur de l'événement, est certainement à rechercher dans l'impact psychologique des dommages potentiels et donc dans la valeur que peuvent y accorder ces communautés différentes. La considération la plus démonstrative est celle de la valeur accordée à la vie humaine et qui peut être très variable suivant les sociétés.

L'autre considération est d'ordre organisationnel. Une communauté hyper-structurée et protégée sur le plan juridique, se refuse en général de subir le moindre risque de pertes et se donne les moyens de s'en protéger.

D'un point de vue un peu plus formel, on voit donc qu'un même type de phénomène, susceptible de générer un même niveau de dommages sur deux communautés différentes sur le plan socio-économique et culturel, entraînera un niveau de risque encouru différent, si on considère que la variable "valeur unitaire initiale  $V_i$ " de son expression analytique (cf. §. 2.2.2.1, **chap. I**), devient à son tour une variable socio-culturelle. Le risque devient ainsi une grandeur non seulement virtuelle mais également une **variable socio-culturelle**, d'où des niveaux de perception et d'acceptabilité différents.

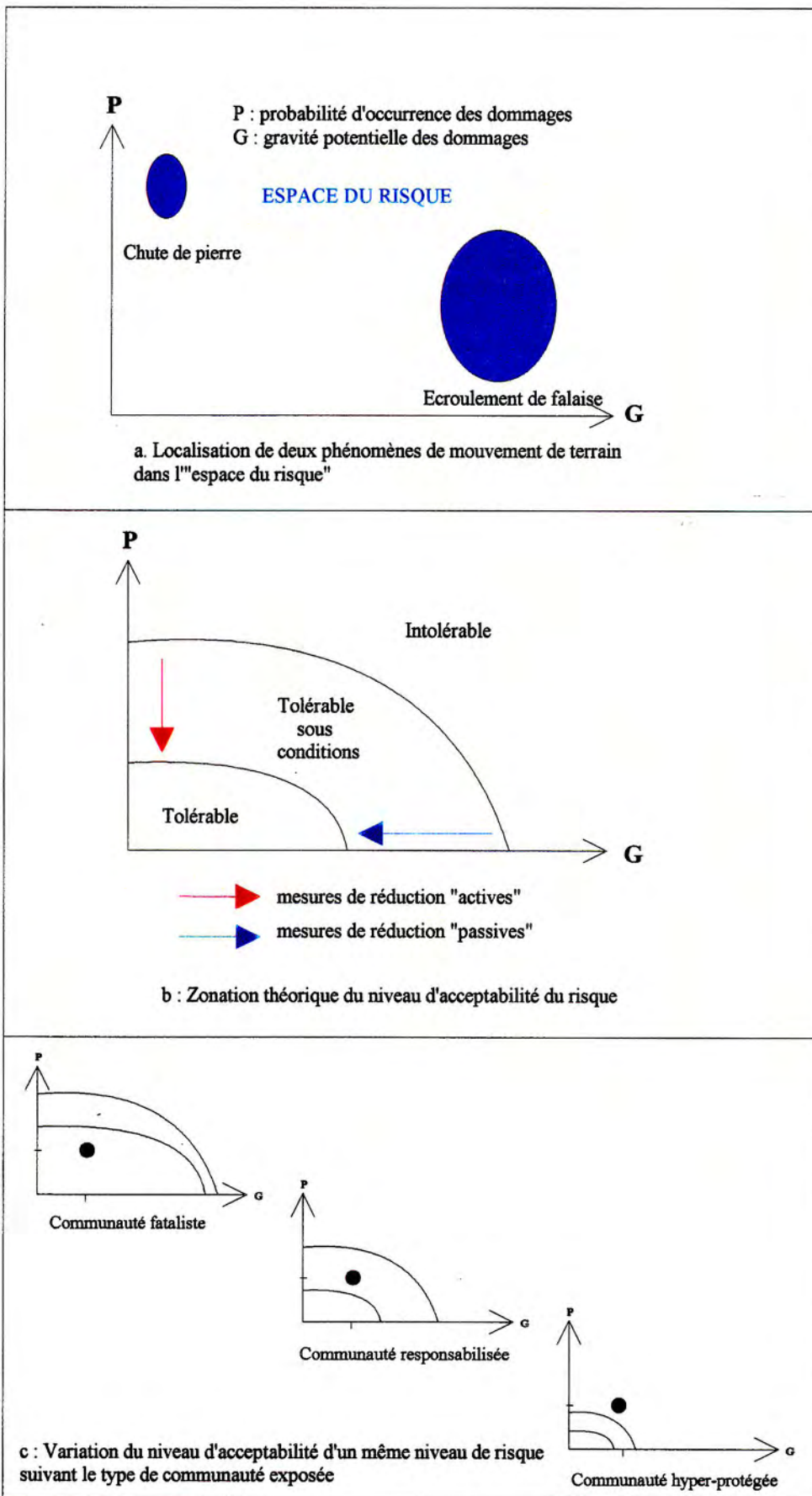


Figure I.8 - Illustrations théoriques de la notion d'acceptabilité du risque.

### 3. Réalités du risque mouvements de terrain

#### 3.1. Présentation

Sous la dénomination commune de "mouvements de terrain", dont les meilleurs équivalents anglo-saxons sont les termes "*ground failures*" et "*mass movements*", on regroupe des phénomènes extrêmement divers et complexes qui impliquent une rupture et un déplacement simultané de matériaux (Flageollet, 1989). Ils correspondent à des mécanismes très variés, affectant des terrains aux propriétés mécaniques différentes, mettant en jeu des volumes allant de quelques m<sup>3</sup> à plusieurs millions de m<sup>3</sup> et créant des dommages de niveau très inégal (Asté, 1991).

Il s'agit de phénomènes fréquents, pouvant être à l'origine d'une évolution discrète ou au contraire provoquer des déplacements en masse ou particuliers. Contrairement à l'opinion reçue, ils s'avèrent souvent meurtriers et le bilan socio-économique de leurs répercussions les place dans la catégorie des phénomènes naturels les plus redoutés. Ils sont de dimension parfois catastrophique et peuvent générer des phénomènes induits tout aussi dévastateurs.

Leur nature même, leur disparité, leur dispersion et leur caractère très aléatoire les rend difficiles à prévoir. Il est donc tout aussi délicat de tenter d'en évaluer les effets potentiels et d'aider ainsi à la perception du risque inhérent, aussi bien auprès des populations exposées qu'auprès des personnes susceptibles de prendre des décisions en matière de gestion de ce risque.

#### 3.2. Des phénomènes variés

##### 3.2.1. Différentes typologies

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, selon une approche naturaliste, mais s'appliquaient le plus souvent à une région et à un type de milieu donnés (Heim, 1882 ; Howe, 1909 ; Reynolds, 1932 et Popov, 1945 par exemple).

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** (Carson & Kirkby, 1972 ; Crozier 1973 *in* Flageollet, 1989 ; Varnes, 1978 ; Hutchinson, 1988 et par exemple), soit **géotechniques** (Hutchinson, 1978 et Sassa, 1985 par exemple), soit **cinématiques** ou **dynamiques** (Millié-Lacroix, 1981 Syrieys, 1984 et Rizzo, 1988 par exemple), soit d'une **combinaison** de plusieurs d'entre eux (Antoine & Giraud, 1994 par exemple).

Dans un souci d'exhaustivité et de simplicité, la classification exposée ci-dessous repose sur une distinction principale d'ordre dynamique, tout en conservant quelques uns des critères précédents. Elle permet de regrouper l'ensemble de ces phénomènes en deux groupes principaux : les mouvements lents et continus et ceux rapides et discontinus.

### 3.2.2. Les mouvements lents et continus

Il s'agit de mouvements entraînant des déformations progressives. Ils correspondent aux phénomènes suivants :

#### 3.2.2.1. Les phénomènes de gonflement-retrait ("*expansive soils*")

Ils correspondent à l'alternance de deux processus : 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. Ce sont les phénomènes de capillarité et surtout de succion qui régissent le comportement et les variations de volume des sols face aux variations de teneur en eau, indépendamment des variations de contraintes extérieures.

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), mais aussi horizontalement (apparition de fissures de dessiccation). En deçà d'une certaine teneur en eau (dite "limite de retrait"), le sol ne diminue plus de volume, les vides du sol perdent leur eau et se remplissent d'air, il se développe des pressions de succion beaucoup plus importantes que dans la phase précédente.

Lorsque le sol argileux partiellement désaturé s'humidifie, il se sature d'abord presque complètement sans changer de volume. Il y a annulation progressive de la succion jusqu'à retrouver sensiblement le volume initial, voire même le dépasser. L'importance de cet éventuel gonflement supplémentaire dépend de divers facteurs, dont la nature de l'argile. Si ce gonflement est empêché, par une construction par exemple, il apparaît une "pression de gonflement" génératrice de dommages (D.R.M., 1992 et Mouroux *et al.*, 1988).

#### 3.2.2.2. Les phénomènes d'affaissement ("*subsidence*")

Ils 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 (résultat d'une dissolution de roches solubles : calcaires, gypses, évaporites, etc.), ou bien artificielles (carrières souterraines, galeries de mines, etc.).

#### 3.2.2.3. Les phénomènes de tassement ("*settlement, subsidence*")

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 par exemple) 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. Par suite de surcharge, surtout localisée, il peut aussi s'accompagner, pour des terrains à très fort indice de plasticité, d'un fluage : expulsion plastique du terrain hors de la zone soumises à contrainte.

#### 3.2.2.4. Les phénomènes de reptation ("*superficial creep*")

Il s'agit des phénomènes d'instabilité les plus uniformément répandus. A divers degrés, ils affectent de manière significative la plupart des pentes d'une déclivité avoisinante ou excédant 20°. Ils sont en général pratiquement invisibles mais peuvent être révélés par certains indices de surface.

Ils relèvent d'un mécanisme de déplacement cyclique vers l'aval des particules et granules constituant le sol meuble de couverture, sous l'effet conjugué de la gravité et du gonflement du sol par l'action gélodégel, ou dans une moindre mesure, des variations de saturation en eau (pression interstitielle et forces de percolation).

L'épaisseur de la couche concernée dépend du climat (ensemble des facteurs climatiques annuels), de la couverture végétale et nivale et de la coupe pédologique et géologique du terrain. Elle varie dans le temps, pour un même milieu, ce qui implique que l'importance des déplacements décroît progressivement avec la profondeur. L'épaisseur de la tranche de terrain couramment concernée est de l'ordre du mètre.

Les déplacements annuels provoqués par la reptation sont très faibles : 1 à 10 mm/an selon le climat et la couverture végétale : 1 à 2 mm/an en zones humides-tempérées avec couvert végétal bien développé et 5 à 10 mm en zones semi-arides à faible couvert végétal.

### 3.2.2.5. Les phénomènes de solifluxion ("*solifluction, flowslide*")

Il s'agit d'un fluage de la couche superficielle subsaturée en eau et qui se produit généralement sur un sous-sol peu perméable ou imperméable. Le cas le plus courant est celui d'un sous-sol gelé au printemps ou d'un pergélisol.

Il s'agit donc de phénomènes typiques des climats tempérés. Ils peuvent se produire sur des pentes même faibles (5 à 10°). Ils affectent plus particulièrement des sols à faible cohésion, à caractère gélif, dont ils détruisent totalement le peu de cohésion (en cela la solifluxion n'est pas un phénomène de fluage au sens strict).

L'épaisseur de la tranche concernée est faible : de 2 à quelques décimètres, jusqu'à 1 mètre. Elle varie selon les époques, pour un même lieu. Le déplacement est donc maximum en surface et dégressif avec la profondeur, comme pour le phénomène de reptation, avec lequel d'ailleurs il n'y a pas de frontière bien claire.

Le mécanisme de la solifluxion s'apparente à une coulée très lente, le sol franchissant provisoirement sa limite de liquidité. Elle aboutit au remaniement total et lent des matériaux et ne comporte pas de surface de glissement au sens strict. Elle peut toutefois comporter une surface de rupture contrairement à la reptation.

La vitesse est faible (quelques centimètres par année) mais peut être plus importante dans certains contextes de sol et de climat. Les mouvements sont surtout saisonniers (printemps et périodes de pluies).

Morphologiquement, la solifluxion se traduit par une série de lobes emboîtés de dimension métrique à décimétrique, de hauteur décimétrique. Ces lobes sont d'autant plus étirés que la vitesse est plus importante.

La solifluxion aboutit à la destruction rapide du sol ou entrave sa formation, de même que celle du tapis végétal. Inversement, un tapis végétal bien formé limite considérablement l'importance et les effets de ce phénomène.

### 3.2.2.6. Les phénomènes de glissement pelliculaire ou superficiel

Il s'agit de phénomènes très fréquents en zones tempérées, à morphologie assez caractéristique en "peau d'orange". Ces phénomènes affectent la couverture meuble terreuse, colluviale et éluviale (d'altération rocheuse ou morainique), sur des pentes relativement fortes (20° et plus), avec ou sans couverture végétale.

Morphologiquement il se forme une multitude de bourrelets de petite taille (environ 1 m de haut), distants de quelques mètres. Le tapis végétal ou herbeux n'est que peu ou pas affecté par ces phénomènes.

Le mécanisme est mal connu, probablement composite entre de multiples phénomènes de glissement plus ou moins rotationnels localisés et des phénomènes de reptation. Il peut donc exister une surface de rupture à la base, contrairement aux cas précédents, accompagnée toutefois d'un certain fluage de la masse mobile avec déplacement maximum en surface.

L'épaisseur de la tranche instable est couramment de 1 à 2 mètres. Les vitesses annuelles sont faibles : quelques centimètres à 1-2 cm/an en régions alpines.



### 3.2.2.7. Les phénomènes de fluage ("*soil creep, flowage creeping*")

Ils correspondent à un cas particulier de déformation qui intervient lorsqu'une charge est maintenue pratiquement constante durant un temps prolongé. La propriété du fluage est de permettre la déformation lente d'un matériau sans atteindre les limites de résistance mécanique, donc sans rupture du matériau.

On distingue le fluage liquide pour les corps à comportement visqueux, pour lesquels les déformations tendent vers l'infini pour un temps infini, et le fluage solide pour les corps solides, lorsque, pour un temps infini d'application de la contrainte, les déformations tendent vers une valeur finie.

Les sols à faible cohésion peuvent avoir un comportement proche du visqueux, par remaniement (déformation) à l'échelle du squelette intergranulaire, tandis que les sols à forte cohésion (sols argileux) ont un comportement proche du fluage solide (fluage au cisaillement).

Les mouvements se révèlent toujours localisés sur un ou plusieurs niveaux.

Le phénomène de fluage est également associé à certains types d'instabilités : reptation, solifluxion, glissements superficiels et surtout au poinçonnement.

### 3.2.2.8. Les phénomènes de tassement de versant ("*gravitational sagging, mass creep, deep-seated creep*")

Il s'agit de déformations lentes de versants rocheux. Dans tous les cas une dilatance horizontale est produite par la disparition d'une butée latérale et se traduit par un affaissement d'une partie du massif. Ceci engendre la présence d'un escarpement sommital, comparable à celui des glissements. Toutefois, le bourrelet basal correspondant est généralement absent.

Dans le cas de massifs homogènes mais fracturés, c'est l'intrication des blocs par ouverture progressive des discontinuités qui est la cause principale de l'affaissement.

Lorsque le massif comprend des formations hétérogènes incluant des niveaux plastiques, la cause doit être recherchée dans le fluage de ces derniers : on parle alors de phénomènes de poinçonnement.

### 3.2.2.9. Les phénomènes de poinçonnement ("*punching*")

Il s'agit donc d'une variante du phénomène précédent. Cela se traduit par un enfoncement très lent par effet gravitaire, d'éléments d'une formation massive, rigide et fracturée, dans une formation sous-jacente sujette au fluage, telle que des argiles, des marnes peu indurées, des phyllites et des craies. Ces phénomènes apparaissent dès qu'il y a discontinuité dans la formation massive superposée, que ce soit par fracture ouverte traversant le banc, ou "boudinage" du banc dur.

Le poinçonnement s'accompagne souvent d'un glissement lent des quartiers de roche massive, partiellement dû au fluage de leur support, parfois à des glissements rotationnels par surcharge. Il peut s'en suivre un basculement parfois brutal des blocs ou panneaux rocheux.

### 3.2.2.10. Les phénomènes de fauchage des couches ("*rocktopple, toppling*")

Il s'agit aussi de phénomènes de déformation lente de versants rocheux à rapprocher dans certains cas des phénomènes de tassement de versant affectant des massifs homogènes. Le fauchage se distingue par le fait qu'il désigne un mouvement avec gradient de déplacement entre la surface et la profondeur dans des formations géologiques présentant une forte anisotropie plus ou moins verticale. Cela se traduit par un basculement vers l'aval, par gravité, des têtes de couches rocheuses.

Ce phénomène est omniprésent sur les versants contraires, quelle que soit l'ampleur du plongement des couches. Il se produit aussi sur les versants conformes, lorsque les couches sont fortement redressées.

Il ne se développe pas ou très peu lorsque les couches sont perpendiculaires ou nettement transversales au versant.

Le fauchage atteint couramment quelques mètres à quelques dizaines de mètres d'épaisseur. Il atteint parfois 100 à 200 m et même plus. Une grande épaisseur de la tranche fauchée est significative de l'ancienneté du modelé d'un versant.

Phénomène très lent, le fauchage évolue souvent en petits tassements et éboulements dans les roches grossièrement litées, en tassements et glissements lents de dimensions et de profondeur limités dans les formations plus schisteuses.

### 3.2.2.11. Les phénomènes de glissements rotationnels ("*rotational slip, slump*")

C'est le cas théorique idéal, pris en compte par la plupart des méthodes de calcul de stabilité. Ces méthodes considèrent une section bidimensionnelle du glissement, sur laquelle la surface de rupture théorique est une portion de sphère.

La surface de rupture sphérique est la seule qui permette un mouvement d'un volume de matériaux par rapport à l'ensemble (le massif) d'où ils sont issus sans aucun remaniement interne ; c'est donc le mode de rupture qui nécessite l'énergie la plus faible. C'est la raison pour laquelle de très nombreux glissements se rapprochent plus ou moins de ce cas théorique.

Le glissement rotationnel parfait (surface de rupture sphérique) n'est possible que dans le cas d'un terrain parfaitement homogène et isotrope jusqu'au delà des limites de la rupture.

Toute modification de propriété des matériaux au voisinage de la rupture (conditions aux limites) engendre une modification de cette forme. Cette modification de propriété peut être due à la présence d'un volume ou d'un niveau plus résistant ou au contraire plus faible ; ou à la présence de matériaux dont les propriétés modifient les conditions hydrogéologiques. Cette modification des conditions aux limites peut aussi être due à la topographie.

Ces types de glissement se caractérisent par des dimensions et des volumes limités. Ils sont rares dans la nature mais assez fréquemment artificiellement provoqués. Ils affectent principalement les formations meubles à forte cohésion, non stratifiées et peu litées, à base d'argiles et de limons, telles que les dépôts glaciaires, glacio-lacustres, morainiques ou lacustres.

Si le mécanisme même du glissement n'engendre pas, ou très peu, de remaniement des matériaux dans la masse glissée, ce remaniement a cependant toujours lieu, dans un deuxième temps, dans ce qu'il est convenu d'appeler le pied du glissement, dès que celui-ci franchit l'émergence aval de la 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, qui 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.).

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, crevasses et replats successifs de la zone médiane et par les bourrelets de freinage et d'accumulation de la zone ventrue de pied.

Les glissements rotationnels 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.

Beaucoup de glissements naturels s'amorcent selon un mécanisme rotationnel, puis évoluent selon des mécanismes complexes ou hybrides, où la surface de glissement rotationnelle est relayée par une surface translationnelle parfois continue sur de grandes distances, ou par un glissement plan.

### 3.2.2.12. Les phénomènes de glissements translationnels ("*translational slide*")

On regroupe sous ce terme tous les glissements relevant d'un mécanisme complexe. Ils sont les plus fréquents en tant que phénomènes naturels. Leurs dimensions sont quelconques, des plus modestes ou plus gigantesques.

Du fait de la complexité de leur mécanisme, ces glissements peuvent comporter non pas une, mais deux, voire trois surfaces de glissement superposées, et même davantage. On les dénomme parfois aussi "glissements composites".

### 3.2.2.13. Les phénomènes de glissements plans (en planche, en plaque, couche sur couche) ("planar slide, block slide, slab slide, sheet slide")

Ce sont tous les glissements qui se produisent à la faveur d'une surface de discontinuité, de faiblesse, de rupture préexistante.

Cette surface peut être un niveau argileux ou argilo-limoneux de la couverture meuble ; la surface de contact entre la couverture meuble et le bedrock lorsque celle-ci est régulière (surface de la couche, plan de schistosité, etc.) ; un niveau schisteux ou argilo-marneux ou 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 de ces glissements sont de loin les glissements couche sur couche. De ce fait, les glissements plans concernent surtout le massif rocheux. Ce sont les glissements classiques des versants conformes, c'est-à-dire des versants taillés parallèlement à la structure dominante du massif rocheux, soit la stratification, soit la schistosité.

Dans le cas des glissements couche sur couche, la rupture est presque toujours rendue possible ou facilitée par la présence d'un deuxième ou de plusieurs autres systèmes de dislocation : décrochement, faille, un ou plusieurs systèmes de fractures ou de diaclases, de schistosité secondaire. La rupture peut aussi être provoquée par l'amincissement d'un ou de plusieurs horizons résistants, ou par leur disparition. Le rôle de l'eau est très important également pour ce type de glissement : lubrification, effet sur les argiles, sous-pressions, forces de percolation.

Leurs dimensions sont très variables : de quelques m<sup>3</sup> jusqu'aux glissements géants de retrait glaciaires tels que celui de Flims aux Grisons (Suisse) et ses 12 milliards de m<sup>3</sup> (Heim, 1932 *in* Courel & Delaunay, 1980).

La vitesse de ces phénomènes de glissement, qu'ils soient rotationnels, composites ou plans, est variable : en général de quelques millimètres à quelques décimètres par an. C'est la raison pour laquelle on les a classés dans ce paragraphe. Néanmoins, en phase paroxysmale, ils peuvent progresser à des vitesses beaucoup plus élevées (quelques décimètres à quelques mètres par jour), voire instantanées : c'est en particulier le cas pour les glissements plans de type couche sur couche en massif rocheux. On peut citer par exemple ceux du Claps (1442, Drôme, France) (Flageollet, 1989), de Goldau (1806, Suisse) (Heim, 1932 et De Saussure, 1806 *in* Courel & Delaunay, 1980) qui se sont déclenchés en quelques secondes et que l'on pourrait donc rattacher au paragraphe suivant.

### 3.2.3. Les mouvements rapides et discontinus

Il s'agit de mouvements dont la genèse résulte d'une rupture brutale suivie d'un déplacement très rapide des matériaux mobilisés. On peut les scinder en deux groupes, selon que le mode de propagation des matériaux s'effectue en phase solide ou sous forme plus ou moins fluide.

#### 3.2.3.1. Les phénomènes d'effondrements ("subsidence")

Ce sont des déplacements verticaux instantanés de la surface du sol qui résultent de la rupture brutale de cavités souterraines préexistantes, naturelles ou artificielles (mines, carrières). Ils peuvent correspondre au stade définitif d'évolution de certains phénomènes d'affaissement.

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.

Les cavités naturelles sont le plus souvent formées du fait de la dissolution des roches en place (calcaires, gypse, anhydrite, évaporites) par des circulations d'eau souterraine (réseaux karstiques, grottes, gouffres).

Lorsque ces cavités atteignent le toit du substratum rocheux, et que celui-ci est placé sous couverture de terrains meubles, ceux-ci peuvent s'engouffrer assez brusquement ou progressivement dans la cavité, créant un effondrement en surface qui prend plus ou moins la forme d'un entonnoir : c'est la doline d'effondrement, bien connue dans les massifs gypseux, et l'emposieux des régions calcaires jurassiennes.

Lorsque la cavité souterraine ne communique avec le toit du "bedrock" que par une ouverture de taille restreinte, a fortiori lorsque l'épaisseur de la couverture meuble est importante, la manifestation en surface sera retardée et souvent progressive. A l'opposé, lorsque la cavité souterraine aboutit à un effondrement soudain du toit du bedrock, la manifestation en surface sera plus ou moins instantanée, selon l'épaisseur de la couverture meuble.

Le volume de la doline en surface ne permet pas de présager du volume de la cavité souterraine qui peut être bien plus importante, ni de sa position qui peut être liée à des réseaux tectoniques. Celle-ci peut de ce fait être décalée par rapport à l'axe de la doline.

Plus rarement, et de la même façon que pour les phénomènes d'affaissement, ces cavités souterraines naturelles peuvent se former par phénomène de suffosion, c'est-à-dire par l'entraînement des fractions fines d'une formation meuble par des écoulements souterrains.

Pour ce qui est des cavités souterraines artificielles, les processus de dégradation sont engagés le plus souvent dès le début de l'exploitation.

Dans les carrières de gypse, les effondrements sont le plus généralement localisés. Ils se déclenchent soit au carrefour des galeries par désolidarisation du massif : des bancs de gypse du toit tombent, ce qui donne naissance à "un ciel tombé" puis à une "cloche de fontis" qui remonte vers la surface par suite de l'éboulement des terrains marneux, marno-calcaires et sableux constituant le recouvrement ; soit par effondrement des piliers du fait de deux mécanismes de ruine de ces piliers qui sont la rupture en raison d'une fracturation importante préexistante, et la fissuration, écaillage, réduction de la section et écroulement par suite d'un excès de contraintes. A leur venue, les désordres sont alors dénommés "fontis" (Thorin, 1994).

### 3.2.3.2. *Les phénomènes de chutes de pierres, de blocs, d'écroulements et éboulements rocheux ("rock fall")*

Ils 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<sup>3</sup>) ou des blocs (volumes supérieurs à 1 dm<sup>3</sup>) qui tombent isolément ou en groupe, et 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.

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", pour la distinguer des éboulis plus organisés, à pente régulière, constitués de fragments détachés principalement par les effets du gel et du dégel, qui tombent sporadiquement et individuellement, suivant les saisons (Flageollet, 1989). Ce terme d'éboulement peut aussi être réservé à des écroulements de volume limité : quelques centaines à quelques dizaines de milliers de m<sup>3</sup>.

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, ou bien de l'écroulement d'une masse à la suite d'une extraction à la base de la paroi ou du versant. Le célèbre écroulement d'Elm (1881, canton de Glaris, Suisse, 115 morts) répond à ce dernier cas de figure : il a été préparé pour partie par des extractions d'ardoises en pied de massif (Heim, 1932 in Flageollet, 1989).

Quand les volumes mis en jeu deviennent considérables, on rattache généralement ces phénomènes à la catégorie suivante.

### 3.2.3.3. les phénomènes d'éboulements d'extension catastrophique ("rock fall avalanche, rock slide avalanche, rock avalanche, rockslide")

On regroupe sous cette appellation relativement récente (Courel & Delaunay, 1980) des phénomènes complexes, d'ampleur exceptionnelle et qui se caractérisent par la succession de plusieurs modes de déplacement. Ils peuvent comporter des analogies morphologiques avec des phénomènes de glissement ou d'effondrement rocheux, mais ils en diffèrent par les volumes mobilisés (supérieurs à la dizaine de millions de m<sup>3</sup>) ; par l'énergie mise en jeu, par des vitesses de propagation très élevées (de plusieurs centaines de km/h) ; par des extensions peu ordinaires (de plusieurs kilomètres) souvent en terrain plat, voire ascendants et par des conséquences le plus souvent désastreuses (cf. **tab. I.1**).

Le mécanisme de la rupture permet d'en distinguer deux grandes catégories :

- Les **écroulements rocheux catastrophiques** : ils correspondent à l'arrachement brutal et au déplacement rapide par gravité d'un très important volume de roche.

Les mécanismes de genèse et de propagation n'obéissent à aucun des modèles applicables aux mouvements classiques. Lorsque ces écroulements dépassent un certain volume, il se produit "un comportement collectif" de la masse en mouvement, qui arrive à s'écouler comme un fluide.

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 n'existe pas ou de manière très limitée dans les éboulements, qui explique les distances de transport considérables des plus grands écroulements connus tels que celui d'Elm (1881, Suisse) (Courel & Delaunay, 1980), celui du Mont Granier (1248, France) (Pachoud, 1990) et ceux du Mont Huascarán (1962 et 1970, Pérou) (Dollfus & Penaherrera, 1962 ; Plafker & Ericksen, 1978 et Usselman, 1994).

L'intégration d'eau à la masse écroulée (y compris sous forme de neige et de glace), soit au départ, soit à partir de la surface de transit, peut encore accroître cette distance de transport. Le mécanisme le plus souvent avancé pour expliquer cette hypothèse est celui de la vaporisation de cette eau : la chaleur, engendrée par le frottement à la base de la masse glissée, n'a pas le temps de se dissiper et la température doit largement y dépasser 100 °C. L'eau se vaporise alors et avant que cette vapeur ne puisse s'échapper, la masse en mouvement peut s'acheminer sur un véritable coussin de vapeur, réduisant considérablement le frottement. Cette hypothèse reste actuellement sujette à controverses.

Par contre un très violent déplacement d'air peut être engendré par ces grands écroulements.

- Les **glissements rapides catastrophiques** : ils peuvent être assimilés aux grands écroulements rocheux tant pour leurs causes que pour leurs effets. Ils en diffèrent seulement par le mécanisme, qui reste un mécanisme de glissement sur la surface de rupture pendant la plus grande partie, voire toute la durée du phénomène.

La dislocation de la masse glissée est soit moins totale, soit moins tardive, n'intervenant qu'en fin de l'événement, pendant la phase de dépôt des matériaux.

La vitesse atteinte par la masse peut atteindre 100 km/h et même davantage comme dans le cas du glissement de Lower Gros Ventre (1925, Wyoming, U.S.A.) avec 180 km/h (Alden, 1928 et Voight, 1978). La surface du corps même du glissement peut cependant être partiellement préservée de la destruction. Un déplacement d'air très violent et destructeur accompagne généralement ces phénomènes.

Date Nom Localisation	Nature	Cause	Volume en millions de m <sup>3</sup>	Distance parcourue en km	Vitesse en km/h	Durée	Effets directs	Effets indirects
Interglaciaire Flims Grisons (Suisse)	glissement plan	retrait glaciaire	12 000	10	-	-	-> obstruction de deux vallées	-
> 10 400 ans Saidmarrech, (Iran)	glissement plan	-	19 000	14	-	-	-	-
24/11/1248 Mt Granier Savoie (France)	écroulement rocheux	précipitations	500	7,5	-	-	2000 à 5 000 morts	-
30/09/1513 Biasca Tessin (Suisse)	écroulement rocheux	précipitations	10-20	3	-	-	Destruction partielle de Biasca -> obstruction de rivière	--> rupture de la retenue (100 hm <sup>3</sup> ) le 20/05/1515 : 600 morts
02/09/1806 Goldau Rosserberg (Suisse)	glissement plan écroulement	précipitations	30-40	4,5	-	-	457 morts	-
11/09/1881 Elm Glaris (Suisse)	écroulement rocheux	exploitations en pied de versant	10-11	2,3	300	50 sec.	destruction du village 116 morts	-
23/06/1925 Lower Gros Ventre Wyoming (U.S.A.)	glissement plan rocheux	réactivation d'un ancien glissement par précipitations et neige	40	3,5	80-180	3 mn	-> obstruction de rivière	--> rupture de la retenue (60 hm <sup>3</sup> ) le 18/05/1927 : 6 morts
09/10/1963 Vajont Friul (Italie)	glissement plan	mise en eau de la retenue du barrage de Vajont	250	0,4	70-110	< 1 mn	-> vidange instantanée de la retenue par une vague déferlante (30 hm <sup>3</sup> ) : 2 117 morts	-
31/05/1970 Mt Huascarán Yungay (Pérou)	écroulement- avalanche de roches, de neige et de glace	séisme de magnitude 7,7	50-100	16	270-360	3,5 mn	23 000 morts	-
25/04/1974 Mayunmarca Rio Mantaro (Pérou)	glissement- coulée	réactivation d'un ancien glissement (érosion fluviale)	1 000	8,25	130 (moy.) à 150-200 (max.)	3 mn	450 morts -> barrage du rio Montaro	--> débâcle
28/07/1987 Mt Zandila Valtellina (Italie)	écroulement rocheux	précipitations	33-40	3	250	30 sec.	-> obstruction de la rivière Adda et formation d'une retenue de 17 hm <sup>3</sup>	--> raz de marée du à la vidange artificielle de la retenue : 27 morts et destruction de 5 villages
14/12/1991 Mt Cook (Nouvelle Zélande)	écroulement - avalanche de roches, de glace et de neige	altération	50-60	7,3	300	70 sec.	-	-

Tableau I.1 - Caractéristiques de quelques grands écroulements rocheux et glissements rapides d'extension catastrophique historiques.

#### 3.2.3.4. les phénomènes de coulées de débris ("*debris slides, debris flows, earthflows, rock flows, debris avalanches*")

On peut regrouper sous cette appellation tous les phénomènes d'instabilité de pente avec rupture brusque plus ou moins instantanée, avec ou sans surface de glissement. La rupture peut se produire dans les matériaux déjà instables (en glissement latent), ou dans des matériaux initialement en place, qu'il s'agisse de la couverture meuble ou du massif rocheux.

Ce sont donc des phénomènes plus ou moins rapides et destructeurs avec déplacement important des matériaux accompagné d'un remaniement plus ou moins total de ceux-ci.

La rupture peut-être - ou non- liée à une surface de glissement, mais le déplacement ultérieur des matériaux débord largement de la surface de rupture et n'est plus caractérisé par une surface de glissement.

La distinction entre ces différents phénomènes repose sur la nature des matériaux (notamment la courbe granulométrique et la cohésion), et sur l'importance de la fraction liquide.

Les phénomènes qui se produisent à partir de formations rocheuses bien lithifiées, en place ou préalablement disloquées sont les "*debris slides*" (sans eau ou avec fraction liquide non-significative) et les coulées de débris proprement dites ("*debris flows*") (avec fraction liquide importante).

Ce sont des phénomènes mécaniquement peu caractérisés, 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, bien que des valeurs dépassant 20 m/s aient été signalées (Sauret, 1987). Le volume de matériaux concerné reste relativement limité, en règle générale inférieur au million de m<sup>3</sup>, encore que certains glissements géants puissent être assimilés à des coulées de débris extrêmement rapides ("*sturzstrom*"), comme à Mayunmarca au Pérou en 1974 (cf. **tab. I.1**).

Les formations superficielles modérément cohésives (couverture terreuse, colluvions, moraine altérée) peuvent donner lieu à des glissements rapides et destructeurs au cours desquels le remaniement des matériaux est important mais non total, avec formation d'une multitude d'îlots de matériaux plus ou moins intacts : ce sont les "*earthflows*" des anglo-saxons. Selon la quantité d'eau disponible, la pente et l'importance du transport, ces glissements peuvent dégénérer partiellement en coulées boueuses.

#### 3.2.3.5. Les phénomènes de coulées boueuses ("*mudflow, debris flows*")

D'une manière générale, il s'agit de la mise en mouvement de matériaux sans cohésion - ou l'ayant perdue dès la mise en mouvement - 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 la couche superficielle terreuse, de colluvions fines, d'éluvions fins, de moraines diverses, mais aussi de roches argilo-limoneuses ou schisteuses décomposées (par d'anciens glissements ou par éluvionnement), de régolites, voire d'éboulis 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. Dans ces deux derniers cas, le mélange eau-matériaux intervient au cours du transport.

Les coulées boueuses liées à des résurgences d'eau souterraine ou à des concentrations d'eau de ruissellement sont de loin les plus fréquentes. Cependant elles peuvent se produire également comme phénomène secondaire d'un glissement de terrain. Un glissement peut aussi dégénérer en coulée.

La vitesse de ces coulées est variable : elle dépend du type de matériaux, de la quantité d'eau, de la viscosité de l'ensemble, de la pente, du volume, de l'état de saturation en eau du sol sur lequel transite la masse, etc. Les vitesses courantes se situent entre 1 et 30 km/h. L'ampleur du parcours dépend beaucoup, outre la morphologie du terrain, de la perméabilité de celui-ci et de son état de saturation en eau.

Il existe un type particulier de coulée boueuse, propre aux reliefs volcaniques actifs et que l'on dénomme **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, et surtout aux cendres fraîchement déposées, sans cohésion. L'eau peut être fournie, soit par des concentrations d'eau de ruissellement suite à des pluies violentes, soit par la fonte de la neige et de la glace en amont, consécutivement à une reprise de l'activité volcanique (cas de la catastrophe d'Armero, en Colombie, en 1985, sur les pentes du volcan Nevado del Ruiz), soit par la condensation de nuages de vapeur émis par le volcan, ou soit par l'éjection d'un lac de cratère. Les distances parcourues par ces lahars peuvent être considérables : jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres (cf. Neall, 1976).

### 3.2.3.6. *Les phénomènes de laves torrentielles*

Il s'agit de phénomènes d'écoulement particuliers typiques des régions montagneuses où les bassins torrentiels présentent de fortes pentes. Ils se forment par enrichissement subit et considérable du débit d'un torrent en matériaux solides qui accroissent très fortement son pouvoir érosif.

L'enrichissement initial en matériaux solides du cours d'eau peut être dû : à une série d'arrachements des berges provoqués par une crue du cours d'eau ; à un ruissellement généralisé du bassin versant amenant une forte charge solide constituée essentiellement de limons, suite à de fortes pluies ; ou bien à la vidange subite d'un lac glaciaire ou d'une poche d'eau sous-glaciaire (cas de la catastrophe de Saint-Gervais, en 1892, dans le département français de la Haute-Savoie ; Moret, 1992).

Le processus ainsi amorcé s'amplifie selon une réaction en chaîne par arrachement de matériaux sur les berges du torrent, provoquant de nouveaux glissements avec obstructions successives et phénomènes d'embâcle-débâcle, puis affouillement et déstabilisation accrue des berges.

Le processus ne prend fin que par tarissement des apports d'eau. Il peut cependant diminuer d'intensité quand le lit du torrent atteint le fond rocheux en place.

Par rapport aux autres coulées, ces laves torrentielles se distinguent morphodynamiquement par le transport de blocs pouvant atteindre de très grosses tailles ( jusqu'à 200 m<sup>3</sup> pour celle de Saint-Gervais, en 1892), par une concentration solide élevée (80 à 90 % du volume), des vitesses fortes (1 à 10 m/s) (Coussot, 1994), des débits élevés et des volumes considérables : par exemple jusqu'à 3 millions de m<sup>3</sup> pour la lave torrentielle de Pontamafrey (Savoie, France) en 1965 (Goguel, 1968 *in* Sauret, 1987), ou bien 300 000 m<sup>3</sup>, dont un tiers déversé en 24 heures pour celle du torrent de la Ravoire près de Bourg-Saint-Maurice (Savoie, France) en 1981 (Flageollet, 1989).



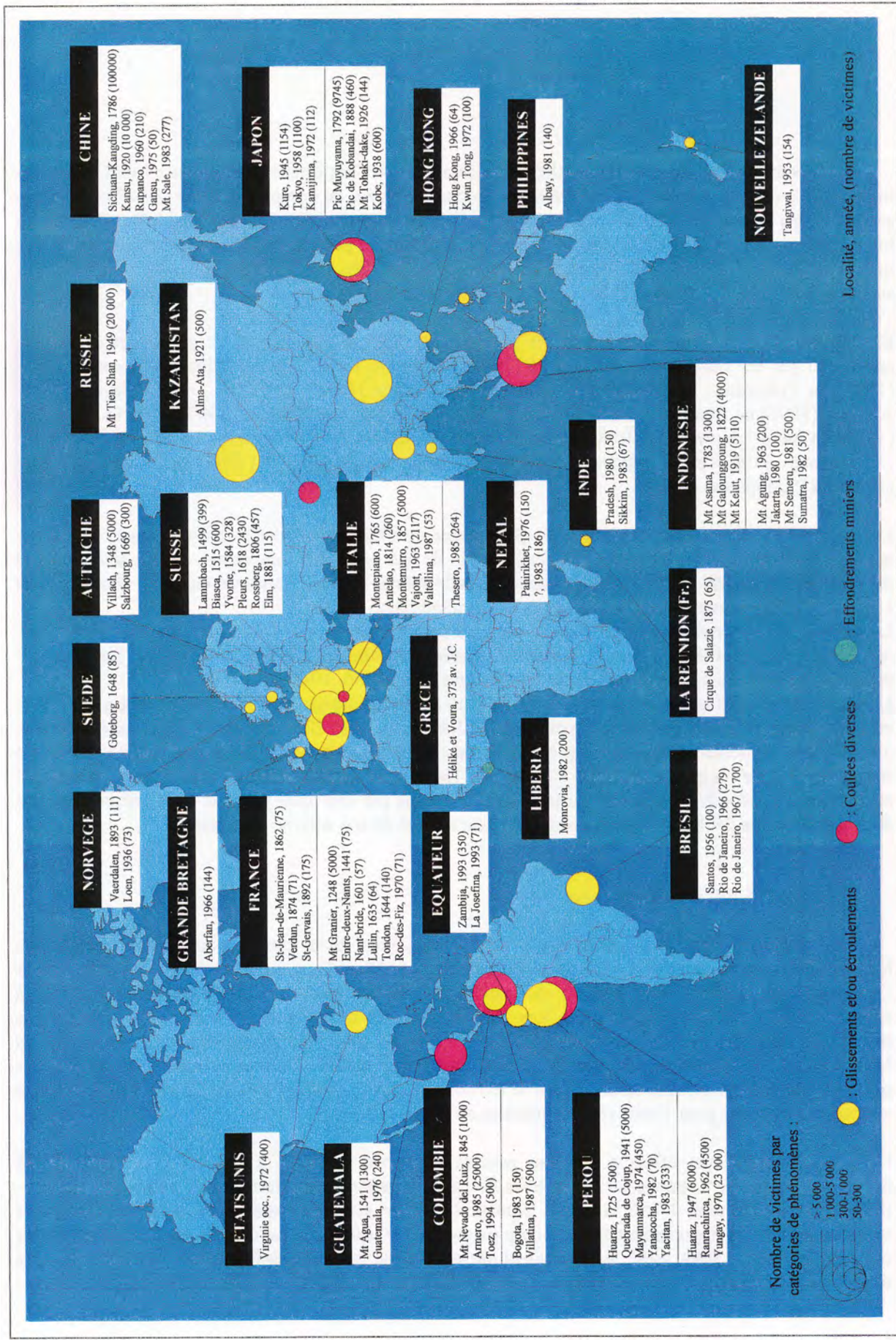


Figure I.9 - Bilan mondial des catastrophes de type mouvements de terrain ayant entraîné plus de 50 victimes.

### 3.3. Des effets dommageables

#### 3.3.1. Sur le plan humain

##### 3.3.1.1. Bilan mondial

L'examen des grandes catastrophes passées atteste de l'importance des pertes en vies humaines imputables à des phénomènes de mouvements de terrain. Ainsi, en comptabilisant à l'échelle mondiale seulement les catastrophes historiques ayant provoqué au minimum 50 victimes (**fig. I.9**), on arrive au bilan approximatif de **253 000** personnes tuées du seul fait de phénomènes de mouvements de terrain depuis le milieu du XIII<sup>e</sup> siècle, plus exactement 1248, date de la catastrophe du Mont Granier survenue en France (*cf.* Berlioz, 1987).

Environ **113 000** victimes sont à déplorer pour le seul XX<sup>e</sup> siècle, marqué en particulier depuis les années 80 par les catastrophes de Bogota (1983), d'Armero (1985), de Villatina (1987) et de Toez (1994) en Colombie ; de Yanacocha (1982) et de Yacitan (1983) au Pérou ; de Zambija et de la Josefina (1993) en Equateur ; de Monrovia (1982) au Libéria ; de Thesero (1985) et de la Valtellina (1987) en Italie ; de Pradesh (1980) et de la région du Sikkim (1983) en Inde ; de Jakarta (1980), du Mont Semeru (1981) et de Sumatra (1982) en Indonésie ; du Mont Sale (1983) en Chine et d'Albay (1981) au Philippines.

Les phénomènes de coulées diverses et de glissements ou d'écroulements d'extension catastrophiques y apparaissent comme étant les plus meurtriers, du fait de leur extension importante, de leur soudaineté et de leur forte intensité. Néanmoins, certains effondrements miniers, tels que celui de Monrovia au Libéria en 1982, peuvent s'avérer être tout aussi dramatiques.

L'événement catastrophique historique le plus meurtrier correspond à la multitude de glissements induits en 1786 dans la province du Sichuan-Kangding-Louding en Chine par un séisme. Environ 100 000 personnes périrent du seul fait de ces glissements (Flageollet, 1989).

Les deux principales catastrophes liées à l'effet d'un seul phénomène, sont celles de Yungay au Pérou en 1970 (environ 23 000 morts) et d'Armero en Colombie en 1985 (25 000 morts). La première fut liée à une coulée de débris générée par un écroulement de roches et de glace déclenché par un séisme de magnitude 7,7 sur les pentes du Mont Nevados de Huascarán. Les victimes y furent ensevelies sous 10 m de boue. La seconde fut générée par un "lahar" alimenté par une fonte partielle de la calotte glaciaire du Mont Nevados del Ruiz, consécutivement à une reprise de son activité volcanique.

##### 3.3.1.2. Bilan national

La France n'est pas épargnée par ces phénomènes, bien que la plus grande catastrophe historique de ce type remonte à 1248 avec l'écroulement du Mont Granier en périphérie du Massif de la Chartreuse (département de la Savoie) qui provoqua l'anéantissement de 5 villages (environ 2 000 à 5000 victimes) (*cf.* Pachoud, 1990). Les siècles suivants ont également connu des événements meurtriers, mais dans des proportions plus limitées. Néanmoins, on recense depuis l'événement du Mont Granier, 9 catastrophes de plus de 50 victimes (environ 800 victimes au total) causées par des phénomènes de mouvements de terrain sur le territoire français, contre 6 pour la Suisse (4 300 victimes au total) et de même pour l'Italie (8 300 victimes au total).

Un bilan plus complet effectué sur une période comprise de 1441 à nos jours fait état de 38 événements meurtriers connus sur le territoire français, départements et territoires d'outre-mer compris. Ils ont entraîné au total 1 055 victimes, dont 458 pour le seul département de la Haute-Savoie qui s'impose comme le département français le plus touché (*cf.* **tab. I.2**). Le dernier événement meurtrier remonte à janvier 1994 avec le glissement de terrain de la Salle-en-Beaumont, survenu dans le département de l'Isère (4 victimes) (*cf.* §. 4, **chap. II**).

Date	Nature et localisation du phénomène	Nombre de morts
1248	Eroulement du Mt Granier (Savoie)	2 000 à 5 000
1441	Eroulement de l'Entre-deux-Nants (Haute-Savoie)	75
1584	Eroulement de Meillerie (Haute-Savoie)	4
1601	Eroulement de Nant-Bride (Haute-Savoie)	57
1635	Eroulement et débâcle de Lullin (Haute-Savoie)	64
1644	Eroulement de Tondon (Alpes-Maritimes)	140
1715	Eroulement de Fontaines-Grésard-l'Etrable (Haute-Savoie)	39
1751	Eboulement du dérochoir des Fiz (Haute-Savoie)	6
1783	Coulée boueuse de Boussages (Haute-Savoie)	14
1812	Lave torrentielle des Eaux-Mortes (Haute-Savoie)	2
1849	Lave torrentielle du Fier (Haute-Savoie)	1
1855	Lave torrentielle de la Fillière (Haute-Savoie)	1
1862	Lave torrentielle de St-Jean-de-Maurienne (Savoie)	75
1874	Lave torrentielle de Verdun (Ariège)	71
1875	Glissement du Grand-Sable (cirque de Salazie) (La Réunion)	65
1888	Lave torrentielle de Brevon (Haute-Savoie)	2
1892	Lave torrentielle de St-Gervais (Haute-Savoie)	175
1895	Lave torrentielle du Bochard (Haute-Savoie)	13
1926	Glissement-coulée de Roquebillière (Alpes-Maritimes)	28
1927	Glissement de Feternes (Haute-Savoie)	5
1930	Glissement de Fourvière-Lyon (Rhône)	40
1932	Glissement de Cours d'Herbouville-Lyon (Rhône)	30
1952	Glissement de Menton (Alpes-Maritimes)	11
1961	Effondrement de Clamart (Hauts-de-Seine)	21
1963	Eboulement de Plan-du-Var (Var)	3
1970	Glissement-coulée du Roc-des-Fiz (Isère)	71
1971	Eroulement de falaise d'Auvers-sur-Oise (Val-d'Oise)	1
1977	Chute de bloc sur route à Aigueblanche (Savoie)	1
1977	Glissement de Cours d'Herbouville-Lyon (Rhône)	3
1980	Glissement du Grand-Ilet (cirque de Salazie) (La Réunion)	10
1983	Glissement de la Gare SNCF de Bourgoin (Isère)	1
1983	Glissement de Châteaudun (Eure-et-Loir)	3
1985	Glissement de Pellautier (Hautes-Alpes)	1
1986	Chute de bloc sur route reliant Bourg-St-Maurice à Val-d'Isère (Savoie)	4
1987	Glissement d'Huahine (Tahiti)	10
1989	Chute de bloc sur route du Diois (col du Rousset) (Drôme)	2
1991	Effondrement de Chanteloup-les-Vignes (Yvelines)	1
1993	Glissement sur voie ferrée de Sarras (Ardèche)	1
1994	Glissement de la Salle-en-Beaumont (Isère)	4

Tableau I.2 - Bilan des victimes de phénomènes de mouvements de terrain sur le territoire français de 1248 à nos jours.

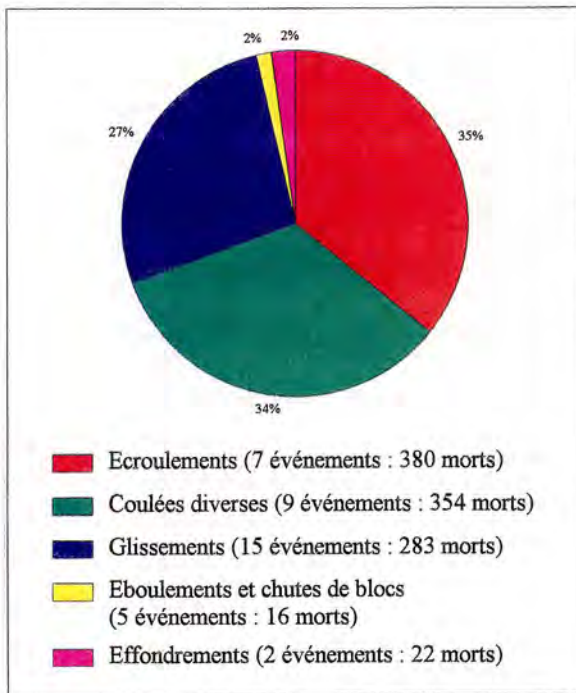


Figure I.10 - Distribution relative des victimes de mouvements de terrain en France de 1441 à nos jours, par type de phénomène impliqué.

Les écroulements, le plus souvent de dimension catastrophique, y apparaissent comme les phénomènes les plus fréquemment meurtriers (54 morts en moyenne par événement répertorié), suivis des coulées (laves torrentielles et coulées de boue avec 39 morts en moyenne), des glissements (19 morts en moyenne), des effondrements (11 morts en moyenne) et des éboulements localisés ou chutes de blocs (3 morts en moyenne par événement) (cf. fig. I.10).

D'un point de vue historique (cf. fig. I.11), depuis l'écroulement du Mont Granier, la France a été particulièrement frappée par des catastrophes majeures au cours de la première moitié du XVI<sup>e</sup> et au début du XVII<sup>e</sup> siècle (1601, 1635, 1644 et 1715) ; puis tout au long de la seconde moitié du XIX<sup>e</sup> et le début du XX<sup>e</sup> siècle (1862, 1874, 1875, 1892, 1926, 1930 et 1932).

Le dernier événement catastrophique remonte au glissement-coulée du sanatorium du Roc-des-Fiz survenu le 16 avril 1970 en bordure du plateau d'Assy dans le département de la Haute-Savoie (71 morts) (cf. Jail & Vivian, 1971 et Debelmas, 1990). Au cours des trois dernières décennies, le territoire français a été relativement épargné par des phénomènes de mouvements de terrain aussi meurtriers, du moins en métropole, car les territoires d'outre-mer ont pour leur part connu deux glissements relativement graves : ceux d'Huanine à Tahiti et du Grand-Ilet à La Réunion, en 1987 et 1980, qui firent 10 victimes chacun.

La période comprise entre 1441 et 1715 est celle des grands écroulements meurtriers alpins. Ils ont été largement relatés par les naturalistes de l'époque et demeurent sans équivalents contemporains. Leur origine n'est pas toujours bien claire ; certains auteurs (*in* Dacher, 1990) mettent quelques uns d'entre eux en relation avec une activité sismique (celui de Lullin en 1635 par exemple), mais cela reste à confirmer.

Le XIX<sup>e</sup> siècle a été essentiellement endeuillé, surtout dans sa deuxième moitié, par des phénomènes de laves torrentielles (8 des 9 événements meurtriers recensés) pour la plupart localisés dans les Alpes (département de la Haute-Savoie). Cela semble correspondre à l'importante évolution climatique qui a caractérisé cette période, marquée par une nette amélioration des conditions météorologiques (fin du petit âge glaciaire), une augmentation des précipitations et un recul généralisé des glaciers (débâcle glaciaire). La lave torrentielle de Saint-Gervais (1892), a par exemple été générée par la vidange d'une poche d'eau sous-glaciaire issue du glacier de Tête Rousse dans le massif du Mont-Blanc.

Ceci dit, le déclenchement de ces phénomènes semble aussi lié à l'intense déboisement qui a sévi au même moment dans ces régions, mettant à nu des versants entiers de montagnes (Dacher, 1990) et favorisant ainsi les écoulements et l'érosion de sols.

Le XX<sup>e</sup> siècle a été marqué pour sa part surtout par des catastrophes mettant en cause des phénomènes de glissements de terrain, parfois d'origine anthropique, du fait de modifications des conditions d'équilibre du milieu naturel sous l'effet d'aménagements intempestifs (glissements de Fourvière et de Cours d'Herbouville à Lyon en 1930 et 1932, par exemple).

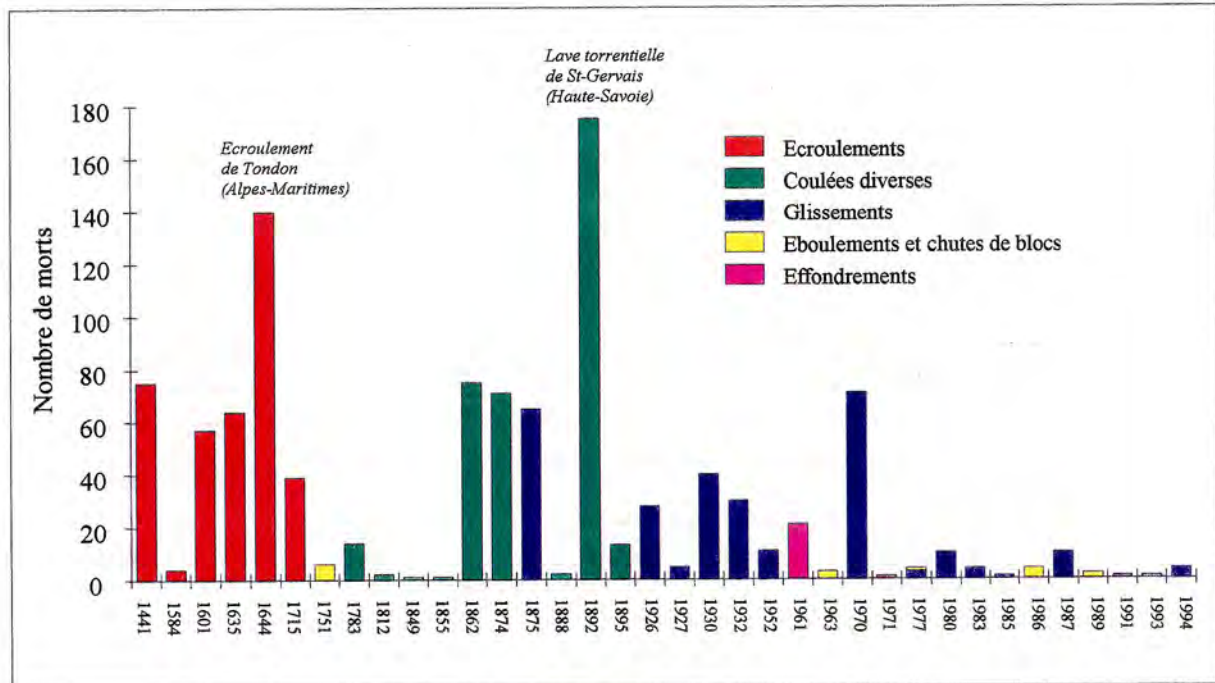


Figure I.11 - Historique des phénomènes de mouvements de terrain meurtriers français, de 1441 à nos jours (cf. tab. I.2).

### 3.3.2. Sur le plan économique

Les phénomènes de mouvements de terrain sont à l'origine de conséquences dommageables, soit directes sur les biens et équipements, soit indirectes sur les activités.

L'évaluation des pertes économiques associées reste néanmoins délicate, faute de données statistiques suffisantes. On peut cependant remarquer que les coûts des sinistres occasionnés par ces phénomènes varient dans une fourchette de un à dix mille, certains événements majeurs pouvant avoir un impact économique très lourd, comme en témoigne les exemples du **tableau I.3**.

Additionnés, les mouvements de terrain sont si largement répandus dans certains pays ou si fréquents en certains points de leurs territoires qu'ils peuvent se placer au premier rang des phénomènes destructeurs en terme de coûts économiques.

C'est le cas par exemple aux Etats Unis, où d'après des estimations officielles datant de 1985 (Committee on Ground Failure Hazards, 1985), le coût annuel des mouvements de terrain y était évalué à 1 à 2 milliards de dollars. Pour la période 1925-1975, ces phénomènes ont par exemple entraîné dans ce pays des pertes économiques presque quatre fois supérieures à celles cumulées des inondations, des tempêtes, des tornades et des séismes (20 milliards contre 75 milliards de dollars).

Nature et localisation de l'événement	Date	Nature des dommages	Coût des dommages matériels
Lave torrentielle de Saint-Gervais Département de Haute-Savoie France	12/07/1892	- 175 morts - nombreuses destructions	18 millions de francs français 1993 (Moret, 1992)
Affaissement généralisé de Santa Clara County Etat de Californie Etats Unis	Depuis 1900	- dommages au bâti et aux réseaux	131 millions de dollars U.S. 1979 (Fowler, 1981)
Coulée de boue du Rio Reventado Cité de Cartago Costa-Rica	09/12/1963	- 20 morts - destruction de 300 habitations	3,5 millions de dollars U.S. (Mora, 1991)
Glissement d'Abbotsford Est Région de Dunedin Nouvelle Zélande	08/08/1979	- 69 maisons détruites ou menacées	250 000 dollars U.S. pour l'Etat (Flageollet, 1989)
Lave torrentielle du torrent de la Ravoire Département de Savoie France	31/03/1981	- destruction de routes, de ponts, etc.	50 millions de francs français (Flageollet, 1989)
Affaissement de Saint-Nicolas Meurthe-et-Moselle France	Depuis 1982	- endommagement de 25 maisons (200 menacées)	22 à 25 millions de francs français (Ledoux, 1989)
Glissement de Senise Région de Basilicata Italie	26/07/1986	- 8 morts et 3 blessés - 9 bâtiments effondrés	2,5 millions de dollars U.S. (Alexander, 1991)
Glissement et lac induit de la Valtellina Vallée de Pola, Alpes Italie	27/07/1987	- 53 morts et 110 blessés - destruction de deux villages	3 milliards de dollars U.S. (Alexander, 1991)
Glissement et rupture de retenue induite de Pisque Région de Guayllabamba Equateur	02/01/1990	- destruction d'un pont, de cultures et de deux maisons	1 million de dollars U.S. (Asanza <i>et al.</i> , 1991)
Glissement, lac et rupture de retenue de la Josefina Région de Cuenca Equateur	29/03/1993	- 71 morts - destruction d'habitations, de terres agricoles, d'infrastructures diverses ( <i>cf.</i> §. 2, chap. II).	147 millions de dollars U.S. (C.R.E.A., 1993)

Tableau I.3 - Exemples de coûts de dégâts matériels consécutifs à des phénomènes de mouvements de terrain.

En Espagne, une estimation du coût national global des dégâts occasionnés par les phénomènes géologiques sur une période comprise entre 1986 et 2016, place la catégorie des phénomènes de mouvements de terrains (phénomènes d'expansion de sols compris) en troisième position, avec une fourchette de coûts annuels oscillant entre 30 milliards (hypothèse minimale) et 33 milliards (hypothèse maximale) de pesetas (I.G.M.E., 1987 et Gonzales de Vallejo, 1988).

En France, une démarche similaire réservée aux seuls phénomènes de mouvements de terrain, fournit une estimation grossière du montant national annuel des dommages comprise entre 300 et 500 millions de francs (Asté, 1986). Elle repose sur une extrapolation effectuée à partir du coût de quelques événements types et a le mérite de distinguer plusieurs catégories de phénomènes de mouvements de terrain affectés chacun d'une fréquence annuelle d'apparition (cf. tab. I.4).

Une autre étude a permis d'évaluer pour le seul département du Var, ce montant à 70 millions de francs environ, pour la décennie 1978-1987 (Ledoux *et al*, 1990).

Enfin, un examen critique des causes géotechniques d'origine anthropique tiré de quelques 304 éboulements traités de 1959 à 1989 dans les Alpes-Maritimes (secteur privé seulement), fait état d'un préjudice économique partiel (seulement 52 cas chiffrés) de 65,5 millions de francs, soit 1,4 millions de francs théoriques par accident (plus de 30 villas ou bâtiments détruits) (Rivière, 1990).

TYPE DE MOUVEMENT	FREQUENCE ANNUELLE APPARITION	FOURCHETTE COUT DOMMAGES (kF)		VALEURS RETENUES (kF)		EXEMPLES	TOTAL (kF)	
		de	à	basse	haute		bas	haut
<b>ECROULEMENTS</b>								
Chutes de pierres	1,00E+03	0,00E+00	1,00E+03	2,00E+01	4,00E+01	Dévoluy	2,00E+04	4,00E+04
Chutes de blocs	1,00E+02	1,00E+01	1,00E+03	2,00E+01	1,00E+02	Sevoie	2,00E+03	1,00E+04
Chutes de falaises	1,00E+01	2,00E+01	1,00E+04	1,00E+02	1,00E+03	Montagny	1,00E+03	1,00E+04
Événement exceptionnel	1,00E-02	5,00E+04	1,00E+06	1,00E+05	2,00E+04	Val d'Isère Diois Granier Nantua	1,00E+03	2,00E+03
<b>GLISSEMENTS</b>								
Rupture telus	1,00E+03	1,00E+01	1,00E+02	2,00E+01	5,00E+01	Routes	2,00E+04	5,00E+04
Rupture ample	1,00E+02	1,00E+02	1,00E+03	2,00E+02	5,00E+02	Labégude, St Péray	2,00E+04	5,00E+04
Rupture très ample	1,00E+01	1,00E+03	3,00E+04	5,00E+03	1,00E+04	Trévoux, Pradon	5,00E+04	1,00E+05
Événement catastrophique	1,00E-02	5,00E+04	1,00E+06	1,00E+04	2,00E+05	Roquebillières	1,00E+03	2,00E+03
Fluage	1,00E+01	1,00E+03	1,00E+04	2,00E+03	4,00E+03	Salins, Toulon	2,00E+04	4,00E+04
<b>EFFONDREMENTS</b>								
liés à exploitation	1,00E+01	1,00E+03	1,00E+04	3,00E+03	4,00E+03	Réservoirs Le Havre	2,00E+04	4,00E+04
liés à dissolution	1,00E+01	1,00E+03	1,00E+04	3,00E+03	4,00E+03	Hop. Châteaufarine Valhauquès	3,00E+04	4,00E+04
<b>AFFAISSEMENTS</b>								
	1,00E-01	5,00E+04	1,00E+06	1,00E+05	2,00E+04	Lons le Saunier Châteaudun	1,00E+04	2,00E+04
<b>COULEES DE BOUE</b>								
	1,00E+01	1,00E+03	1,00E+03	3,00E+03	5,00E+03	Boulc Pontamadrey	3,00E+04	5,00E+04
<b>EROSION TORRENTIELLE</b>								
	1,00E-01	1,00E+02	1,00E+03	3,00E+02	5,00E+02		3,00E+03	5,00E+03
<b>EROSION LITTORALE</b>								
	1,00E-01	1,00E+03	3,00E+04	3,00E+03	5,00E+03	Biarritz Pays de Caux Bonifacio	3,00E+04	5,00E+04
<b>TOTAL ARRONDIS</b>							3,00E+05	5,00E+05
							Soit 300 à 500 MF	

Tableau I.4 - Tentative d'approche globale du coût annuel des phénomènes de mouvements de terrain en France (d'après Asté, 1986).

Une tentative d'évaluation de l'impact économique global (coûts directs et indirects) reposant sur des approches micro- et macro-économiques sera présentée dans le §. 3.3 du chapitre II. Elle concerne les conséquences d'une multitude de mouvements de terrain apparus dans la région du Diois (département de la Drôme, France) consécutivement aux fortes intempéries qui ont affecté ce secteur montagneux au cours de la première semaine de l'année 1994.

### 3.4. L'importance des phénomènes induits

Les mouvements de terrain de grande ampleur sont souvent à l'origine de phénomènes induits, souvent plus graves que le mouvement lui-même. Il s'agit dans la majorité des cas de phénomènes hydrauliques d'inondations et d'ondes de submersion consécutifs soit à une obstruction d'un cours d'eau en fond de vallée, soit à la chute d'une masse de terrain dans une retenue d'eau artificielle ou naturelle.

#### 3.4.1. Obstruction de cours d'eau en fond de vallée

Le barrage d'un cours d'eau situé en fond de vallée peut se produire lorsque le mouvement de terrain mobilise un volume important, le plus souvent de l'ordre de plusieurs millions de m<sup>3</sup> (cf. **tab. I.5**). L'eau s'accumule alors en arrière de la retenue et inonde la vallée à l'amont. Lorsque le niveau de la retenue atteint le sommet du barrage naturel, il peut se produire une rupture partielle ou totale de celui-ci et la vidange accélérée du lac de retenue. Il s'agit du phénomène de submersion ("*overflowing*" en anglo-saxon). La débâcle qui s'en suit 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 et qu'elle est constituée de matériaux fins ou saturés d'eau (30 mn par exemple, lors du glissement rocheux de l'Huascarán au Pérou en 1970) ; ou au contraire plusieurs mois ou années plus tard (44 jours par exemple, suite au glissement de Mayunmarca au Pérou en 1974). La rupture peut être provoquée, outre l'"*overflowing*", par les forces de percolation en cas d'infiltration excessive dans le barrage, lorsque la masse est très perméable. Elle peut être totale. Dans ce cas, toute la masse du barrage est emportée, ou bien limitée à un chenal plus ou moins profond.

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. En effet, sur 63 cas étudiés par Schuster *et al* (1986), la rupture est survenue en moins d'une journée pour 22% et dans les 10 jours suivant le glissement pour 50% d'entre eux.

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 m<sup>3</sup>), a créé un lac de retenue permanent de 53 km de long et 284 m de profondeur.

La catastrophe de la Josefina survenue en Equateur au printemps 1993 et qui sera décrite dans le §. 2 du **chapitre II**, constitue un bel exemple d'enchaînement de phénomènes destructeurs induits les uns des autres et ayant pour origine l'obstruction d'un fond de vallée par un glissement de terrain.

En France, quelques cas d'obstruction de fond de vallée se sont produits dans le passé, mais dans des proportions beaucoup plus limitées, si ce n'est le cas du glissement du col de la Madeleine dans la vallée de la Maurienne (200 à 250 millions de m<sup>3</sup>) ou bien celui du dérochoir d'Assy dans la vallée de l'Arve (20 millions de m<sup>3</sup>). Le **tableau I.6** en dresse les principales caractéristiques.

Notons au passage que deux glissements français particulièrement préoccupants, ceux de Séchilienne dans la vallée de la Romanche et de la Clapière dans la vallée de la Tinée, présentent un risque latent de produire une obstruction des vallées qu'ils occupent. Celui de la Clapière a d'ailleurs fait l'objet de mesures préventives par la réalisation d'un tunnel hydraulique destiné à vidanger toute retenue d'eau potentielle (Follaci, 1992 et Gout, 1994).



Date, nature et localisation, du phénomène d'origine	Volume mobilisé en millions de m <sup>3</sup>	Caractéristiques du barrage et du lac de retenue	Caractéristiques de la rupture et de l'onde de submersion
1391 Glissement du Mt Pertusio (vallée de Varaita) Italie		- permanent ?	
23/06/1925 Glissement de Lower Gros Ventre (rivière Gros-Ventre) Wyoming U.S.A.	40	- temporaire - barrage de 1,5 km de long, 70 m de haut - lac de 5 km de long	- vidange partielle de 60 millions de m <sup>3</sup> deux ans plus tard le 18/05/1927
1951 Glissement d'Antrona (vallée d'Ossola) Italie		- permanent ?	
08/1959 Glissement de Madison Canyon Montana U.S.A.	21,4	- permanent ?	
23/04/1960 Glissement de Lupazzo (rivière Secchia) Italie	13	- permanent ? - lac de 200 ha	
31/0/1970 Avalanche de roche et de glace de l'Huscaran (rio Santa)	50	- temporaire	- vidange progressive 30 minutes plus tard
25/04/1974 Glissement rocheux et coulée de débris de Mayunmarca (rio Mantaro) Pérou	1 000	- temporaire - barrage de 3,8 km de long et 150 m de haut	- vidange 44 jours plus tard - vague déferlante de 20 m de haut jusqu'à 100 km à l'aval - vitesse initiale de la vague de 15 à 30 km/h
19/03/1978 Glissement de Piota (vallée de Piota) Italie		- temporaire ?	
28/07/1987 Glissement de la Valtellina (vallée de l'Adda) Italie	33-40	- permanent - barrage de 2 800 de long, 55 à 75 m de haut - lac de 16 à 17 millions de m <sup>3</sup> - vidange partielle par pompages puis par construction de deux tunnels hydrauliques - consolidation définitive du barrage	
02/01/1990 Glissement de Pisque (rio Pisque) Equateur	3,6	- temporaire - barrage de 450 m de long, 60 m de large et 58 de haut - lac de 2,5 millions de m <sup>3</sup> , 45 m de profondeur, 2,6 km de long	- vidange à 60 %, 24 jours plus tard le 26/01/1990, entre 10h et 13h30 - débit de pointe de 700 m <sup>3</sup> /s
18/04/1991 19/04/1991 09/05/1991 Ecoulements successifs de Randa (vallée de Mattertal, rivière Vispa) Suisse	15 0,1 18	- temporaire - vidange par pompage puis par creusement d'un tunnel hydraulique de 6,5 m de diamètre, 3,6 km de long.	
24/11/1991 Ecoulement de Valbiore (vallée de Masino) Italie	0,06	- temporaire ? - barrage de 25 m de haut	
31/03/1993 glissement de la Josefina (rios Paute et Jadan) Equateur	28	- temporaire - barrage de 100 m de haut, 500 m de large et 1 100 m de long - lac de 200 millions de m <sup>3</sup>	- rupture 33 jours plus tard le 01/05/1993 - vidange à 85 % - débit de pointe de 10 000 m <sup>3</sup> /s - charge solide de 13 millions de m <sup>3</sup>

Tableau I.5 - Quelques cas étrangers d'obstruction de cours d'eau en fond de vallée par un phénomène du type mouvements de terrain.

Date, nature et localisation, du phénomène d'origine	Volume mobilisé en millions de m <sup>3</sup>	Caractéristiques du barrage et du lac de retenue	Caractéristiques de la rupture et de l'onde de submersion
-5 à 6 10 000 B.P. Eboulement de La Madeleine (vallée de la Maurienne, rivière Arc) Savoie	200 à 250	- permanent et comblé par remplissage alluvionnaire	
Début de l'ère chrétienne Glissement du Platé (vallée de l'Arve) Haute-Savoie		- temporaire	- vidange au XIII <sup>e</sup> siècle
10/08/1191 Eboulement du seuil de l'Ayena (vallée de la Romanche) Isère		- temporaire	- vidange brutale 28 ans plus tard, le 14/09/1219
1442 glissement plan rocheux du Claps (vallée de la Drôme) Drôme	2	- permanent et comblé par remplissage alluvionnaire - barrage de 900 m de long	
02/1471 Glissement du Platé (vallée de l'Arve) Haute-Savoie		- temporaire - barrage de 150 m de haut - vidange par creusement d'un fossé d'évacuation de eaux	
1751 Eboulement du dérochoir d'Assy (vallée de l'Arve) Haute-Savoie	20	- temporaire ?	
01/11/1829 glissement de la Montagne d'Oule (vallée de l'Oule) Drôme		- temporaire - barrage de 140 m de long	- vidange partielle 1 mois plus tard (abaissement du niveau du lac de 3 à 4 m)
26/11/1875 glissement de Grand-Sable (ravine des Fleurs Janes) Ile de la Réunion	18	- temporaire ?	
03/10/1888 Glissement de la Forclaz (rivière Dranse) Haute-Savoie	0,1	- temporaire	- vidange brutale
25/11/1926 Glissement de Roquebillière (vallée de la Vésubie) Alpes-Maritimes		- temporaire - barrage de 10 m de haut	- vidange progressive une heure plus tard
1943 Coulée boueuse de Bellevaux Haute-Savoie	2	- permanent ? - lac de 1 million de m <sup>3</sup>	
1955 Glissement de Moulin Ravier (vallée de l'Arly) Savoie	17	- temporaire	
08/01/1994 Glissement de la Salle-en-Beaumont (ruisseau de la Salle) Isère	1,3	- temporaire - lac de 15 000 à 20 000 m <sup>3</sup> - vidange par pompage	

Tableau I.6 - Quelques cas français d'obstruction de cours d'eau en fond de vallée par un phénomène du type mouvements de terrain.

### 3.4.2. Chute d'une masse rocheuse dans un plan d'eau

Un tel phénomène peut produire une vague déferlante 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 à 22 h 39. Un glissement rocheux rapide (volume de 270 millions de m<sup>3</sup> 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 mètres de haut qui s'est propagée vers l'aval, après avoir franchi le barrage-voûte, d'une hauteur de 150 mètres. Celui-ci a résisté, mais la vague est venue détruire le bourg de Longarone situé dans la vallée du Piave et tuer 2 117 de ses habitants (Corbyn, 1992 ; Hendron & Patton, 1985 et Müller, 1964).

## 4. Conclusion du premier chapitre

La réalité des pertes imputables aux phénomènes de mouvements de terrain a poussé les décideurs à gérer ce risque naturel, au même titre que celui lié à d'autres phénomènes, tels que les inondations, les cyclones, les séismes, les éruptions volcaniques, etc.

Cependant, compte tenu de leur diversité, de la complexité de leurs mécanismes, de leur caractère dispersé et aléatoire, de la grande variabilité des dommages qu'ils sont susceptibles de générer et de la rareté de bilans consolidés de leurs conséquences, les mouvements de terrain ne sont pas toujours aussi bien perçus, en terme de risque associé, que ces autres phénomènes.

Il apparaît donc nécessaire, pour améliorer cette perception du risque mouvements de terrain, de confronter décideurs et populations exposées à une représentation la plus réaliste possible, de ce que peuvent être les conséquences prévisibles d'un phénomène pressenti en un lieu donné ; ou mieux encore, arriver à quantifier les dommages potentiels en cas de manifestation de ce phénomène, de manière à pouvoir en apprécier le niveau d'acceptabilité.

Cette quantification des dommages potentiels repose sur le concept de vulnérabilité tel qu'il vient d'être introduit dans ce chapitre et qui s'impose ainsi comme un véritable **outil d'aide à la décision**.

Cependant, on ne peut espérer progresser en matière de pronostic de vulnérabilité aux phénomènes de mouvements de terrain, qu'en récoltant et comparant des données relatives à beaucoup d'événements, à l'instar de ce qui a déjà été entrepris depuis de nombreuses années pour les séismes par le biais de ce qu'on appelle couramment les "constats d'endommagement" ou "analyses pathologiques".

Or, en l'état actuel des connaissances, les constats d'endommagement liés aux phénomènes de mouvements de terrain sont encore trop peu fréquents, trop souvent diffus et pas assez représentatifs de la très grande variété des modes d'endommagement rencontrés. Aussi, le chapitre suivant tente d'y répondre partiellement, en étayant les résultats d'analyses pathologiques menées sur trois événements récents et en éclairant ainsi le concept de vulnérabilité.

## **CHAPITRE II**

### **ANALYSES DE CAS**

#### **1. Introduction**

Ce second chapitre est consacré à l'analyse en retour de trois événements récents ayant impliqué des phénomènes de mouvements de terrain. Deux d'entre eux correspondent à des catastrophes localisées ayant entraîné mort d'hommes : il s'agit de la catastrophe de la Josefina en Equateur et du glissement de la Salle-en-Beaumont en France (département de l'Isère). Le troisième événement correspond à une série de mouvements de terrain dispersés et d'importances variables qui ont affecté la région du Diois en France (département de la Drôme).

La catastrophe de la Josefina a fait l'objet d'une reconstitution temporelle et spatiale des faits ainsi que d'une mise au point d'un protocole original de constat d'endommagement destiné à définir des typologies des phénomènes impliqués, des éléments affectés, des processus et modes d'endommagement générés ainsi que des réponses et coûts résultants.

Sur la région du Diois, on a entrepris un inventaire systématique des instabilités déclarées ainsi qu'un essai de comptabilisation du coût global de ces événements dispersés, au moyen de différentes approches : micro- et macro-économiques. L'analyse des dommages a été particulièrement affinée pour le réseau routier et a permis de définir une typologie de son endommagement par trois types de phénomènes de mouvements de terrain. Par ailleurs, une tentative d'évaluation de préjudices indirects sur une commune demeurée enclavée a permis d'illustrer l'importance des enjeux, économiques et autres, que peut induire un phénomène de mouvement de versant de grande ampleur.

La catastrophe de la Salle-en-Beaumont a pour sa part fait l'objet d'un examen des différents modes et niveaux d'endommagement structurels générés ainsi que d'une reconstitution chronologique.

## 2. La catastrophe de la Josefina (Equateur, printemps 1993) : un événement convulsif aux effets induits dévastateurs

### 2.1. Présentation

Le 29 mars 1993, à 21 heures, un glissement de terrain d'ampleur exceptionnelle s'est déclenché dans le sud de l'Equateur, au lieu dit "La Josefina", environ 20 km au nord-est de la cité de Cuenca, capitale de la province de l'Azuay (**fig. II.1**).

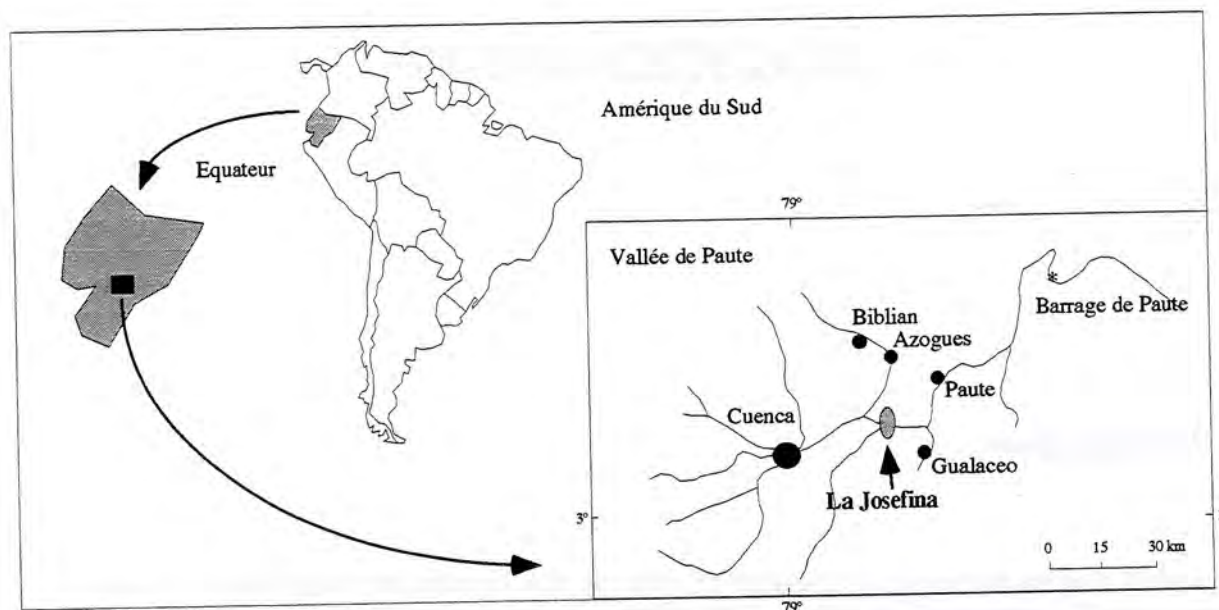


Figure II.1 - Plan de situation géographique de la vallée de Paute et du glissement de la Josefina.

Ce glissement est venu obstruer le cours du rio Paute à hauteur de sa confluence avec le rio Jadan, provoquant la formation d'un lac de retenue qui s'est vidangé brutalement 33 jours plus tard pour former une vague d'eau dévastatrice (**photo. II.1**). De par sa brutalité et son ampleur, ce phénomène peut être qualifié à l'échelle historique d'événement convulsif capable de remodeler un paysage entier en quelques heures (*cf.* Hermelin & Velásquez, 1993).

Malgré le peu d'intérêt accordé par l'opinion internationale, aussi bien sur le plan scientifique que médiatique <sup>7</sup>, l'événement de la Josefina a été vécu sur l'ensemble du territoire équatorien comme un drame national qui succédait au double séisme de 1987 <sup>8</sup>.

Son analyse "à chaud", menée à la faveur d'une mission de reconnaissance en octobre 1993 s'est pourtant révélée être l'occasion unique d'éclairer certains aspects du concept de vulnérabilité. On s'est en particulier intéressé à la diversité des modes d'endommagement générés par cette catastrophe et à leurs répercussions notamment sur le plan fonctionnel.

<sup>7</sup> Cette catastrophe est passée pratiquement inaperçue en Europe et plus particulièrement en France, tout comme celle des mines d'or de Zambija (9 mai de la même année) et ceci malgré ses 350 victimes.

<sup>8</sup> Il s'agit des deux séismes de magnitude 6,1 et 6,9 du 5 mars 1987 générateurs de coulées multiples ressentis dans le nord-est de l'Equateur et dont les épicentres furent localisés dans la province de Napo. Les pertes en vies humaines s'élevèrent à environ 1 000 morts du fait principalement de ces coulées et le montant des dégâts directs s'éleva à 1 milliard de dollars U.S. (National Research Council, 1991).

D'autres aspects relatifs au déclenchement et à l'enchaînement des phénomènes, ainsi qu'à la gestion de la crise ont pu aussi être étudiés et rapportés ici, dans un souci de conservation de la mémoire d'un événement qu'il est probable de voir se reproduire un jour ou l'autre, en particulier sur le territoire français<sup>9</sup>.



**Photo II.1** - Vue générale, depuis l'ouest, du glissement de terrain de la Josefina après la rupture avec 1 : surface de rupture, 2 : accumulations de pied, 3 : lac résiduel, 4 : trace du niveau maximum atteint par le lac, 5 : secteur sinistré par l'onde de submersion (cliché F. Leone, octobre 1993).

Notons que l'Equateur a déjà eu récemment l'occasion d'être confronté à un événement similaire mais dans des proportions plus limitées. Il s'agit du glissement de terrain de Guayllabamba, survenu le 2 janvier 1990 sur la rivière Pisque et qui généra lui aussi un embâcle puis une débâcle des eaux de la rivière<sup>10</sup>. Les pertes directes furent estimées à 1 million de dollars U.S. et des populations avalées durent être évacuées (Asanza *et al.*, 1991).

<sup>9</sup> On pense plus particulièrement aux sites de Séchilienne dans la vallée de la Romanche (département de l'Isère) et de la Clapière dans la vallée de la Tinée (département des Alpes Maritimes).

<sup>10</sup> Le volume total du glissement fut estimé à 3,6 millions de m<sup>3</sup>. L'obstruction de la rivière Pisque se fit par un barrage de 1 million de m<sup>3</sup>, 450 m de long, 60 de large et 58 de haut. La retenue formée atteignit 2,5 millions de m<sup>3</sup>, 45 m de profondeur maximale et 2,6 km de long. La rupture se réalisa le 26 janvier 1990, l'eau s'écoulant par une brèche de 50 m de large et 30 m de haut. La vidange du lac se fit à 60 % entre 10h00 et 13h30, avec un débit de pointe de 700 m<sup>3</sup>/s, ce qui correspond à un pic d'énergie évalué à 6,6.10<sup>6</sup> Joules.

## 2.2. Un enchaînement de phénomènes dommageables

La catastrophe de "la Josefina" est le résultat d'un enchaînement de phénomènes dommageables induits les uns des autres selon une configuration d'embâcle classiquement associée aux phénomènes de mouvements de terrain affectant les versants des vallées étroites caractéristiques des régions montagneuses <sup>11</sup> (fig. II.2 et ann. II). En effet, le glissement principal, survenu en deux phases espacées de quelques secondes, est venu obstruer instantanément le fond de la vallée du rio Paute barrant son cours tout comme celui du rio Jadan.

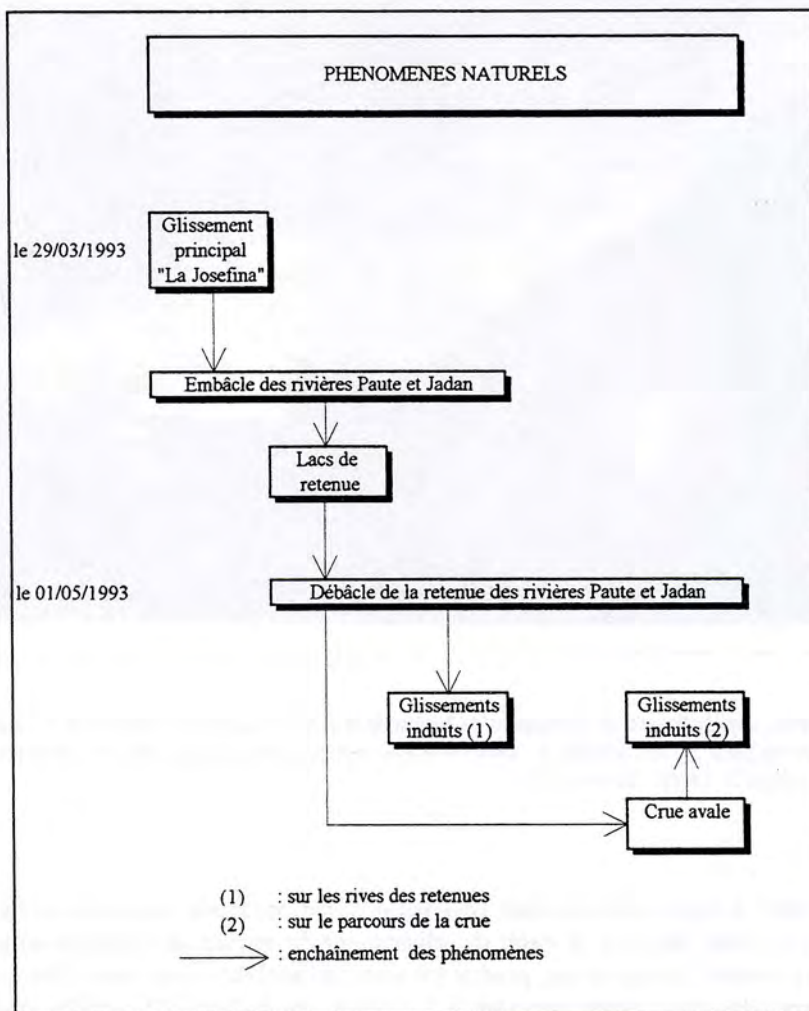


Figure II.2 - Chronologie de l'enchaînement des phénomènes responsables de la catastrophe de la Josefina.

<sup>11</sup> On rappellera pour mémoire les catastrophes historiques de Saint-Denis en Savoie (début de l'ère chrétienne, France), de Bourg d'Oisans (1219, France), du mont Pertusio (1391, Italie), de Luc-en-Diois (1442, France), de la vallée de l'Arve (1751, France), de Lower Gros Ventre (1925, U.S.A.), d'Antrona (1951, Italie), de Madison Canyon (1959, U.S.A.), de Lupazo (1960, Italie), de Chirapoto (1973, Colombie), de Piota (1978, Italie), de la Valtellina (1987, Italie) et de Randa (1991, Suisse) (cf. §. 3.4.1, chap. I).

Le barrage ainsi formé fut imposant par ses dimensions (1 100 m de long pour 500 m de large et 100 m de haut) et présentait une structure suffisamment cohérente pour résister à la montée inexorable des eaux en amont (fig. II.3). Il s'en est suivi la formation de deux lacs de retenue dont la réunion s'est faite le 17 avril suivant. Le remplissage s'est poursuivi jusqu'au 1<sup>er</sup> mai, pour laisser place à une nouvelle phase phénoménologique particulièrement dévastatrice : l'onde de submersion en aval consécutive à la rupture du barrage naturel. La surface maximale couverte par les lacs a atteint 800 hectares (9 km de long), ce qui représentait approximativement un volume d'eau de 200 millions de m<sup>3</sup>.

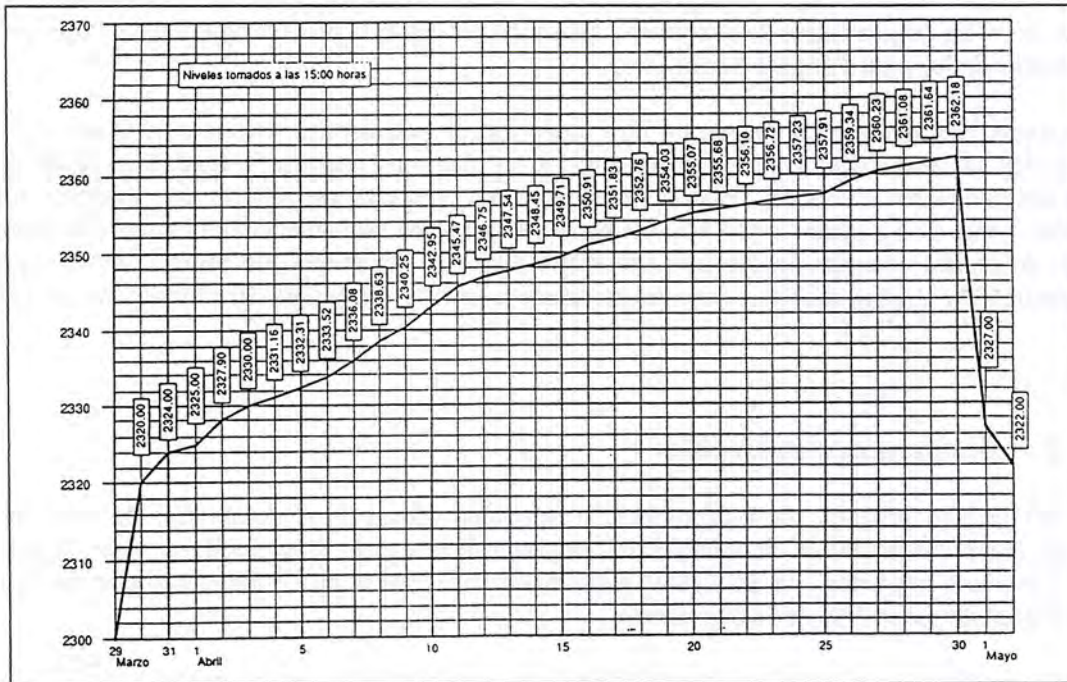


Figure II.3 - Courbe du remplissage de la retenue (d'après Nations Unies, 1993).

L'érosion de la digue naturelle a débuté dès le septième jour par érosion régressive en partant de l'aval et a connu son paroxysme le premier mai à l'aube. Elle a alors libéré dans un délai de 6 heures, entre 8h et 14 h, environ 170 millions de m<sup>3</sup> d'eau à forte charge solide (environ 13 millions de m<sup>3</sup> de volume solide) (fig. II.4).

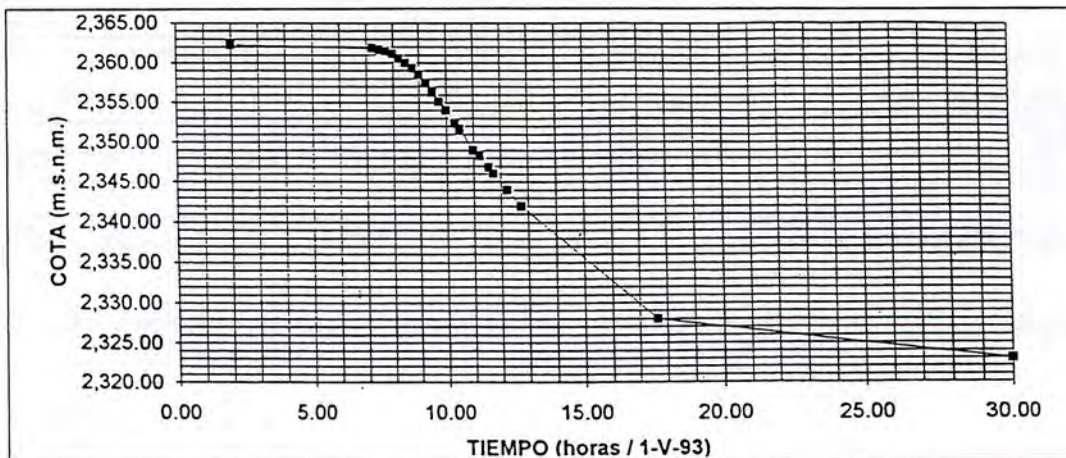


Figure II.4 - Courbe de vidange de la retenue (d'après Aguilera & Romo, 1993).



Compte tenu de la rapidité de la rupture, la vidange du lac s'est accompagnée sur ses berges d'une multitude de glissements (on en a dénombré environ une cinquantaine) induits par la décompression hydraulique des versants initialement immergés. Le plus volumineux d'entre eux (environ 1 million de m<sup>3</sup>) s'est déclenché sur la rive opposée à celle du glissement principal au lieu dit Cerro Chocar's (**ann. II.3**).

Les estimations du débit de pointe, enregistrées vers 9h40, ont donné des valeurs comprises entre 8 000 et 14 000 m<sup>3</sup>/s. La largeur finale de la brèche a été de 20 mètres et la pente longitudinale d'équilibre de 1,3 %, proche de la pente d'origine de la rivière.

La lame d'eau déferlante s'est propagée sur plus de 60 km en aval avec des vitesses oscillant entre 5 et 20 m/s et des hauteurs d'eau comprises entre 6 et 15 m. Sous son passage, le fond de la vallée du rio Paute a été largement remodelé, laissant apparaître par endroits des dépôts de plusieurs mètres d'épaisseur. Cette crue a généré à son tour un certain nombre de glissements induits par affouillement des pieds de versants, en plus des traditionnels effets d'érosion des berges. En fin de compte le niveau de la retenue s'est abaissé de 40 m pour laisser place à un lac résiduel de 30 millions de m<sup>3</sup> (**photo II.1**).

### 2.3. Des pertes considérables

Sur le plan humain, on a dénombré 71 victimes (disparitions comprises) du seul fait du glissement (ensevelissement de deux haciendas, de trente habitations, d'une école, ...), mais la mise en sécurité des zones exposées à la crue avale a nécessité l'évacuation de 14 000 personnes en majeure partie relogées sur place dans des campements.

Sur le plan matériel, les dégâts ont été considérables, surtout pour le secteur public avec 67,5 % du total des pertes. Le bilan économique global des seules pertes directes (dommages matériels) s'élève à 147 millions de dollars U.S. (C.R.E.A., 1993) (**tab. II.1**), ce qui représente environ 1,5 % du P.N.B. de l'Equateur pour l'année 1993.

SECTEUR PRIVE		SECTEUR PUBLIC	
	Pertes en millions de sucres		Pertes en millions de sucres
habitations	17 474,890	routes, canaux d'irrigation et autres	170 708
terrains	58 327,500	ponts et passerelles	5 210
cultures	6 093,069	infrastructures à vocation éducative	2 839
outils de production	415,596	biens à vocation communautaire, services publics et autres	1 382
biens agro-industriels et industriels	15 072,793	marge d'erreur	18 014
autres biens	981,640		
TOTAL en sucres	95 608,488	TOTAL en sucres	198 153
TOTAL en millions de dollars U.S.	47,9	TOTAL en millions de dollars U.S.	99,1

Tableau II.1 - Détail des pertes économiques directes produites par la catastrophe de la Josefina (d'après C.R.E.A., 1993).

La crue a détruit à elle seule 1 500 maisons, 20 km de routes, trois ponts d'intérêt vital, sans compter de nombreuses plantations et installations agricoles. Elle a endommagé la moitié de la ville de Paute sur laquelle la pointe de la crue est parvenue en 1 heure et demie (**ann. II.2**).

En amont de la retenue, les effets de l'inondation dans la plaine d'El Descanso se sont fait ressentir sur des zones résidentielles, agricoles et industrielles (une centaine de maisons, six fabriques, quatre entreprises agricoles, six ponts, 40 km de routes et plusieurs km de voie ferrée ont été touchés). La route panaméricaine, principal axe d'échange Nord-Sud, est restée coupée plusieurs mois tandis qu'une centrale thermoélectrique (centrale d'"El Descanso") s'est retrouvée noyée, libérant ses réserves d'hydrocarbures qui sont venues polluer les eaux de la retenue.

Le maintien du lac résiduel, d'une superficie de 160 hectares, pose aujourd'hui encore des problèmes en particulier sur le plan sanitaire du fait principalement d'une pollution bactériologique, de mauvaises odeurs et de la présence de moustiques (Narváez, 1993).

Les cultures n'ont également pas été épargnées et au total, sur l'ensemble des secteurs, ce sont près de 2500 hectares de terres agricoles qui ont été sinistrés plus ou moins sévèrement (**tab. II.2**).

Types de cultures	Surfaces (en ha) détruites en amont de la Josefina (inondation)	Surfaces (en ha) détruites en aval de la Josefina (crue)	Surfaces totales détruites (en ha)
maïs-haricot	490	424	914
prairies	224	350	574
fruits	45	60	105
canne à sucre		110	110
fleurs (roses)	6	6	12
forêts	60	262	322
divers	115	321	436
<b>TOTAL</b>	<b>940</b>	<b>1 533</b>	<b>2 473 ha</b>

**Tableau II.2** - Détail des pertes en surfaces agricoles (d'après C.R.E.A., 1993).

Plus grave encore, la durée de vie du barrage hydroélectrique de Paute (ou barrage Daniel Palacios) situé 60 km en aval de la Josefina (70 % de la production nationale) est remise en question aujourd'hui. D'une part, du fait de sa sédimentation prématurée (le volume solide déposé par la crue y a été estimé à 4 millions de m<sup>3</sup>) et d'autre part du fait du risque nouvellement déclaré de voir sa prise d'eau menacée d'obstruction par un glissement de versant réactivé par l'onde de submersion.

Les implications sur le programme de développement hydroélectrique de l'Equateur sont d'autant plus graves qu'il était prévu, avant l'évènement de la Josefina, d'implanter un nouveau barrage en amont et en complément de celui de Paute, afin de servir de "bac de décantation", car manifestement la sédimentation s'y trouvait déjà prononcée. Ce projet semble à l'heure actuelle pour le moins retardé.

## 2.4. Une gestion de crise difficile

Dès le lendemain du glissement de terrain, un décret présidentiel instaurait un comité de gestion de crise sous la responsabilité de l'armée. Sur le plan international, des conseillers techniques venaient se prononcer sur ce qui est apparu très vite comme une menace suprême : la possibilité d'une rupture de la digue naturelle par effet d'"*overflowing*". Mais les pronostics fondés sur les résultats de nombreux modèles de rupture divergèrent <sup>12</sup> (Zevallos, 1994).

C'est de cet état d'imprévisibilité qu'est née une situation de crise qui s'est accrue au rythme de la montée des eaux et qui a motivé l'évacuation de nombreuses populations civiles.

Mais la diffusion trop rapide par les médias des résultats bruts fournis par les modèles de prévisions, ont parfois déclenché des affolements prématurés qui sont venus compliquer la tâche des autorités (cf. Klinkicht, 1993 et Lloret, 1993).

Finalement, la rupture tant redoutée s'est avérée être un grand soulagement pour les autorités et les populations inondées en amont tandis qu'elle marquait l'heure de la désolation pour les populations situées en aval.

Cependant les effets liés de l'inondation en amont et de la crue avale ont été réduits par le creusement d'un canal d'écrêtement de la retenue qui a mobilisé 21 engins de terrassement (fig. II.5). Il a permis le rabaïssement du niveau du lac de 20 m et de diminuer l'inondation de 250 hectares en amont. Sans ce canal, le volume total du lac aurait approché les 330 millions de m<sup>3</sup> et le débit de pointe de la crue 30 000 m<sup>3</sup>/s, ce qui se serait avéré fatal pour le barrage de Paute <sup>13</sup> (Cadier *et al*, 1994) ; barrage qui avait heureusement été vidangé de 50 millions de m<sup>3</sup> en prévision de la rupture.

Ceci dit, les conséquences auraient pu être plus dramatiques encore. En effet, les premières estimations du temps de remplissage de la retenue ont été gravement sous-évaluées (près de la moitié de la réalité) du fait d'une surestimation des débits entrants (67,4 m<sup>3</sup>/s en réalité et en moyenne pour ce mois là). Ceci a eu pour effet de contraindre les autorités à suspendre trop tôt le creusement du canal et à déclencher l'alerte maximum également trop tôt, ce qui a entraîné une certaine lassitude et démobilisation des populations au moment fatidique de la rupture <sup>14</sup>.

Par ailleurs, les pentes latérales des bords du canal creusées trop raides et son profil au contraire pas assez marqué ont favorisé des éboulements et des obstructions à répétition qui sont venus retarder le moment de la rupture de plusieurs jours durant lesquels le remplissage s'est poursuivi.

<sup>12</sup> Ces modèles ont mis en oeuvre des simulations soit numériques, soit physiques. Les estimations du délai avant la rupture variaient de 3 à 15 jours et une équipe soutenait même qu'elle ne se produirait pas. Les prévisions du débit de pointe variaient pour leur part de 2 000 à 40 000 m<sup>3</sup>/s (cf. Natala, 1993 ; James *et al*, 1993 ; Zevallos, 1993 et Zevallos *et al*, 1993).

<sup>13</sup> Le débit maximum déversé par le barrage de Paute aurait été largement supérieur aux 5 000 m<sup>3</sup>/s mesurés en réalité après laminage et stockage, alors que l'évacuateur de crue y est dimensionné pour 7 000 m<sup>3</sup>/s.

<sup>14</sup> Le désarroi des responsables et des populations était tel que la veille de la rupture, le comité de gestion de crise suspendait l'alerte rouge, permettant ainsi aux populations d'accéder aux zones interdites. Par chance, ces populations préférèrent attendre le lendemain matin.

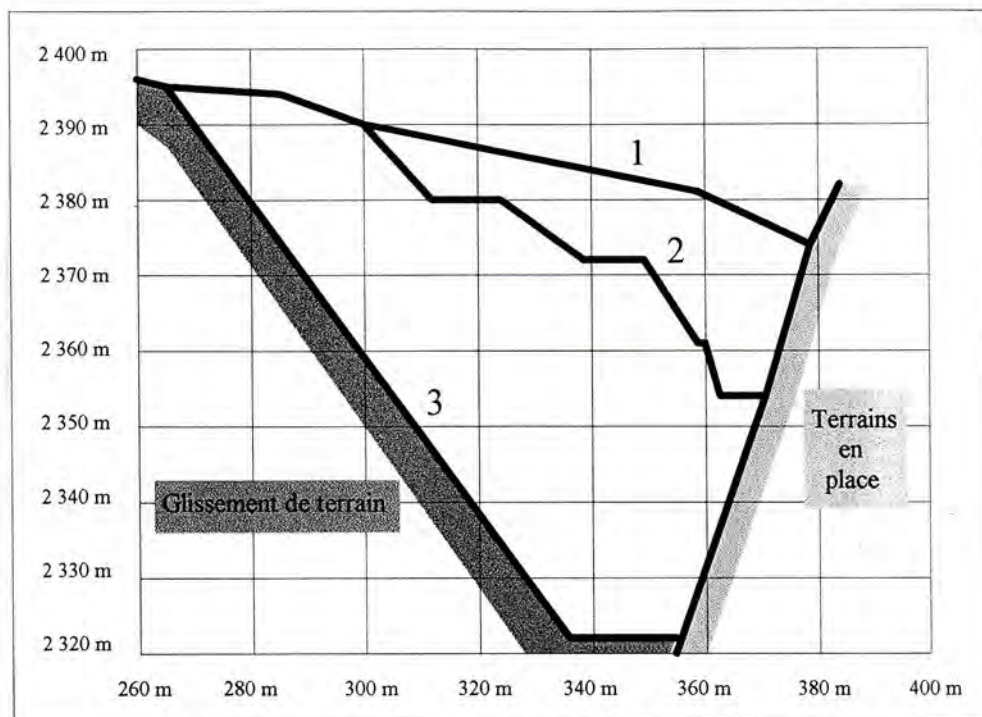


Figure II.5 - Section transversale du canal d'évacuation avec 1 : profil initial du glissement, 2 : profil du canal, 3 : brèche après la rupture (d'après Aguilera & Romo, 1993 in Zevallos, 1994).

## 2.5. Analyse du glissement principal

### 2.5.1. Contexte géologique et géomorphologique

Le glissement de la Josefina (**fig. II.6**) a affecté un massif intrusif granodioritique situé dans un contexte de roches métavolcaniques, de roches sédimentaires crétacées, de roches volcaniques oligo-miocènes et de sédiments continentaux néogènes. Sur le plan géomorphologique on se trouve en bordure orientale du bassin intramontagneux néogène de Cuenca, au niveau d'une zone de verrou de la vallée de Paute, et vraisemblablement à l'emplacement même d'un ancien glissement (Plaza & Eguez, 1993).

Sur le plan tectonique, nous sommes en présence d'un contexte de grandes failles qui affectent les formations lithologiques précédentes selon trois familles de directions préférentielles :  $N20^\circ$ ,  $N115^\circ$  et  $N145^\circ$ . Elles sont les conséquences des mouvements compressifs et distensifs des différentes phases de l'évolution géologique des Andes équatoriennes (Plaza & Eguez, 1993).

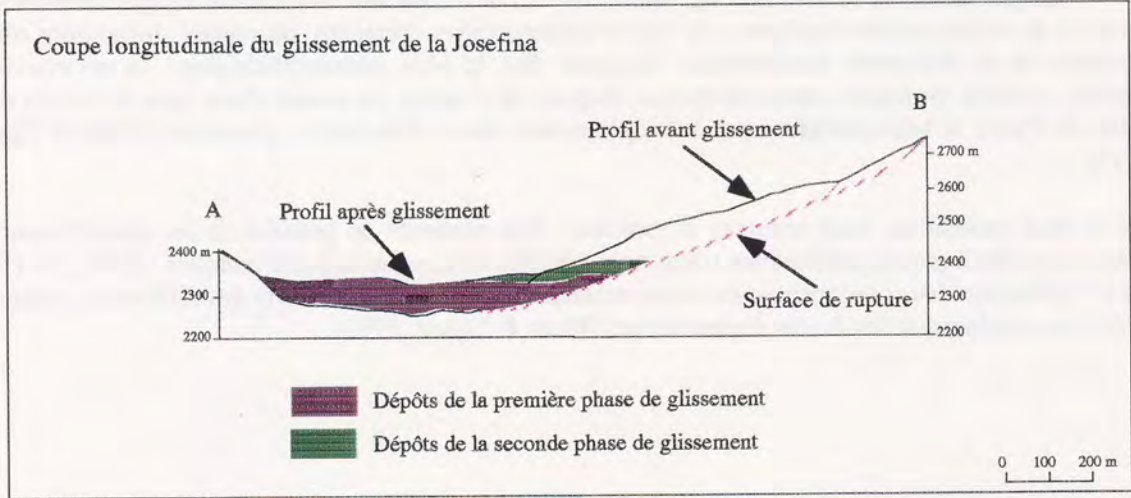
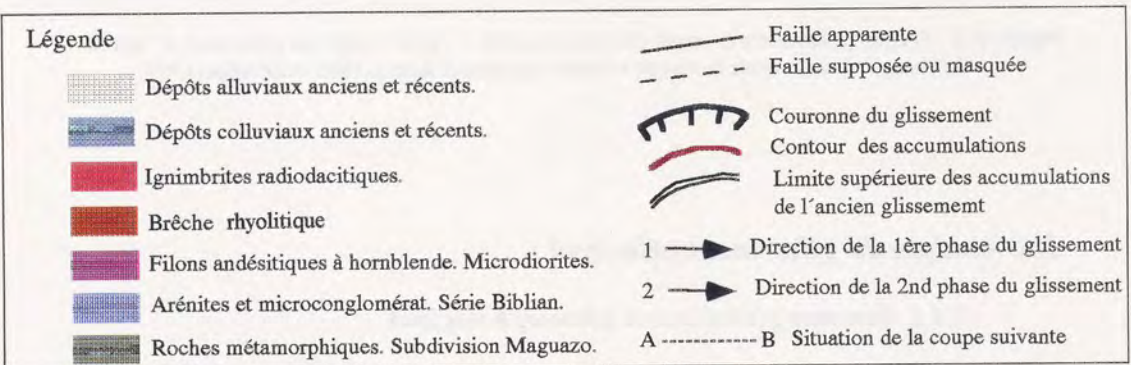
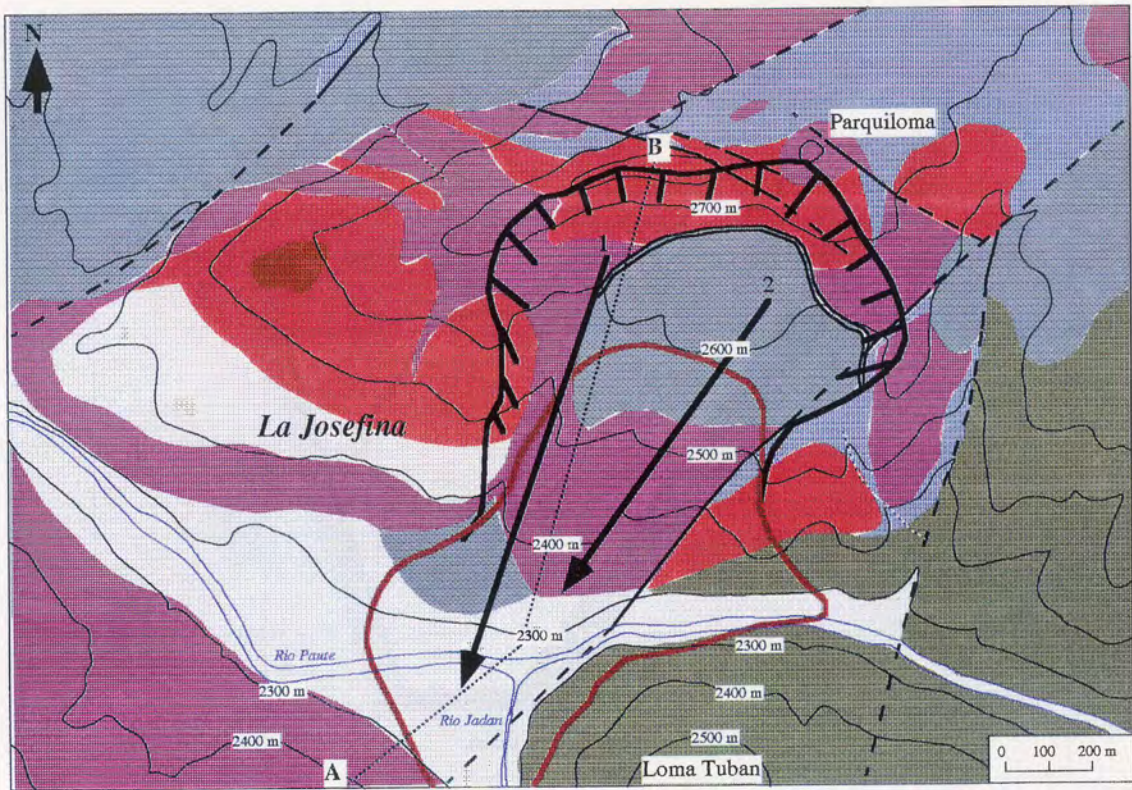


Figure II.6 - Contexte géologique du glissement de terrain de la Josefina (modifié d'après Plaza *et al.*, 1993 et Latorre *et al.*, 1993).

### 2.5.2. Caractéristiques géométriques et cinématiques

Il s'agit d'un glissement de type translationnel présentant une cicatrice de tête de forme semi-circulaire et un dénivelé de 300 m. La surface de rupture orientée est/ouest a une pente de 45° et couvre 0,4 km<sup>2</sup>. La surface totale concernée (rupture et dépôts) est proche de 1 km<sup>2</sup>. Sa longueur totale est de 1,5 km et sa largeur totale de 600 m. Les accumulations de pied présentent une hauteur maximale de 100 m et se composent de blocs anguleux de très bonne résistance. Leur texture est globalement hétérogène avec des tailles de blocs oscillant entre 0,4 et 2 m de diamètre.

Une reconstitution numérique du volume déplacé obtenue par différentiels de modèles numériques de terrain (avant et après le glissement) a permis d'estimer avec précision le volume total du glissement à 28 millions de m<sup>3</sup> (Leone & Velásquez, à paraître) (**fig. II.7**). Résultat qui diffère de certaines estimations fournies par les experts étrangers (20 millions de m<sup>3</sup> selon Plaza & Eguez, 1993 ; 36 millions selon Aguilera & Romo, 1993 et 44 millions selon James, 1993).

D'après les témoignages, la cinématique du glissement s'est caractérisée par deux phases de mouvement quasi-simultanées en direction du sud. La première phase semble avoir remanié des terrains en place dont la surface d'origine est en partie conservée. La seconde phase, est venue recouvrir les accumulations de la première par des dépôts largement plus désorganisés, d'aspect pulvérulent par endroits.

### 2.5.3. Hypothèses de déclenchement

Pour tenter d'éclairer les hypothèses de déclenchement de la première phase du glissement on distingue deux catégories de facteurs.

#### 2.5.3.1. Les facteurs permanents

Ils apparaissent sous forme de conditions lithologiques, structurales et topographiques favorables à l'instabilité du versant.

La lithologie est intervenue indirectement, de par sa nature même (granodiorites), en résistant à l'érosion météorique pour donner un relief escarpé (pentes comprises entre 25 et 45°) favorisant l'effet de la gravité.

Mais plus déterminant semble être le rôle joué par la tectonique qui est venue en quelque sorte prédécouper ce massif intrusif par un jeu de failles, soit sub-parallèlement à la surface de rupture (directions N115°), soit selon l'axe de la pente (direction N20°). C'est probablement d'ailleurs à la faveur de cette dernière famille de failles que s'est faite l'érosion tardive du versant. Erosion marquée par deux profonds talwegs qui semblaient délimiter exactement le volume correspondant à la première phase de glissement (*cf.* **fig. II.7.a** et **ann. II.1**).

#### 2.5.3.2. Les facteurs déclenchants

Ils ont probablement eu des effets cumulables. Ils ont vraisemblablement été ici d'ordre hydraulique et anthropique faute d'être sismique.

Concernant l'hypothèse d'un déclenchement hydraulique, il est fort probable qu'une infiltration massive des eaux météoriques au sein du massif ait pu augmenter de manière significative la pression interstitielle pour engendrer un premier mouvement qui a répercuté la mise en pression au reste de la zone. Cette infiltration a pu se faire à la faveur des plans de fracturation<sup>15</sup> et notamment au niveau des deux talwegs précédemment cités.

<sup>15</sup> Certains témoignages font état, avant la catastrophe, de crevasses situées en amont du glissement et dans lesquelles s'engouffrait l'eau.

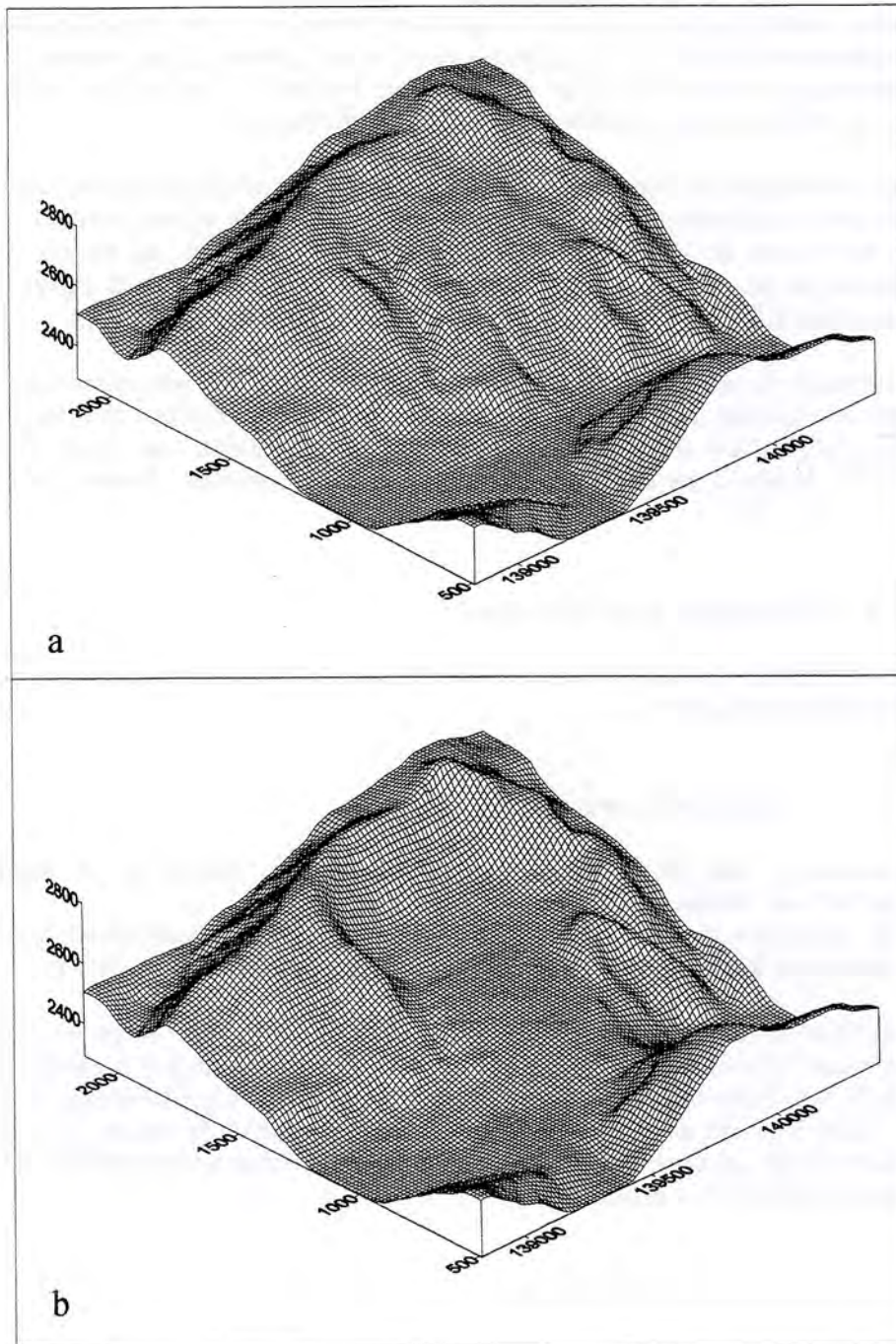


Figure II.7 - Reconstitution numérique du site de la Josefina, avant (a) et après (b) le glissement (d'après Velásquez, 1994 in Leone & Velásquez, à paraître).

Ceci dit, une inconnue demeure quant à l'origine d'une telle quantité d'eau nécessaire à l'amorce du premier mouvement, quand on voit la taille relativement réduite du bassin versant qui alimente la zone glissée. En effet, les précipitations ont été élevées durant le mois précédent le glissement, mais non exceptionnelles pour la région. Elles ne peuvent expliquer à elles seules le déclenchement.

Enfin on se doit d'évoquer une cause anthropique qui a pu contribuer à déstabiliser ce versant. Il s'agit de la présence en pied de massif de carrières de pierres de constructions qui présentaient des prolongements souterrains et dont l'exploitation était menée de manière empirique, nécessitant parfois l'emploi des explosifs.

### 2.5.3.3. La dynamique du glissement

Concernant la dynamique générale du glissement et en particulier le déclenchement de sa seconde phase, Velásquez (1994) a mis en oeuvre, sur la base des informations disponibles, un algorithme de calcul de stabilité tridimensionnel. Il a retenu quelques caractéristiques géotechniques comparables à celles de matériaux similaires que l'on trouve dans les Andes Septentrionales. De façon préliminaire, il a considéré une granodiorite fracturée et très altérée superficiellement dont les caractéristiques sont les suivantes :

Poids volumique : 26 kN/m<sup>3</sup>  
 Cohésion : 45 kPa  
 Angle de frottement : 35°

La surface du glissement semble avoir été déterminée par des plans de diaclase. Il a donc reconstruit une surface de glissement limitée par plusieurs plans de diaclase et qui présentait les caractéristiques géotechniques (cohésion et angle de frottement) précédentes.

Le calcul de stabilité (coefficient de sécurité) a été réalisé d'abord pour la totalité de la zone glissée en conditions sèches puis ensuite selon l'hypothèse d'un premier glissement survenu sur le côté ouest de la même zone (ce qui correspond à la première phase de glissement). La différence entre les deux coefficients de sécurité a été de l'ordre de 0,1.

Bien que les données utilisées ne soient qu'approximatives et que le calcul ait été fait pour des conditions sèches, la comparaison entre les deux facteurs de sécurité renforce l'hypothèse de l'action déstabilisatrice du premier glissement sur le second qui a correspondu probablement au remaniement d'une zone anciennement glissée (matériaux déjà disloqués) (**fig. II.8**). Effectivement, la disparition du support latéral constitué par la première masse glissée a entraîné une variation des conditions d'équilibre du massif. Cette variation, dans des conditions limites, est tout à fait suffisante pour expliquer le mouvement du reste de la masse mobilisée.

Ceci dit, pour affiner ces hypothèses il paraît nécessaire de disposer de davantage de données de terrain et de considérer les conditions limites d'équilibre imposées par la présence d'eau (Leone & Velásquez, à paraître).



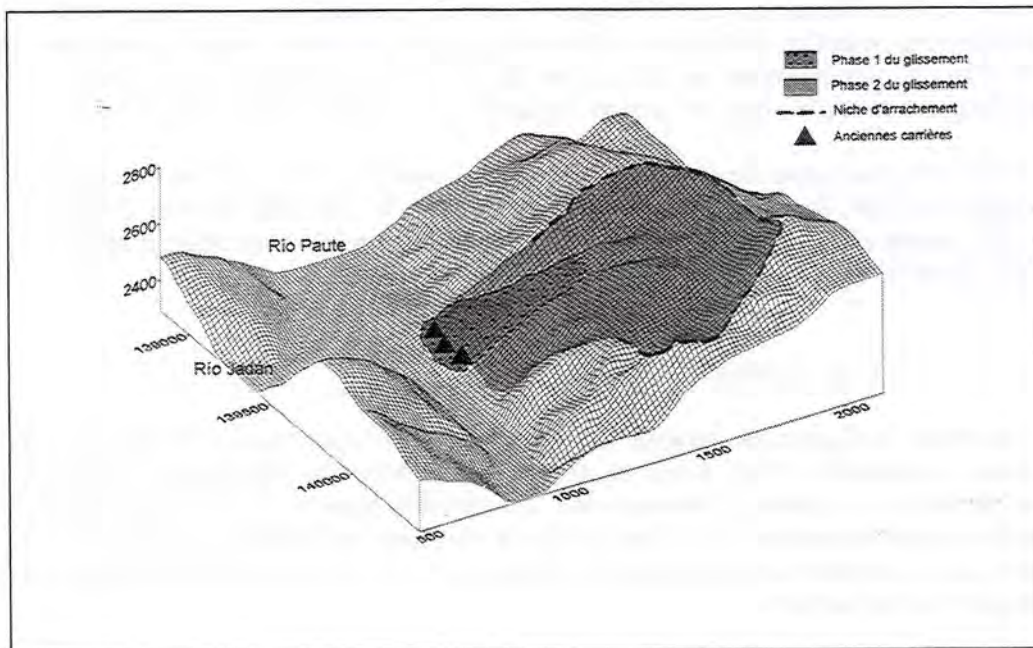


Figure II.8 - Localisation des deux phases de glissement (d'après Velásquez, 1994 in Leone & Velásquez, à paraître).

## 2.6. Analyse des dommages

### 2.6.1. Présentation

Une mission de reconnaissance a été menée sur le site même de la Josefina au mois d'octobre 1993 (cf. Leone, 1994), soit 5 mois après la catastrophe. Elle a permis d'élaborer, à partir d'un certain nombre d'éléments d'informations (témoignages, coupures de presse, rapports techniques, photographies, extraits de journaux télévisés, observations de terrain, etc.), non seulement une reconstitution des faits tels qu'ils apparaissent au début de ce travail mais également une analyse plus poussée des modes d'endommagement associés à cette catastrophe. Cette analyse des dommages répond à un besoin grandissant de voir se généraliser en matière de phénomènes de mouvements de terrain ce que les techniciens appellent des constats d'endommagement (cf. Leone *et al.*, 1995), à l'instar de ce qui se fait déjà depuis de nombreuses années en sismologie (cf. Borunov *et al.*, 1991 ; Spence *et al.*, 1992 et Tavakoli & Tavakoli, 1993, par exemple).

Le but est d'arriver à constituer à terme une matrice d'endommagement (correspondances entre éléments exposés et phénomènes de mouvements de terrain en terme de taux d'endommagement) qui vienne s'insérer dans les futurs modèles de prévision et d'analyse des risques encourus par des communautés exposées à des phénomènes de mouvements de terrain.

Dans le cadre de cette étude, on s'est limité à l'analyse détaillée des dommages structurels et corporels tout en considérant, mais de manière plus qualitative, les perturbations fonctionnelles qu'ils ont pu générer et les types de réponses apportées pour en réduire les effets. Cette analyse a nécessité la mise au point d'un protocole original de constat d'endommagement (fig. II.9) défini par les notions et étapes suivantes et dont le détail figure en **annexe III**.

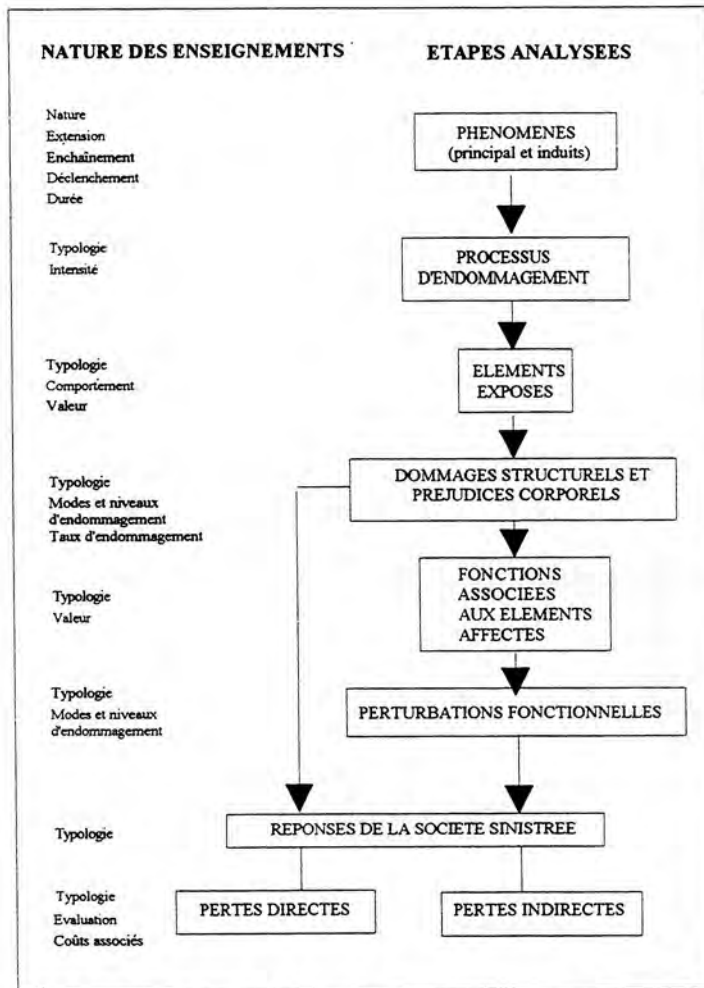


Figure II.9 - Protocole de constat d'endommagement mené sur la catastrophe de la Josefina.

### 2.6.2. Les processus d'endommagement

La compréhension de la complexité des dommages associés à cette catastrophe a nécessité dans un premier temps de caractériser les phénomènes impliqués par leurs types de processus d'endommagement. Par processus d'endommagement on désigne l'action préférentielle du phénomène sur les biens ou les personnes qui y ont été exposés. La difficulté majeure étant, a posteriori, d'arriver à apprécier ce qu'a été la magnitude ou intensité de ce processus physique, et le cas échéant au moins les critères de mesure de cette intensité.

Ceci nous a conduit à retenir deux grandes classes de processus d'endommagement qui permettent de caractériser l'ensemble des phases phénoménologiques de la catastrophe de la Josefina. Il s'agit de processus mécaniques (résultat de l'action des glissements, principal et induits) et hydrauliques (résultat de l'action de la retenue et de la crue) (fig. II.10).

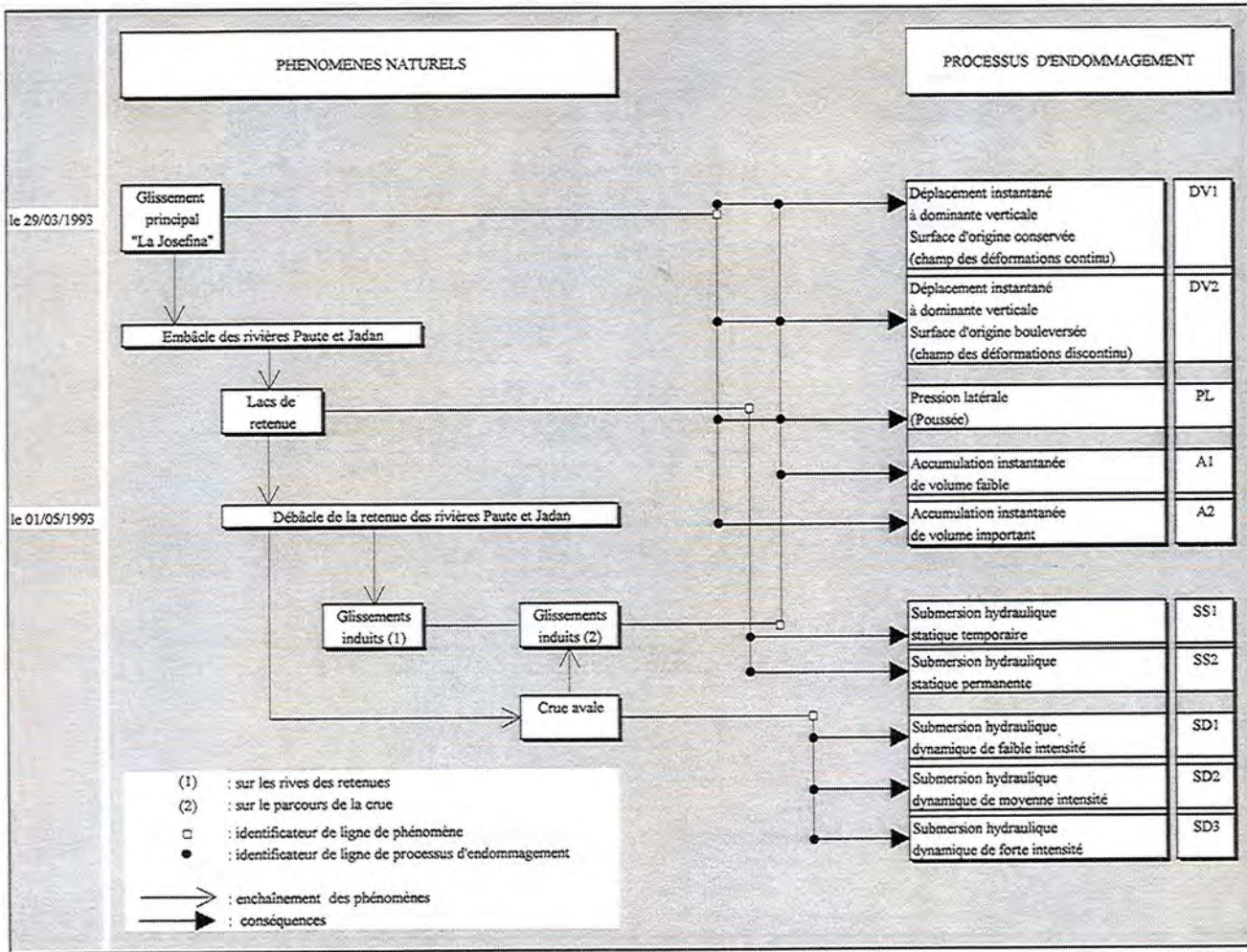


Figure II.10 - Processus d'endommagement associés aux différents phénomènes naturels impliqués dans la catastrophe de la Josefina.

2.6.2.1. Les processus mécaniques

Ils comprennent :

- des **champs de déplacements instantanés à composante dominante verticale**. Ils se caractérisent par une amplitude des déplacements (supérieure ou égale à 30 m) et par l'allure des déformations (continues ou discontinues : ce qui se traduit sur le terrain par une conservation ou non de la surface d'origine) ;
- des **effets de poussées latérales** (en pied de certains glissements) quand le processus suivant n'est pas venu les masquer ;
- des **effets d'accumulation** (ou d'épandage) des matériaux remaniés par les glissements. En distinguant les volumes de quelques centaines de m<sup>3</sup> (glissements induits) à plusieurs milliers voire millions de m<sup>3</sup> (glissement principal et quelques glissements induits).

### 2.6.2.2. Les processus hydrauliques

Ils comprennent :

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

- des **effets de submersion statique permanente** (pour les zones couvertes par le lac résiduel toujours présent à l'heure actuelle). Sa profondeur atteint par endroits environ 30 m et la sédimentation y est prononcée. On doit aussi y associer les effets d'une pollution par hydrocarbures ;

- des **effets de submersion dynamique** (associés à la crue) pour lesquels on distingue trois classes d'intensité :

- **forte intensité** : pour les zones exposées à des vitesses de 20 m/s durant quelques heures et à un transport solide élevé. Le résultat a été une forte abrasion (de plusieurs mètres) associée à des dépôts tels (jusqu'à 4 m) qu'on y constate un remodelage total du lit de la rivière. Les hauteurs d'eau y ont atteint 15 m et même plus ;

- **moyenne intensité** : pour les zones exposées à des vitesses plus modérées (5 à 10 m/s) et où l'érosion du lit est moins marquée (seuls les dépôts dominant) ;

- **faible intensité** : pour les secteurs ayant connu surtout des débordements latéraux du lit (simple inondation avec des hauteurs d'eau jusqu'à 5 m ) et où l'érosion et les dépôts ont été insignifiants du fait de vitesses d'écoulement faibles.

On a procédé à une cartographie de ces zones à partir de relevés photographiques aériens (non redressés) et de reconnaissances de terrain. La principale difficulté a été d'apprécier l'extension des différentes classes d'intensité de la crue. Cela a nécessité de faire la synthèse d'indices très variés et dispersés (indices de terrain, témoignages oraux, coupures de presse, photographies, extraits de films, etc.).

On a restreint cette reconstitution spatiale des phénomènes à la portion de vallée la plus sinistrée, dans un secteur compris entre la plaine d'El Descanso et la ville de Paute, ce qui représente une distance d'environ 20 km (**fig. II.11** et **ann. II.5**).

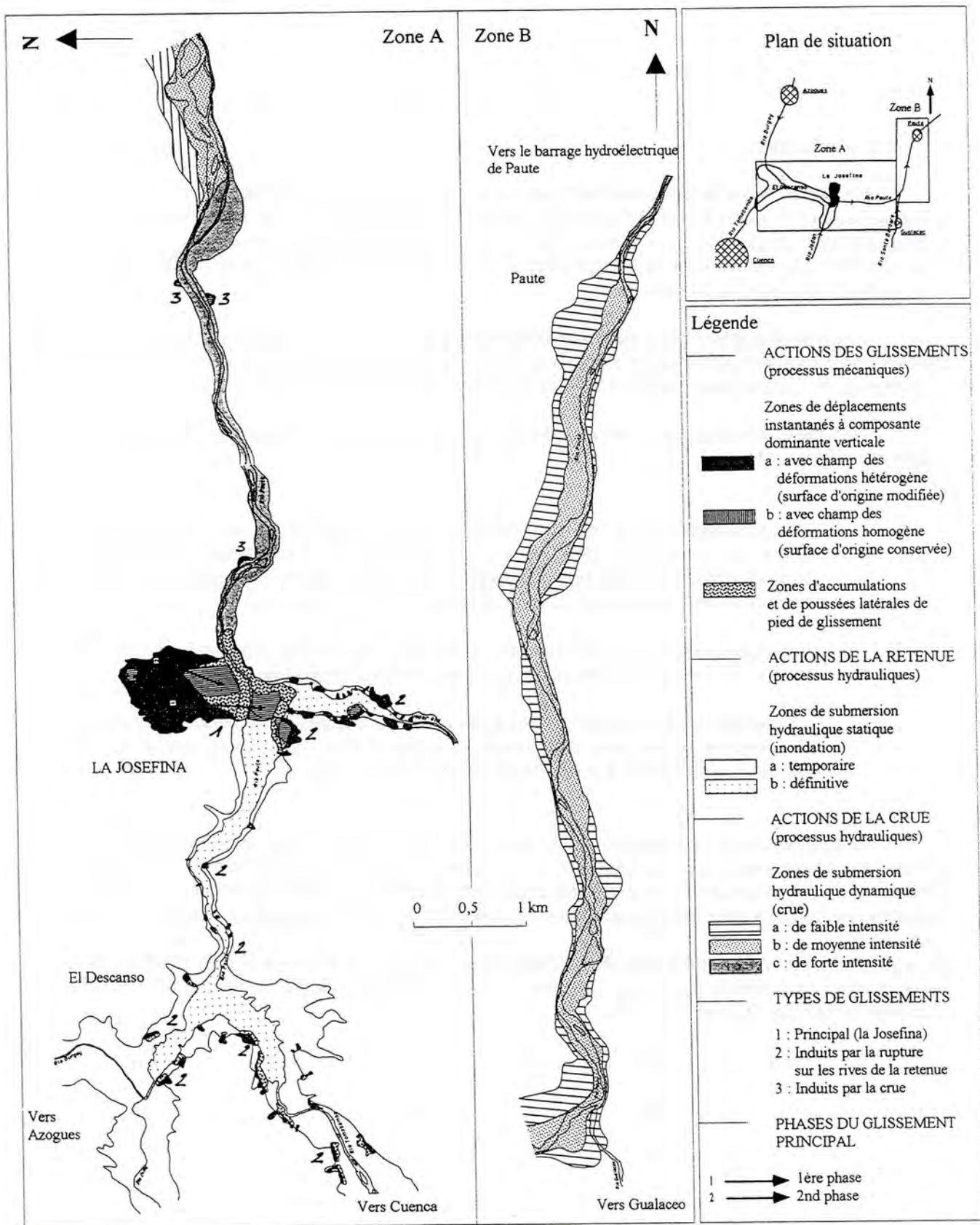


Figure II.11 - Cartographie des différents processus d'endommagement retenus pour l'analyse des dommages structurels et corporels liés à la catastrophe de la Josefina (d'après fonds photographiques aériens non redressés de l'I.G.M., Quito, Ecuador).

### 2.6.3. Modes d'endommagement structurel et corporel

On a pris en compte un certain nombre d'éléments affectés par cette catastrophe et dressé pour chacun d'entre eux une typologie des modes d'endommagement observés *in situ* et que l'on a classés par ordre d'intensité croissante (**tab. II.3, ann. III et IV**).

NATURE DES ELEMENTS EXPOSES		ID	MODES D'ENDOMMAGEMENT	NATURE DES DOMMAGES		
BATIMENTS		B1, B2	I	Dommmages légers non-structuraux (gros oeuvre non-touché). Stabilité non-affectée. Mobilier endommagé.	STRUCTURELS	
			II	Fissuration des murs, mais la stabilité n'est pas affectée. Réparations non-urgentes		
			III	Déformations importantes, lézards largement ouverts, fissures apparaissant dans des éléments de la structure. Stabilité affectée. Portes et fenêtres inutilisables. Evacuation nécessaire.		
			IV	Fracturation des structures. Désolidarisation des parties. Effondrement partiel du plancher et brèches dans les murs. L'évacuation s'impose. La réhabilitation semble compromise		
			V	Effondrement partiel à total ou immersion définitive qui nécessite une évacuation du site et compromet toute réhabilitation.		
RESEAUX	ROUTE	R	I	Dégradation de la chaussée		
			II	Affaissement de la plate-forme ou obstruction de la chaussée de faible volume (dizaines de m3)		
			III	Obstruction de la chaussée de volume élevé (certaines de m3)		
			IV	Rupture de la plate-forme ou immersion définitive		
	LIGNE ELECTRIQUE	L	I	Distorsion		
			II	Rupture ou immersion définitive		
	VOIE FERREE	VF	I	Obstruction partielle de la voie (dizaines de m3)		
			II	Déformation légère de la voie		
			III	Obstruction totale (centaines de m3) ou déformations importantes de la voie		
			IV	Rupture du ballast ou immersion définitive		
	SURFACES NATURELLES	TERRAIN ET SOL	T	I		Dégradation du sol
				II		Remaniements topographiques mineurs
III				Remaniements topographiques majeurs ou immersion définitive		
COURS D'EAU		CE	I	Partiellement obstrué		
			II	Totalement obstrué		
PLAN D'EAU		PE	I	Pertes hydrauliques		
	II		Comblement partiel			
SOUS-ELEMENTS	OCCUPATION VEGETALE	OV	I	Perturbations végétatives		
			II	Destruction ou dépérissement		
	MOBILIER	MB	I	Endommagés mais récupérables		
			II	Détruits et irrécupérables		
	STOCKS, RECOLTES	S	I	Irrécupérables		
INDIVIDUS			I	Préjudice moral ou gêne liés à une évacuation	CORPORELS	
			II	Troubles psychologiques		
			III	Blessure physique sans séquelles (blessure légère)		
			IV	Blessure physique entraînant une invalidité (blessure grave)		
			V	Décès ou disparition		

**Tableau II.3** - Echelles d'endommagement structurel et corporel utilisées pour la construction de la matrice d'endommagement de la catastrophe de la Josefina. (B1 : bâti de qualité médiocre en terre et sans fondations ; B2 : bâti de bonne qualité en maçonnerie et avec fondations ; ID : intensité des dommages).

Cela donne au total 32 classes réparties entre 12 types d'éléments qui sont :

- les bâtiments, distinction faite entre ceux construits en maçonnerie avec des fondations et ceux en terre sans fondations (en pisé);
- les routes ;
- les lignes électriques aériennes ;
- la voie ferrée ;
- les terrains et les sols associés ;
- les cours d'eau ;
- les plans d'eau (barrage de Paute) ;
- les occupations végétales (flore naturelle et cultures) ;
- le mobilier associé aux bâtiments ;
- les stocks et les récoltes engrangées ;
- les individus.

Pour chaque catégorie de processus d'endommagement, on a tenté de dresser à partir de constats de terrain, le ou les niveaux d'endommagement rencontrés pour les différents éléments retenus ci-dessus, bien entendu lorsque ceux-ci étaient représentés sur la zone. Ceci a conduit à l'élaboration d'une matrice d'endommagement partielle (**tab. II.4**).

L'intérêt de cette hiérarchisation des dommages est d'apprécier rétrospectivement la réalité des pertes associées à cette catastrophe. Pertes qui ne sont pas toujours totales, contrairement aux hypothèses retenues par ceux qui ont eu la charge d'en dresser le bilan (*cf.* C.R.E.A., 1993 et Defensa Civil, 1993). Il existe en effet dans la réalité une modulation des pertes qui dépend essentiellement de l'intensité des phénomènes et du comportement des éléments qui y sont exposés.

Ainsi, on peut voir que pour une même catégorie d'éléments, les intensités d'endommagement sont variables d'une classe d'intensité à l'autre, et qu'inversement pour une même classe d'intensité peuvent être représentés plusieurs niveaux de dommages suivant la nature des éléments affectés.

Par exemple, bien qu'elles ne puissent être réoccupées ultérieurement pour des raisons évidentes de sécurité, des habitations situées en surface du glissement principal ont été épargnées malgré un déplacement vertical de plusieurs dizaines de mètres. Un enfant occupant l'une d'entre elles a même été retrouvé sain et sauf le lendemain du drame.

De la même façon, la crue a entraîné des dommages très variables. Si tous les biens situés sur la zone amont de forte intensité ont été rasés, il en est allé différemment pour ceux affectés par la classe d'intensité faible : ainsi la ville de Paute a été en partie submergée, mais de nombreux bâtiments ont résisté à la montée des eaux. Ils ont pu rapidement être réoccupés malgré des dégâts surtout d'ordre mobilier.

Pour ce qui est de la zone amont soumise à l'inondation temporaire, la majorité des habitations en maçonnerie avait retrouvé sa fonctionnalité au moment de la mission, soit cinq mois après le début des événements. Les dommages ont été très légers du fait de la résistance des structures et de la montée progressive des eaux qui a exercé une pression hydrostatique isotrope sur l'ensemble de l'édifice.

Autre exemple, la route panaméricaine située sur cette même zone a plus souffert des glissements induits par la rupture sur les berges du lac plutôt que de l'immersion temporaire. Le plus souvent, les matériaux déposés par ces glissements sont venus obstruer cet axe d'échange vital si bien qu'au mois de septembre le tronçon de route panaméricaine passant par la plaine d'El Descanso était toujours dévié.

Enfin, compte tenu des difficultés à vidanger le lac résiduel, tous les biens qui s'y trouvent immergés semblent à jamais perdus.

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

-	: configuration non-observée ou impossible
□	: élément peu affecté
□	: élément moyennement affecté
□	: élément très affecté (irréparable)
□	: conséquences écologiques (pollution par hydrocarbures) suite à l'immersion de la centrale thermo-électrique de El Descanso
□	: conséquences énergétiques avec le réduction de la durée de vie du barrage hydroélectrique de Paute

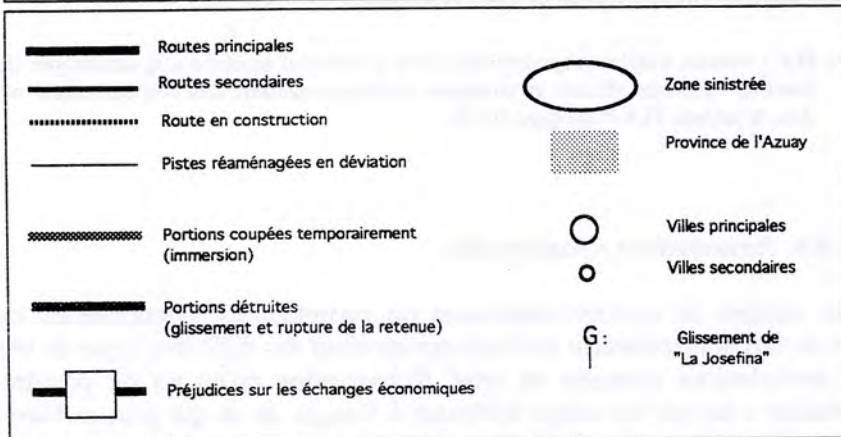
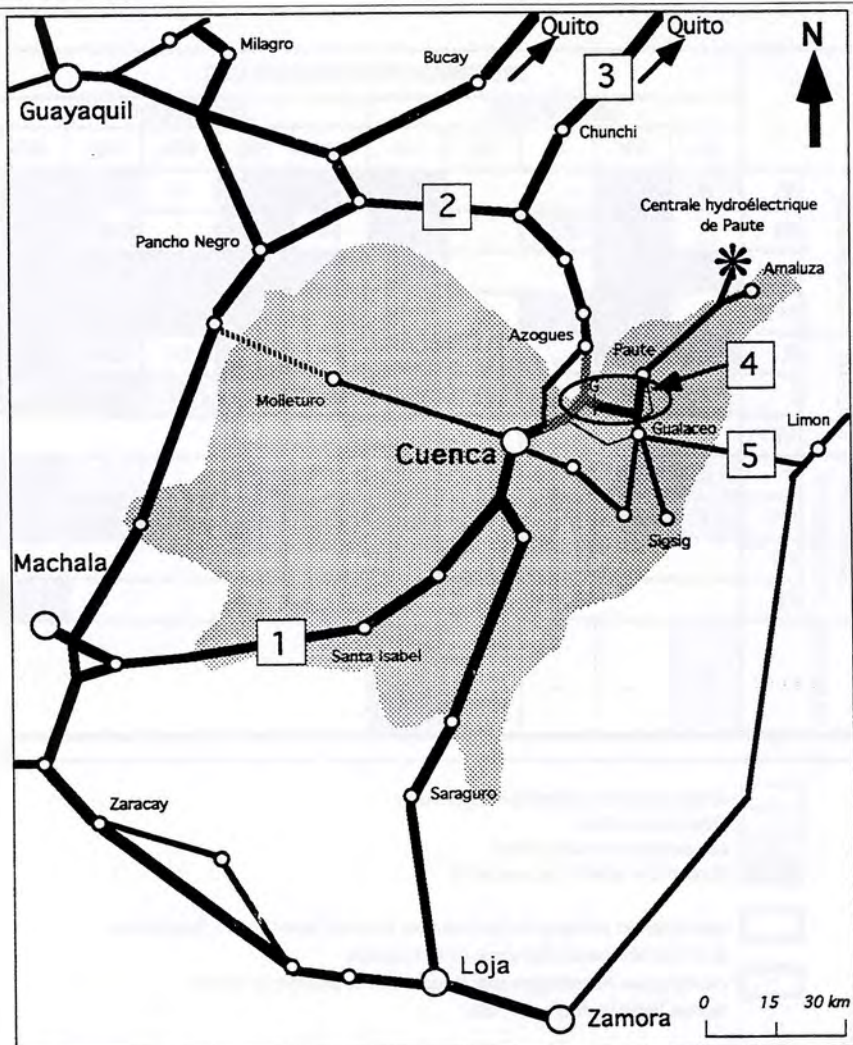
Tableau II.4 - Matrice d'endommagement structurel et corporel associée à la catastrophe de la Josefina (éléments affectés et processus d'endommagement sont respectivement codés dans le tableau II.3 et la figure II.10).

2.6.4. Perturbations fonctionnelles

Un certain nombre de dysfonctionnements ou perturbations fonctionnelles sont apparus et persistent toujours du fait principalement de l'endommagement des différents types de biens. L'analyse de ces perturbations nécessite un recul d'observation qu'on n'a pu prendre ici mais qui mériterait d'être réalisé à des pas de temps différents à l'image de ce qui peut se faire après certains tremblements de terres (cf. D'Ercole, 1994a).

Néanmoins, dès le début de la catastrophe et tout au long des cinq mois qui l'ont suivie, un certain nombre de dysfonctionnements sont venus désorganiser la vie de cette région d'Equateur, notamment sur le plan des communications, des échanges (fig. II.12) et des activités économiques et de la vie sociale. On a tenté d'en dresser une typologie sommaire en faisant le lien avec le niveau d'endommagement structurel correspondant (cf. ann. III).





	1	2	3	4	5
Vers La zone sinistrée	Poisson, ail, piments, maracuya, citrons, pommes chiliennes, raisins.	Plastiques, textiles, peintures, produits électro-ménagers étrangers, bois.	Plastiques, textiles, peintures, produits électro-ménagers étrangers, fèves, haricots, oranges, carottes, choux, tomates d'arbre, oignons.	Ciment Guapan, pierre à bâtir, textiles, chapeaux Panama, fleurs, céramiques.	Bois, matière première pour céramiques, baryte, marbre, viande, mandarines, oranges, papayes, yucas, naranjillas.
En provenance de la zone sinistrée	Lentilles, céramiques, liqueurs, conserves, plastiques, cosmétiques, produits domestiques, chapeaux panama, légumes, fleurs, baryte, poteaux électriques...				

Figure II.12 - Catastrophe de la Josefina : préjudices sur les échanges économiques (modifié d'après le quotidien HOY, 1993).

L'intensité de ces perturbations, que l'on peut traduire généralement par une durée d'interruption est le plus souvent fonction de l'intensité des dommages structurels et des moyens mis en oeuvre pour les réparer ou les contourner. Les répercussions de telles perturbations peuvent se ressentir bien au delà de la zone sinistrée, notamment du fait des dommages aux réseaux, et se maintenir durablement du fait de nombreux blocages institutionnels, économiques, juridiques ou politiques, la principale difficulté pour l'Equateur étant de trouver les financements nécessaires à la reconstruction de la zone sinistrée et donc de recourir inévitablement à l'aide internationale.

Ce qui est certain, c'est que cette catastrophe de la Josefina a fait prendre conscience aux autorités équatoriennes la nécessité de réaffirmer leur politique de prévention et de gestion des risques naturels et de toutes les réorganisations et soutiens que cela implique sur les plans technique, scientifique, juridique ou de l'organisation des secours. Les nombreux appels à projets qui émanent actuellement de l'Equateur en attestent.

#### 2.6.5. Réponses et coûts associés

L'analyse des conséquences de cette catastrophe a également donné lieu à une structuration des grands types de réponses apportées par la communauté sinistrée pour tenter de retrouver un état d'équilibre initial, aussi bien sur le plan de la sécurité, que du logement ou des échanges et activités économiques. Cela conduit, en fonction de la nature de la réponse à un type de dommage ou de préjudice initial, à proposer une typologie succincte des coûts consécutifs à cette catastrophe. Coûts qui sont classés soit directs, soit indirects et dont le détail figure en **annexe III**.

### 2.7. Conclusion

L'analyse de cette catastrophe de la Josefina a donné l'occasion de reconstituer dans le détail un enchaînement d'événements induits les uns des autres, en mettant à profit une richesse d'informations rarement rencontrée en pareilles occasions.

L'analyse détaillée des phénomènes et l'appréciation de leur intensité à partir d'indices divers ont permis une structuration des dommages associés à cette catastrophe sous forme de matrice.

En terme d'applications potentielles, une telle matrice peut devenir un outil de base indispensable pour affiner l'évaluation des pertes globales imputables à une catastrophe en général.

En effet, une fois qu'on est capable d'affecter à chaque mode d'endommagement un taux de pertes (compris entre 0 et 1) calculé sur un coût de remise en état du bien, on a les moyens pour l'ensemble du stock d'éléments représenté sur la zone exposée d'approcher le montant économique des pertes matérielles.

Cette approche peut aussi être utilisée à but prospectif, pour tenter de prévoir ce que seront les pertes potentielles d'une zone menacée par un phénomène pressenti. On entre alors dans le domaine des scénarios de vulnérabilité et de risque (*cf.* Leone *et al.*, 1995 ; Velásquez *et al.*, 1994 et Velásquez *et al.*, 1995).

Mais de tels développements ne peuvent se faire qu'à condition de perfectionner notre connaissance du thème de la vulnérabilité, en généralisant ce type d'analyse en retour, pour mieux comprendre et donc tenter de mieux prévoir ...

### 3. Les événements du Diois (Drôme, France, Janvier 1994) : des phénomènes dispersés mais aux effets cumulables

#### 3.1. Présentation

Au cours des 6 et 7 Janvier 1994, la région du Diois (**fig. II.13**) a été le siège d'une multitude de phénomènes de mouvements de terrain qui, associés au travail de sappe et d'inondation des torrents en crue ont provoqué des dégâts considérables.

Ces phénomènes dommageables ont été le résultat d'intempéries particulièrement exceptionnelles qui ont affecté l'ensemble du département de la Drôme et une grande partie du sud-est de la France.

Les retombées médiatiques de ces événements du Diois ont été largement occultées par la catastrophe de la Salle-en-Beaumont, distante de quelques kilomètres seulement et survenue dans la même période (8 janvier). Elle a fait l'objet d'une étude particulière décrite dans le cadre de ce chapitre (*cf.* §. 4, **chap. II**).



Figure II.13 - Situation géographique de la zone d'étude du Diois.

La région du Diois (arrondissement de Die) s'est distinguée du reste du territoire sinistré (hormis le Nyonsais et les Baronnies) par la prépondérance des dommages imputables à des phénomènes de mouvements de terrain : dommages directs sur des biens et des équipements ou indirects sous forme de préjudices divers liés principalement au dysfonctionnement des réseaux de communication.

Compte tenu de la densité élevée de ces phénomènes et de la diversité de leurs conséquences, il est apparu intéressant de mener sur la région du Diois, d'une part une analyse économique de l'ensemble de ces événements et d'autre part quelques investigations plus fines venant éclairer le concept de vulnérabilité.

Parmi celles-ci figurent l'analyse des modes d'endommagement du réseau routier et l'évaluation des différentes formes de préjudices occasionnés par l'enclavement de la commune de Boulc.

### 3.2. Description des phénomènes

#### 3.2.1. Des intempéries à caractère exceptionnel

Les intempéries des 6 et 7 Janvier 1994 ont pris un caractère exceptionnel par la quantité d'eau tombée (**tab. II.5** et **fig. II.14**) : 150 mm en deux jours et même plus de 200 mm localement à Séderon, Mollans-sur-Ouvèze et Montjoux ; par l'intensité des précipitations : jusqu'à 5 et 10 mm par heure dans la nuit du 6 au 7 et par l'étendue de la zone de fortes pluies : elle a recouvert une vaste partie du département, et en particulier les bassins versants entiers de cours d'eau tels que la Drôme, l'Eygues, l'Ouvèze, le Roubion, le Jabron.

STATIONS	Lus-la-Croix-Haute	Valdrôme	St-Nazaire-le-Désert	Montjoux	Séderon	Mollans-sur-Ouvèze
Cumul sur 24 h	123 mm	141 mm	131 mm	194 mm	181 mm	172 mm
Cumul sur 36 h	168 mm	178 mm	165 mm	227 mm	218 mm	204 mm

**Tableau II.5** - Précipitations (en mm de hauteur d'eau) cumulées sur 24 heures (du 6/01 à 7 h au 7/01 à 7 h) et sur 36 h (du 5/01 au 7/01) pour quelques stations de la Drôme (d'après données Météo-France, 1994).

Cet épisode pluvieux a correspondu, comme c'est souvent le cas dans ce secteur de la France, à une exacerbation locale des quantités précipitées par canalisation puis ascendance et arrivée à saturation des flux d'humidité en provenance à la fois de l'Atlantique et de La Méditerranée (Pech & Sevestre, 1994).

D'après Météo-France (1994), il ressort comme étant le plus important épisode des mois d'hiver (décembre à mars) des trente dernières années pour les pluies sur 24 à 72 heures dans plusieurs postes climatologiques du sud de la Drôme. Le précédent phénomène de ce type, qui a également concerné une vaste zone est l'épisode du 18 au 20 mars 1971.

L'estimation de l'occurrence de ces pluies fortes d'hiver peut être estimée à des périodes de retour d'au moins 20 ans, voire 50 ans et plus pour les secteurs de Séderon, Lus-la-Croix-Haute et Valdrôme.

Cet épisode est survenu après une phase de précipitations déjà soutenues. En effet le département de la Drôme avait été particulièrement arrosé au cours des mois de septembre et d'octobre précédents avec un cumul des précipitations sur ces deux mois compris entre 304 mm (Mollans-sur-Ouvèze) et 711 mm (Montjoux)<sup>16</sup> (**fig. II.15**) (Monteillet, 1994).

La fin de décembre et le début de janvier avaient aussi été marqués par des jours pluvieux : 20 à 30 mm sur le Diois et 15 mm sur les Baronnies pour la journée du 2 janvier.

<sup>16</sup> A titre de comparaison, notons que sur ces régions, la moyenne annuelle des précipitations est comprise entre 850 et 900 mm.

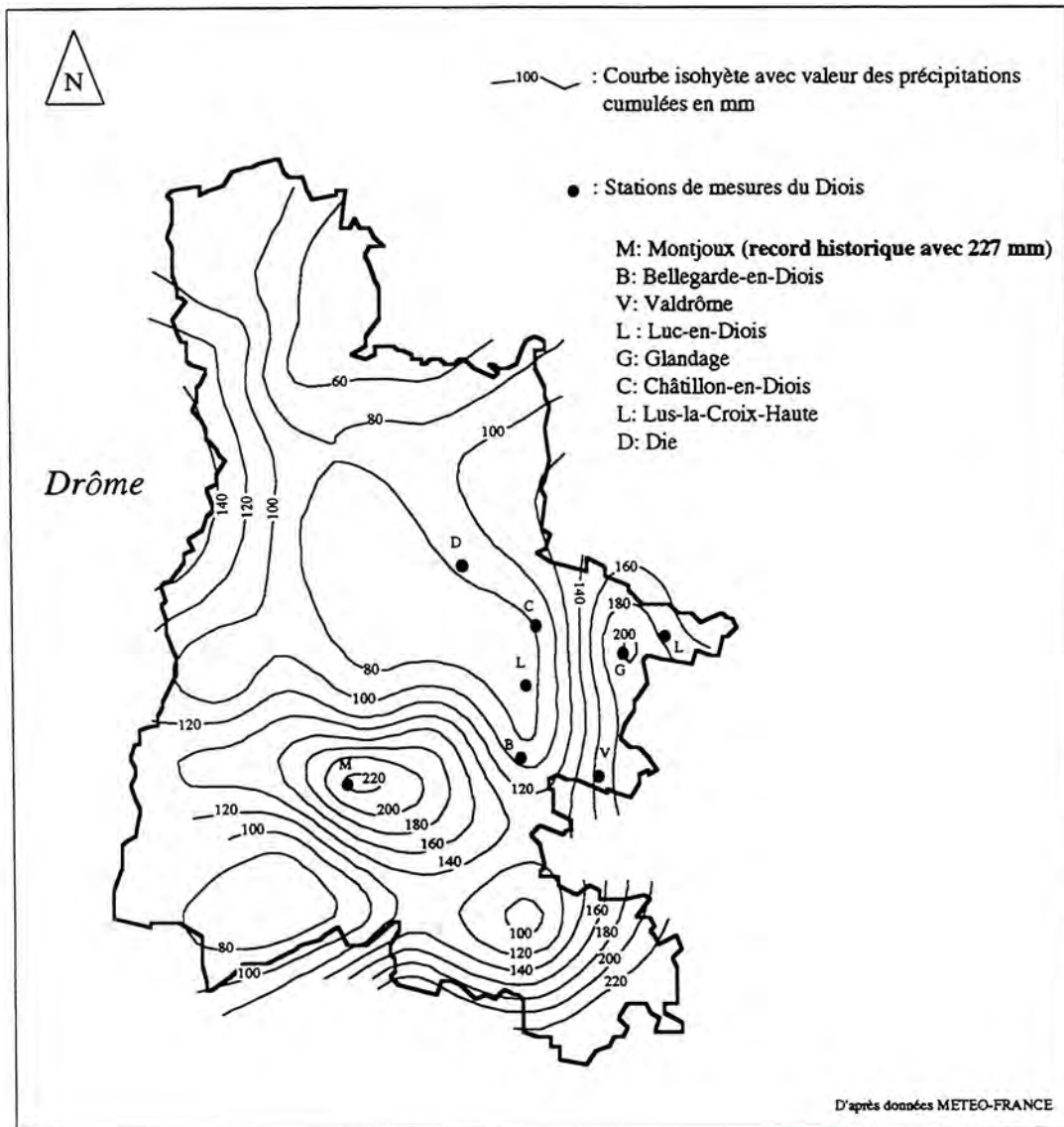


Figure II.14 - Carte des isohyètes du département de la Drôme pour l'épisode pluvieux du 5 au 6 janvier 1994 (d'après données Météo France).

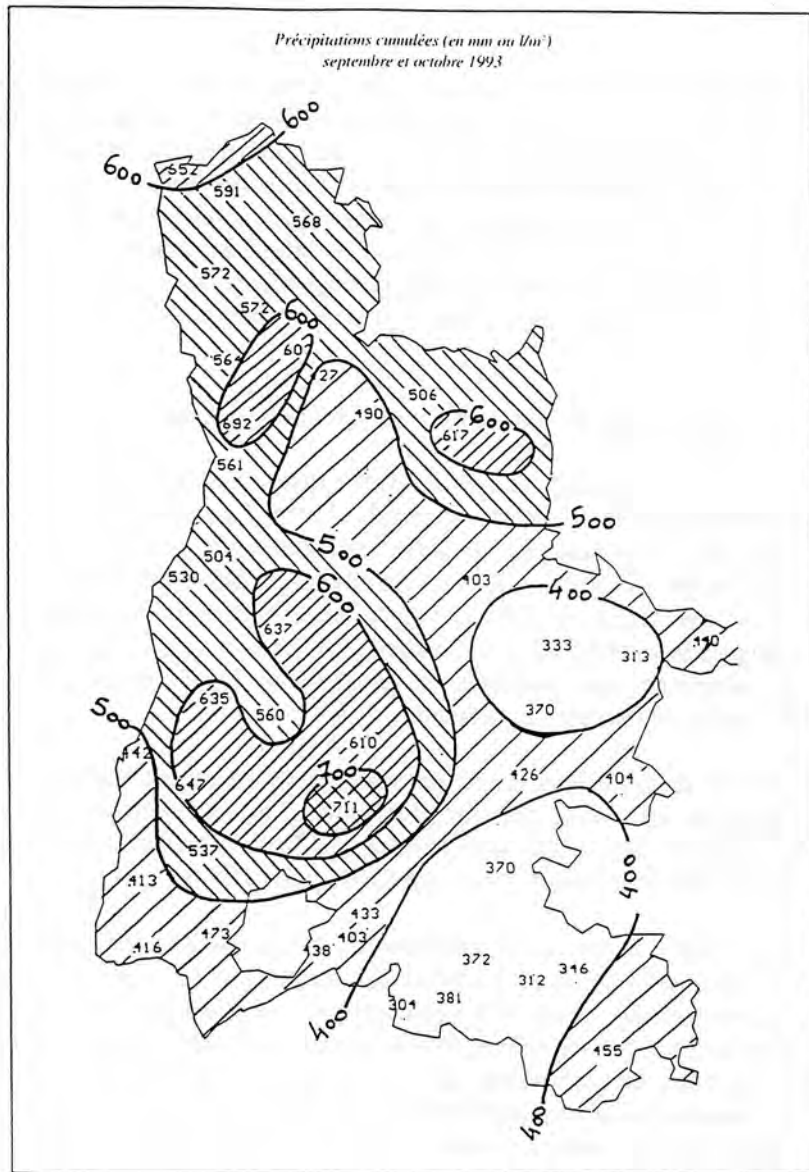


Figure II.15 - Précipitations cumulées correspondant aux épisodes pluvieux de septembre et octobre 1993 (d'après données Météo-France *in* Monteillet, 1994).

Ces périodes pluvieuses ont donc préalablement saturé des sols qui ne subissent à cette période de l'année qu'une très faible évaporation et contribué à entretenir un régime soutenu de nombreux cours d'eau. Cette saturation des sols fut d'autant plus accentuée dans le Diois le 6 janvier qu'ils étaient surmontés d'une couverture neigeuse oscillant entre 30 et 50 cm suivant l'exposition des versants (Rey, 1994).

En plus d'un rôle déclencheur de nombreux mouvements de terrain, ces pluies abondantes ont entraîné des crues de nombreux cours d'eau. Crues que l'on peut également qualifier d'exceptionnelles, en particulier pour la rivière Drôme qui a vu son débit atteindre une valeur record de 500 m<sup>3</sup>/s à Saillans (la plus forte valeur enregistrée depuis la mise en service de la station de mesure en 1966) soit environ 630 m<sup>3</sup>/s au niveau de Crest (Dauphiné Libéré, 1994).

Cette crue de la Drôme peut être qualifiée de récurrence cinquantenaire en amont de Luc-en-Diois et en aval de Crest jusqu'à son débouché sur le Rhône. Par contre, dans la partie médiane du cours, entre Die et Saillans, elle n'est plus que décennale à vingtennale. Ceci provient en particulier du fait que l'alimentation par les cours d'eau drainant le massif du Vercors est restée modérée, cette zone ayant été épargnée par les intempéries. Une seconde cause réside dans le fait qu'en amont de Luc-en-Diois, la vaste plaine du Claps<sup>17</sup> a joué un rôle tampon en retenant un volume d'eau considérable qui s'est réparti sur environ 160 hectares et 2 m de hauteur (Rey, 1994). Les conséquences en aval en ont été d'autant moins désastreuses même si l'inondation de cette plaine a provoqué quelques dégâts.

### 3.2.2. Des phénomènes de mouvements de terrain nombreux et dispersés

De mémoire d'homme on n'avait jamais constaté dans le Diois un telle profusion de glissements et autres phénomènes de mouvements de terrain. Certes, la susceptibilité de la région à ce type de phénomènes n'est plus à démontrer : il suffit d'évoquer par exemple les glissements et écroulements de Bonneval-en-Diois (Morissau & Asté, 1988), de la Bâtie-des-Fonds (Méjean, 1936), de Marignac-en-Diois, du Claps (Humbert, 1981 et Flageollet, 1989) ou de la Montagne d'Oule (De Gasparin, 1830) pour s'en persuader (**tab. II.6**). Cependant, ces deux journées d'intenses précipitations ont suffi à réactiver simultanément une multitude de glissements, jouant un rôle de révélateur de l'instabilité plus ou moins connue de nombreux versants.

Outre le rôle déclencheur des précipitations issues de contrastes climatiques marqués, c'est à la très grande variabilité des paysages morphologiques et géologiques, à des lithologies dominées par les marno-calcaires et à des positions structurales particulières que l'on doit cette forte représentation des phénomènes de mouvements de terrain dans le Diois (*cf.* Masseport, 1960).

Concernant les événement étudiés, un travail de recensement<sup>18</sup> restreint à la région du Diois (cantons de Die, Luc-en-Diois, Châtillon-en-Diois et La-Motte-Chalançon) nous a permis d'identifier une centaine d'instabilités dommageables (**ann. VI**) représentées essentiellement par des phénomènes d'affaissements, de coulées boueuses ou de débris, d'éboulements et de glissements ; ce qui correspond à une densité moyenne d'environ un phénomène par km<sup>2</sup>. Selon d'autres auteurs (Pech & Sevestre, 1994), des phénomènes comparables se sont également déclenchés dans le département limitrophe des Hautes-Alpes et plus particulièrement dans le bassin versant du Buëch. Une quinzaine de glissements de terrain souvent à l'origine de coulées boueuses ont été recensés par ces auteurs dans cette région pour la même période .

<sup>17</sup> Cette plaine correspond au remblayage d'un ancien lac provoqué en 1442 par l'obstruction de la vallée de la Drôme consécutivement à un glissement rocheux plan de 2 millions de m<sup>3</sup> au lieu dit "le Claps" (*cf.* **tab. II.6** et **ann. VII.1**).

<sup>18</sup> Ce recensement s'est effectué à l'occasion de plusieurs missions de reconnaissance sur le terrain, notamment en collaboration avec les pompiers de Die et également à la faveur d'un survol avec l'hélicoptère de la sécurité civile.

LOCALITE et DATE	CARACTERISTIQUES DU PHENOMENE	CONSEQUENCES
<b>Bonneval-en-Diois</b> (Terre-Rouge) <i>depuis 1950</i>	- nature : mouvement complexe présentant une zone d'affaissement et de glissement massif, une zone déstabilisée et remaniée et une zone de transfert et de dépôts (coulées)	- risque d'obstruction du ruisseau en contrebas - habitation menacée par la coulée
<b>La-Bâtie-des-Fonds</b> (village) <i>3 janvier 1936</i>	- nature : glissement lent dans un couloir de marnes bleues de l'Aptien-Albien - durée : 4 mois - superficie : 200 hectares - extension : du col de Carabès au village de la Bâtie-des-Fonds	- bouleversement de 200 hectares de champ et de bois - destruction d'un pont et de 1500 m de route - destruction d'un quinzaine de maisons
<b>Marignac</b> (le Pas-de-la-Roche) <i>préhistorique</i>	- nature : écoulement rocheux	- obstruction de la vallée et formation d'un lac de retenue
<b>Le Claps</b> (en amont de Luc-en-Diois) <i>1442</i>	- nature : glissement banc-sur-banc dans calcaires jurassiques - volume : 2 millions de m <sup>3</sup>	- obstruction de la vallée de la Drôme sur 800 m de long et formation de deux lacs de retenue
<b>La Montagne d'Oule</b> (au sud de La-Motte-Chalançon) <i>novembre 1829</i>	- nature : glissement progressif	- bouleversement complet de la topographie - barrage de l'Oule sur 140 m de long et débâcle partielle de la retenue un mois après

Tableau II.6 - Caractéristiques de quelques phénomènes de mouvements de terrain célèbres dans la région du Diois.

Sur le Diois, les phénomènes recensés se localisent surtout suivant une bande géographique d'une quinzaine de kilomètres de largeur et disposée suivant un arc de cercle dont le centre se situerait au niveau de Die (**ann. VI.1**). Cela correspond à une zone de reliefs relativement escarpés et caractérisée par des matériaux favorables à la fluidification apportée par les eaux d'infiltration (horizons marneux, soit du Jurassique moyen soit du Crétacé inférieur).

Certains des glissements sont lents et correspondent à d'anciens mouvements déjà recensés dans le passé (Humbert, 1981). Les circonstances climatiques ont permis leur réactivation alors qu'ils sont habituellement en sommeil. C'est le cas par exemple du glissement de Ravel-et-Ferrier (commune de Boulc) (**réf. D10-ann.VI**), déjà mentionné sur la carte géologique (coupure au 1/50 000<sup>e</sup> de Mens).

Certains ont parfois généré des coulées de boue ou de débris comme par exemple au dessus du village de Ponet-et-Saint-Auban (**réf. B1-ann.VI**) ou bien sur le versant dominant la route départementale 106 menant au village de la Bâtie-des-Fonds (**réf. D5, D6-ann.VI**)

D'autres glissements sont plus superficiels et d'extension plus limitée comme à Glandage (**réf. B4, B5, T, T3-ann.VI**), à Montmaur-en-Diois (ferme Lantheaume, **réf.B3-ann.VI**) ou à Ponet (ferme Shook, **réf.B2-ann.VI**).



Les plus préoccupants, de par le volume mobilisé et les enjeux associés, restent ceux de Ravel-et-Ferrier, Beaurière, Ponet-et-Saint-Auban, Le Cheylard et la Bâtie-des-Fonds (**tab. II.7**). Il s'agit de glissements complexes, parfois nouveaux et dont l'activité demeure encore aujourd'hui, rythmée par les conditions hydrologiques.

LOCALITES	CARACTERISTIQUES DU PHENOMENE	PRINCIPAUX ENJEUX
<b>Ravel-et-Ferrier</b> (réf.D10-ann.VI)	- instabilité déjà répertoriée (Humbert, 1981) - nature : glissement rocheux complexe - volume mobilisé : 5 à 10 millions de m <sup>3</sup>	- enclavement de la commune de Boulc et de ses 100 habitants et risque d'obstruction de la vallée du ruisseau de Boulc
<b>Beaurière</b> (réf. VF-ann.VI)	- instabilité nouvelle (Marie, 1994) - nature : glissement -coulées - volume mobilisé : 250 000 m <sup>3</sup>	- menaces pour la ligne SNCF Paris-Briançon
<b>Ponet-et-Saint-Auban (village)</b> (réf.B1-ann.VI)	- instabilité déjà répertoriée (Humbert, 1981) - nature : coulées boueuses - volume mobilisable : quelques milliers de m <sup>3</sup>	-menaces pour quelques habitations du village
<b>Le Cheylard</b> (réf.T4-ann.VI)	- instabilité nouvelle (Marie, 1994) - nature : glissement typique - volume mobilisé : environ 2 millions de m <sup>3</sup>	- risque d'obstruction de la vallée de la Drôme
<b>La Bâtie-des-Fonds (R.D.106)</b> (réf.D5,D6-ann.VI)	- instabilité nouvelle (Marie, 1994) - nature : glissements complexes et coulées - volume mobilisé : plusieurs milliers de m <sup>3</sup>	- risque d'obstructions et de destructions périodiques de la route R.D. 106 menant au département des Hautes-Alpes

**Tableau II.7** - Caractéristiques de quelques glissements préoccupants du Diois, activés ou réactivés par les intempéries des 6 et 7 Janvier 1994 (les numéros de référence renvoient à la carte de localisation située en **annexe VI** et des illustrations sont portées en **annexe VII**).

### 3.3. Essai d'inventaire et d'analyse des conséquences économiques

#### 3.3.1. Présentation

Dès le 7 janvier au matin, les services de secours de la Drôme ont signalé l'apparition des nombreux mouvements de terrain présentés ci-dessus, alertés par les différents particuliers et services publics sinistrés. L'état de crise a été généralisé sur l'ensemble du département et plus particulièrement sur le Diois, motivant des reconnaissances en hélicoptère, le recours à des experts, la prise de mesures d'urgences d'évacuation et de protection des populations et des biens.

Aux effets des phénomènes de mouvements de terrain se sont ajoutés les dégâts des eaux résultant de ravinements intenses, d'érosions torrentielles et d'inondations généralisées, si bien qu'au total ce sont 115 communes sur les 371 que compte le département qui se déclaraient sinistrées (soit 31 %).

L'état de catastrophe naturelle était alors constaté par les autorités (arrêté du 12 avril 1994), tout comme pour la même période dans les départements des Hautes-Alpes, des Alpes-Maritimes, de l'Ardèche, de l'Isère, de la Loire, du Vaucluse, etc.

Dans le département de la Drôme ces déclarations de janvier sont venues alourdir celles des intempéries de septembre (3 communes) et d'octobre 1993 (37 communes), ce qui représente un total de 155 communes sinistrées pour les trois périodes évoquées (**fig. II.16**).

La région du Diois, épargnée par les intempéries précédentes, devait compter pour les événements de Janvier, 29 communes sinistrées officiellement.

Le bilan a donc été lourd et compte tenu de la densité des points d'impact, de la nature même des phénomènes et de la rapidité des événements, les pouvoirs publics n'ont pu que constater les dégâts et se résigner à réparer l'outrage de la nature sans pour autant en tirer des leçons <sup>19</sup>.

Pourtant, en dressant déjà dans un premier temps un bilan économique global de ces événements, seule valeur apparemment compréhensible par les politiques et autres décideurs <sup>20</sup>, on peut espérer attirer l'attention des pouvoirs publics sur l'impact des mouvements de terrain et sur leur importance en général par rapport à d'autres phénomènes naturels dommageables.

<sup>19</sup> A ce jour, et à notre connaissance, aucune étude de risque officielle, excepté sur le cas du glissement de Ravel-et-Ferrier, n'a été entreprise sur le Diois, malgré la richesse des enseignements à en tirer et les enjeux représentés.

<sup>20</sup> Le cas du glissement de Ravel-et-Ferrier qui enclave la commune de Boulc en est l'illustration même, les autorités ayant souvent tendance à considérer les enjeux directs, surtout s'ils sont économiques, plutôt que les effets indirects, de surcroît quand ils ne sont pas monétairement quantifiables.

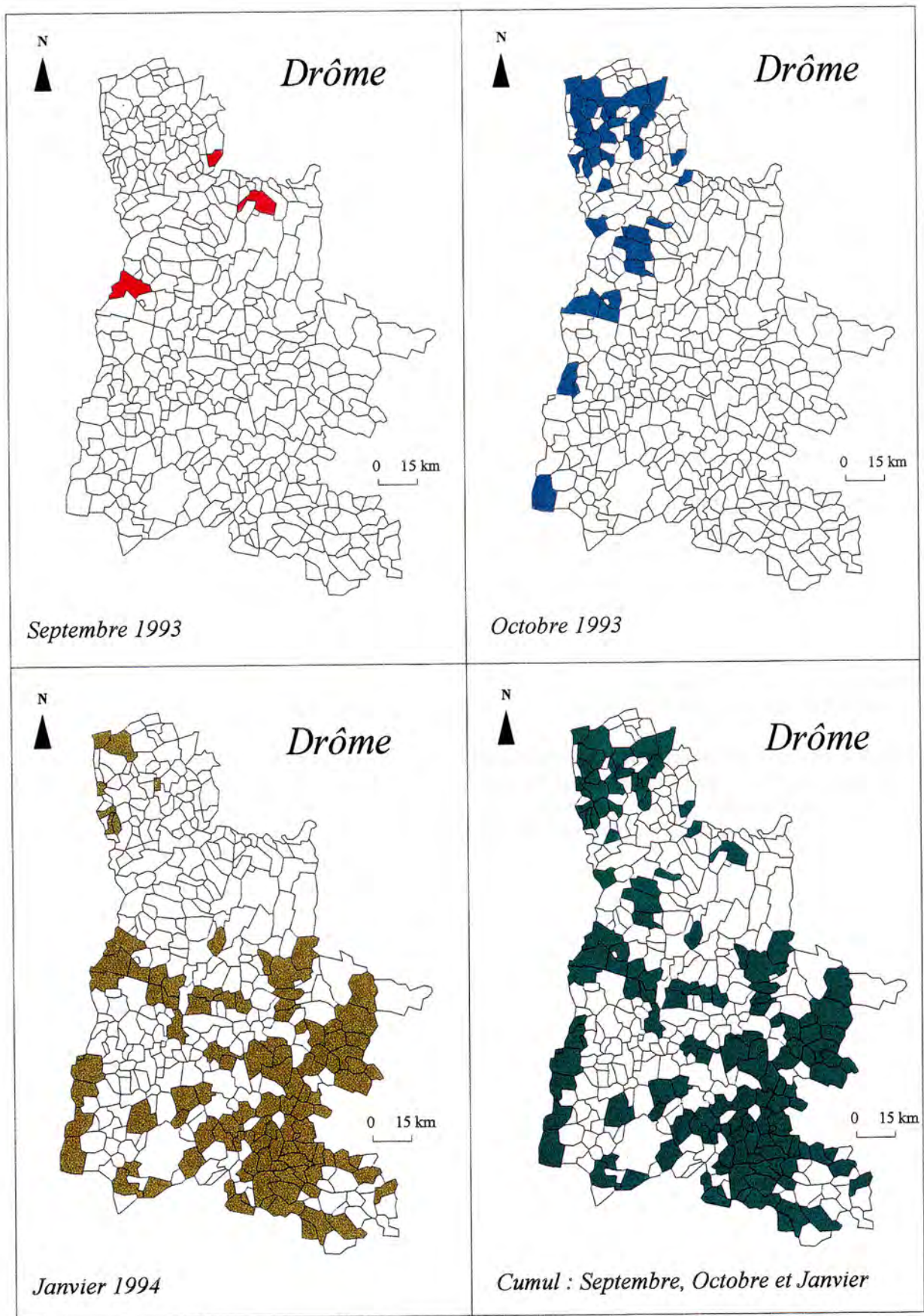


Figure II.16 - Communes drômoises déclarées sinistrées par les intempéries de septembre et octobre 1993 et janvier 1994 (d'après les fiches communales de déclarations de dommages).

### 3.3.2. Données disponibles

Par chances les événements du Diois n'ont fait aucune victime. Par contre les dégâts matériels aux biens et infrastructures divers ont été importants. Il est apparemment difficile d'en dresser un bilan consolidé compte tenu de la diversité des éléments sinistrés et surtout de la dispersion des données économiques réparties entre une multitude de services publics ou privés qui assurent la gestion et la maintenance de ces biens.

C'est encore plus délicat pour les biens particuliers, les compagnies d'assurance demeurant souvent réticentes à livrer le détail de leurs données, pourtant indispensable pour différencier la nature des coûts comptabilisés.

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

**Tableau II.8** - Liste de quelques sources d'informations susceptibles d'être consultées pour une évaluation de l'impact économique des catastrophes naturelles.

Pour ce volet économique, on s'est limité à l'établissement d'un bilan partiel des pertes surtout directes, c'est-à-dire matérielles, auquel viennent s'ajouter quelques données supplémentaires comme le coût des interventions de secours ou quelques pertes de revenus.

En France, faute de service collecteur unique, ce bilan économique peut s'effectuer à partir d'investigations par échantillonnage auprès d'une série d'organismes et institutions dont on dresse ici une liste non-exhaustive qui a été en partie exploitée dans le cadre de cette étude (**tab. II.8**).

Compte tenu des différences de qualité et de précision des données disponibles, on a retenu pour l'évaluation économique de l'impact de ces mouvements de terrain, deux approches distinctes mais complémentaires.

La première approche est macro-économique. Elle repose essentiellement sur des données approximatives et fragmentaires recueillies auprès des services de la sécurité civile (fiches de déclaration des dommages). Elle s'applique à tout le département de la Drôme et donne une vision globale des sinistres.

L'autre approche, d'ordre micro-économique est beaucoup plus fine et ciblée que la précédente. Elle relève d'un véritable travail d'enquête sur le terrain. Elle couvre tout le secteur du Diois et s'avère beaucoup plus discriminante vis à vis des phénomènes impliqués. De plus elle permet de hiérarchiser les coûts et d'apporter quelques commentaires sur les modes d'endommagement de quelques éléments affectés.

### 3.3.3. Analyse macro-économique

Le dépouillement des fiches de déclaration des dommages envoyées par les communes sinistrées à la préfecture pour pouvoir bénéficier de l'arrêté de catastrophe naturelle au titre de la loi du 13 juillet 1982 (**ann.VIII**) a permis au niveau départemental de dresser un premier bilan mais qui ne permet pratiquement pas de différencier les effets des phénomènes de mouvements de terrain de ceux des phénomènes hydrauliques (**ann.IX**).

La cartographie qui en découle (**fig. II.17**) permet néanmoins d'apprécier la distribution spatiale des secteurs affectés et l'importance des dommages que l'on suppose être proportionnelle au nombre de déclarations par communes.

Les communes les plus touchées se situent en bordure du Rhône (Montélimar, Pierrelatte, Larnage, Châteauneuf-du-Rhône et Loriol avec respectivement 134, 125, 50, 25 et 22 déclarations) et le sont surtout du fait des inondations qui affectent des superficies importantes.

Ces inondations sont également bien représentées dans les Baronnies et le Diois mais davantage en association avec des mouvements de terrain (Mérindol-les-Oliviers, Glandage, Les Pilles et Die avec respectivement 42, 13, 12 et 11 déclarations). Leur distribution coïncide bien avec les secteurs de fort gradient de précipitations visibles sur la **figure II.14**. Au total, sur l'ensemble du département, on dénombre 797 déclarations de dommages réparties entre les 115 communes sinistrées (46 correspondant aux seuls effets de mouvements de terrain, 248 aux effets de phénomènes hydrauliques et 503 indifférenciées).

Ces déclarations de dommages concernent essentiellement les biens et infrastructures privées ou publiques, mais ne comptabilisent pas les dégâts aux réseaux publics et en particulier routier autre que communal. Les coûts qui y correspondent parfois ne sont qu'indicatifs (appréciation "à chaud" des dégâts) compte tenu du peu de délai de temps accordé aux mairies pour transmettre ces informations à la préfecture (quelques jours seulement).

Néanmoins, un premier bilan provisoire fait état au niveau du département d'un montant des dégâts s'élevant à 9 520 780 F pour les biens privés et 9 116 254 F pour les biens publics, soit un total de 18 637 034 F (**tab. II.9**). Il s'agit d'une valeur largement en deçà de la réalité sachant que seulement 51 des 115 communes sinistrées ont indiqué des coûts dans leurs fiches de déclarations. Cela représente un coût moyen des dégâts par commune sinistrée de 365,4 kF, tous phénomènes confondus (**fig. II.18**).

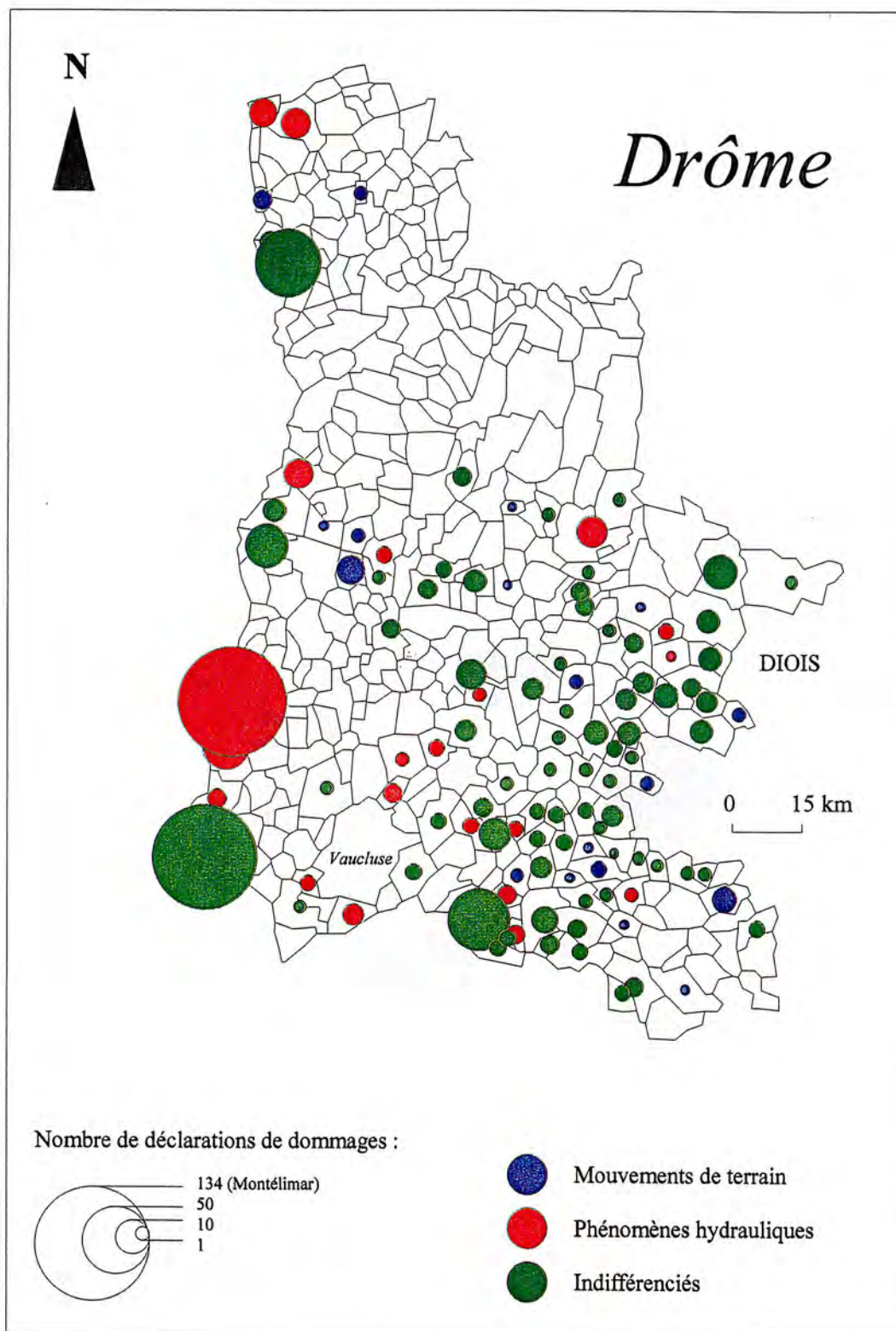


Figure II.17 - Communes drômoises sinistrées par les intempéries du 5 au 10 janvier 1994 (d'après fiches communales de déclaration de dommages).

Disposant de 14 déclarations de dommages consécutifs à des mouvements de terrain chiffrées économiquement pour un montant global de 1 596 130 F, on en déduit un coût moyen par déclaration d'environ 114 kF. La même démarche (186 déclarations pour 7 397 410 F) conduit pour les phénomènes hydrauliques à la valeur moyenne de 39,8 kF par déclaration.

On voit donc que d'une façon générale les phénomènes de mouvements de terrain entraînent des dommages plus coûteux que pour les phénomènes hydrauliques (rapport de 3 pour 1 environ), autrement dit que leur capacité d'endommagement est plus forte. Ceci se vérifie surtout vis à vis des phénomènes hydrauliques de type inondation ou ravinement intense, mais cela devient moins évident comparé aux effets de l'érosion torrentielle.

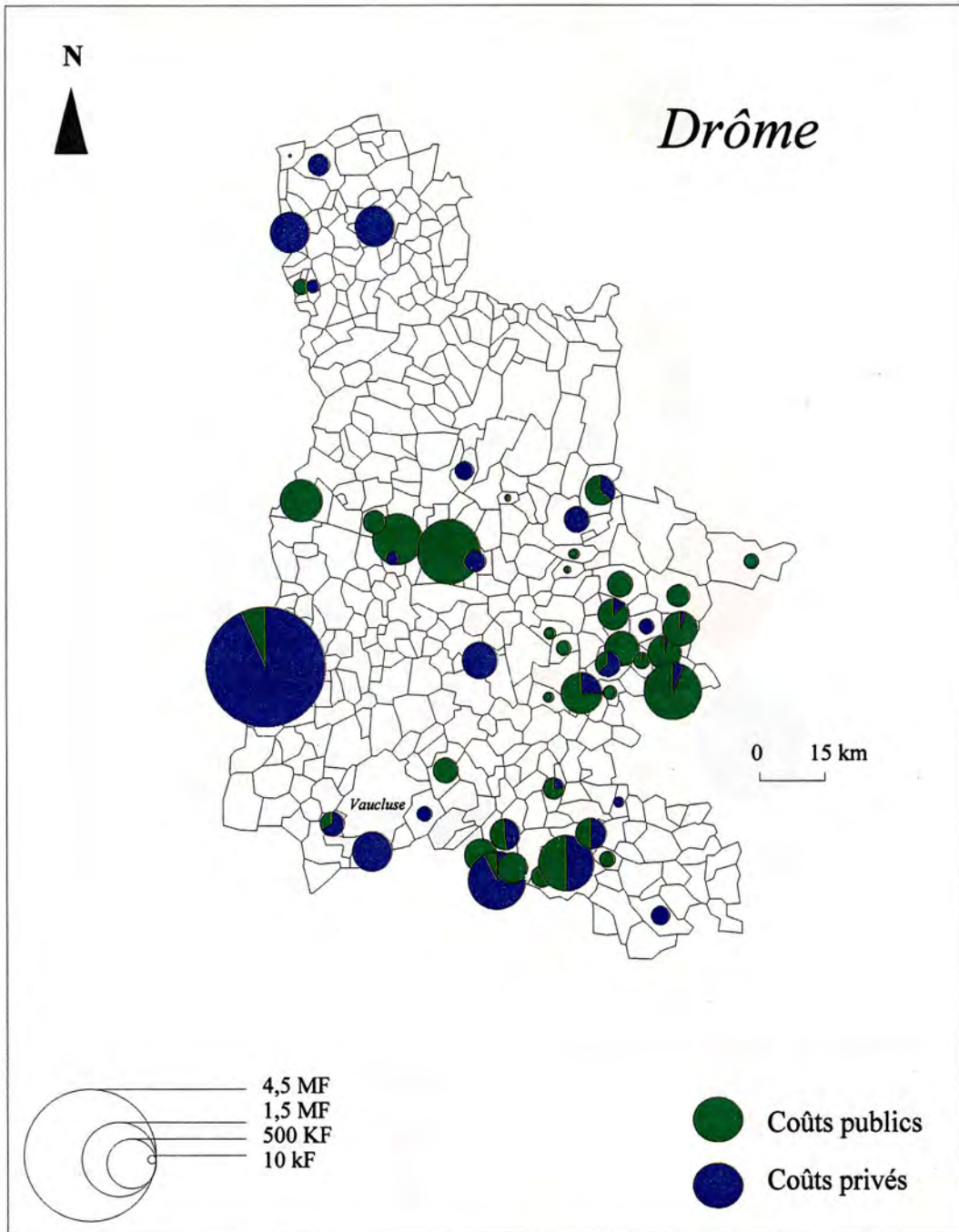


Figure II.18 - Distribution des coûts des dégâts déclarés par les communes drômoises sinistrées suite aux intempéries du 5 au 10 janvier 1994 (d'après fiches communales de déclarations de dommages).

Ainsi, on constate que les phénomènes de mouvements de terrain ou d'érosion torrentielle affectent souvent les biens matériels de manière profonde et irréversible (endommagement des structures) alors que les autres phénomènes hydrauliques entraînent généralement des dommages plus légers (donc moins coûteux), en particulier d'ordre mobilier.

Pour ce qui est de la région du Diois, on recense 30 communes sinistrées sur les 51 qu'en compte cette région (soit 57 %). Ce qui représente un total de 126 déclarations de dommages (soit 16 % du total départemental) dont 5 pour des mouvements de terrain, 16 pour des phénomènes hydrauliques et 105 indifférenciées.

La moyenne des déclarations par commune y est pratiquement de moitié plus faible que sur l'ensemble du département (3 pour 6), mais avec 57 % de communes sinistrées, le Diois apparaît bien comme un secteur où l'on a une forte densité de communes sinistrées comparé au reste du département, mis à part la région des Baronnies où l'on enregistre des densités encore plus élevées mais moins de déclarations de dommages.

Le bilan partiel des pertes directes correspondant s'élève à 4 530 824 F (soit 24,3 % des pertes totales départementales), répartis entre 772 630 F pour les atteintes aux biens privés (soit 0,08 % des pertes privées départementales) et 3 758 044 F pour celles au secteur public (soit 41 % des pertes publiques départementales).

Cela correspond essentiellement à des dégâts aux bâtiments, surfaces agricoles, voies communales et quelques autres infrastructures. Les communes les plus touchées sont celles de Valdrôme (1 038 600 F) dans le haut Diois et la Motte-Chalançon (548 950 F). Mais même si l'on sait que les phénomènes hydrauliques y sont sous-représentés par rapport aux mouvements de terrain, on n'a pas les moyens de différencier les coûts associés à chacun d'entre eux car les fiches d'identification sont remplies de telle façon que le montant des pertes est global pour la commune. Il s'avère donc nécessaire d'affiner l'analyse en repartant de la base, au niveau de chaque service affecté, par une approche micro-économique.

Coûts en francs	Pertes du secteur public	Pertes du secteur privé	Total
Département de la Drôme	9 116 254	9 520 780	18 637 034
Secteur du Diois	3 758 044	772 630	4 530 824

**Tableau II.9** - Bilan comparé des pertes économiques directes consécutives aux intempéries du 5 au 10 Janvier 1994 (d'après les fiches de déclaration de dommages des communes sinistrées). Analyse macro-économique tous phénomènes confondus.

#### 3.3.4. Analyse micro-économique

L'analyse porte sur les cantons de Die, Châtillon-en-Diois, Luc-en-Diois et la Motte-Chalançon. Cela représente 51 communes essentiellement rurales, excepté celle de Die (sous-préfecture), réparties sur une superficie d'environ 2 040 km<sup>2</sup> (**fig. II.19**). Les populations communales y oscillent entre 3 habitants pour Rochefourchat (plus petite commune de France) à 4 000 habitants environ pour Die. La population globale y est de 9 766 habitants (I.N.S.E.E., 1988a) soit une densité moyenne d'environ 5 habitants au km<sup>2</sup>, ce qui en fait une des régions les moins peuplées de France.

Compte tenu des difficultés pour obtenir des données sur les atteintes aux biens privés (habitations, mobiliers, cultures et terrains essentiellement), les chiffres apportés par cette analyse micro-économique concernent essentiellement l'endommagement des biens publics, en particulier des réseaux de communication et de transport.

Sont comptabilisés les seuls effets des phénomènes de mouvements de terrain. La carte de localisation en **annexe VI.1** permet d'en apprécier la diversité et la distribution spatiale par type d'élément affecté.



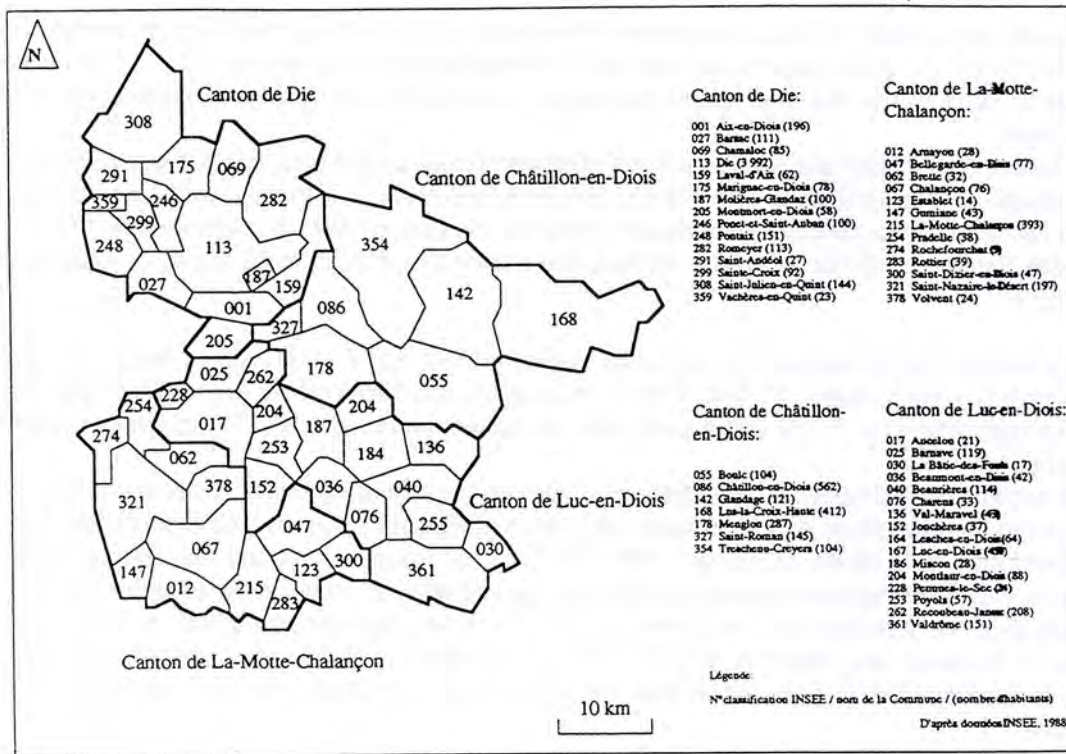


Figure II.19 - Découpage cantonal et communal de la région du Diois (d'après données I.N.S.E.E., 1988a).

Le détail des données récoltées auprès des différents organismes et services détenteurs est présenté dans le **tableau II.10**. Il s'agit de coûts supportés par le secteur public. On a opté dans le cas du Diois pour une hiérarchisation des dommages et coûts associés adaptée à la nature des informations disponibles.

### 3.3.4.1. Dommages et coûts directs

Le recueil des données s'est fait durant les mois de février à juillet 1994. De ce fait les coûts comptabilisés correspondent soit à des mesures de réhabilitation, de réparation ou de reconstruction déjà effectuées (travaux d'urgence le plus souvent), soit à des estimations des travaux à réaliser de manière définitive et à plus long terme pour retrouver toute la fonctionnalité des biens endommagés. Figure ici aussi le coût des interventions de secours, de surveillance et de mise en sécurité immédiate de certains sites.

- **Dommages aux bâtiments** : quelques bâtiments privés ont été endommagés par des glissements de terrain superficiels (à Ponet et Glandage). Il s'agit dans tous les cas de dommages structurels légers (fissurations des murs) liés au fait que souvent ces bâtiments sont anciens (fermes traditionnelles) ou secondaires (bergeries, granges, appentis) et qu'ils ne bénéficient pas toujours de fondations adaptées. Bien que leur stabilité ne soit pas en danger immédiat, on peut tout de même s'inquiéter du devenir de certains d'entre eux en cas de réactivation des glissements qui les menacent.

- **Dommages aux surfaces agricoles et forestières** : de nombreuses terres agricoles (cultivables ou en prairies naturelles) ont été endommagées par les glissements ou les coulées de boues. Concernant les glissements, il s'agit le plus souvent de bouleversements topographiques plus ou moins marqués comme à Glandage ou à Montmort. Les dommages générés par les coulées de boue et de débris sont souvent moins préjudiciables car un simple déblaiement peut permettre la réhabilitation des champs engravés à moins que ceux-ci n'aient été emportés par les coulées et dans ce cas là, perdus à jamais.

Les cultures ont été épargnées, car inexistantes à cette période de l'année, au contraire des forêts domaniales ou privées qui ont surtout souffert des phénomènes de glissements qui sont venus le plus souvent coucher les arbres. Aucune données économiques n'ont pu être récoltées à ce niveau.

- **Dommages au réseaux** : comme c'est souvent le cas avec les phénomènes de mouvements de terrain, les différents réseaux, structures linéaires par excellence, sont les éléments les plus vulnérables et donc les plus endommagés. Parmi ces réseaux endommagés figurent une conduite forcée d'alimentation en eau d'une micro-centrale située sur la commune de Boulc, des lignes électrique et de téléphone à Boulc et La-Bâtie-des-Fonds, des adductions d'eau (Glandage) et de nombreuses routes départementales ou communales desservant l'ensemble du Diois. La ligne S.N.C.F. Paris-Briançon a été et reste menacée par le glissement de Beaurière (**tab. II.6**), ce qui a nécessité une surveillance continue de la déformation potentielle des voies durant 1 500 heures <sup>21</sup>. Compte tenu de la prédominance des dégâts au réseau routier, une analyse plus approfondie les concernant sera menée dans le cadre de ce travail (cf. §. 3.4., chap. II).

- **Interventions de secours** : les événements du Diois ont mobilisé tous les moyens de secours locaux (pompiers) durant plus d'une semaine et les coûts de ces interventions peuvent être comptabilisés au niveau des pertes directes. On dénombre ainsi 45 sorties (seulement pour les pompiers de Luc et de Die) à raison d'une moyenne de 565 F par sortie (coûts humains et matériels). Ceci sans compter les navettes biquotidiennes assurées pendant 10 jours par les pompiers pour les déplacements des habitants de Boulc désireux de se rendre dans la vallée de la Drôme, ni les missions de reconnaissance en hélicoptère.

<sup>21</sup> Déjà lors de la construction de la voie en 1882, un glissement de terrain situé à quelques centaines de mètres de l'actuel avait nécessité d'entreprendre une déviation en plein rocher plus à l'intérieur de la montagne et d'abandonner une portion déjà construite avec ses ponts et son tunnel fissuré. Il en coûta 18 mois de travaux supplémentaires (Gardelle, 1980).

Type d'élément affecté	Nature des coûts directs	Coûts directs	Nature des coûts indirects	Coûts indirects
Réseau Télécom (téléphone)	- réparations et remplacement	80 000	- installation (en projet) d'un réseau de substitution par voies hertziennes sur la commune de Boulc si la solution tunnel est rejetée	6 000 000
Réseau EDF (électricité)	- réparations et remplacement	700 000	- mise en place de groupes électrogènes pendant 1 mois et demi à La-Bâtie-des-Fonds	120 000
Réseau DDE (routes départementales)	- réparations provisoires - réparations définitives - mesures de prévention ou de protection	1 098 272 2 164 123 263 079	- déviation (piste de Miscon) - projet de tunnel (Boulc) - pertes de revenus forestiers sur 1 an (commune de Boulc) - pertes de location de logements communaux sur 1 an (commune de Boulc)	2 000 000 50 000 000 140 000 19 200
Réseau communal (voies et chemins communaux)	- réparations provisoires - réparations définitives - mesures de prévention ou de protection	1 886 830 635 510 107 285		
Réseau S.N.C.F. (voie ferrée)	- surveillance des voies (mesures d'urgence)	410 000	- travaux de drainage du site	300 000
Micro centrale électrique (conduite forcée de Boulc)			- pertes de revenus sur 1 an (commune de Boulc)	70 000
Personnes et biens domestiques	- interventions de secours, d'assistance et d'évacuation	36 725		
<b>TOTAUX</b>		<b>7 381 824</b>		<b>58 649 200</b>

**Tableau II.10** - Inventaire économique partiel et prévisionnel des effets des phénomènes de mouvements de terrain consécutifs aux intempéries des 6 et 7 janvier 1994 sur la région du Diois. Analyse micro-économique des coûts en francs supportés par le secteur public.

### 3.3.4.2. Effets et coûts indirects

Sont analysés à ce niveau les préjudices, perturbations et mesures diverses induits par l'endommagement des différents types de biens. Les coûts associés disponibles vont des pertes de revenus ou d'exploitation, aux mesures de déviation, de reconstruction d'un réseau ou de substitution de celui-ci par un autre moyen qui assure la même fonction.

Ces effets indirects peuvent avoir des répercussions complexes et à plus ou moins long terme difficiles à quantifier. Néanmoins, pour ce qui est des pertes de revenus, la base de calcul retenue est d'une année, mais il va de soi que le préjudice peut se poursuivre bien au delà de cette période de référence.

On retient ici deux catégories d'éléments ayant subi des dommages directs pour illustrer et quantifier dans la mesure du possible différents types d'effets indirects associés :

- **Effets des perturbations aux réseaux** : les perturbations exercées sur les différents réseaux agissent le plus souvent par enclavement des personnes et de leurs biens, limitant ainsi les communications, les services et les échanges commerciaux. Dans le cas des événements étudiés (environ 10 communes qui sont restées isolées), quand les réparations des réseaux se sont avérées impossibles, il a fallu créer des itinéraires de déviation (par exemple entre Boulc et Miscon), envisager de nouveaux tracés (projet de tunnel de Boulc) ou trouver des moyens de substitution (réseau téléphonique de Boulc par voie hertzienne ou alimentation de la commune de la Bâtie-des-Fonds par groupes électrogènes). Cet enclavement a parfois entraîné des pertes de revenus d'origines diverses (forestiers, énergétiques, locatifs) et aux répercussions dépassant largement le cadre de la commune (cas de Boulc et du canton de Châtillon, cf. §. 3.5, chap. II).

- **Effets des dommages aux surfaces agricoles et naturelles** : une des conséquences des phénomènes de mouvements de terrain est de condamner à plus ou moins long terme certaines surfaces, voire exploitations agricoles. En effet les travaux de terrassement et de drainage qui s'imposent le plus souvent pour réhabiliter un terrain ont généralement été évités dans le cas du Diois (par exemple sur la commune de Glandage), pour des raisons évidentes de rentabilité économique insuffisante et de non-assurance de ces biens fonciers.

La tendance générale est donc actuellement plutôt à l'abandon de l'usage de ces terres et les mouvements de terrain apparaissent ainsi comme un nouveau facteur de déprise agricole qui va à son tour favoriser l'apparition de ces phénomènes (par abandon des systèmes de drainage en particulier).

La quantification monétaire de ces répercussions nécessite davantage de recul et n'a donc pu être abordée dans ce travail.

On ne peut conclure ce paragraphe sur les effets indirects de ces phénomènes de mouvements de terrain sans évoquer toute une catégorie de conséquences difficilement quantifiables sur le plan monétaire mais néanmoins observables dans le Diois. Il s'agit d'une série de préjudices qui sont déjà ressentis ou qui le seront, soit sur le plan individuel, soit sur le plan collectif et qui permettent d'apprécier toute la dimension cachée des sinistres et du risque en général :

- **Les préjudices individuels** : ils apparaissent sous la forme de privation de jouissance ou de dévalorisation de biens individuels, restés soit isolés, soit menacés (c'est en particulier vrai pour les habitants de Boulc qui ne peuvent plus vendre ou profiter de leurs biens à leur guise), ou bien sous la forme de gênes diverses pour les usagers de différents moyens de transport et services publics. Les répercussions peuvent être aussi d'ordre affectif ou sentimental, voire psychologique et parfois même corporel ...

- **Les préjudices collectifs** : ils peuvent se caractériser à terme par l'endettement de certaines communes, par des préjudices esthétiques qui auront peut-être des répercussions sur le plan touristique, par une psychose généralisée de voir se reproduire une catastrophe, etc.

### 3.4. Analyse de l'endommagement du réseau routier

#### 3.4.1. Présentation

Comme on vient de le préciser dans le paragraphe précédent, le réseau routier du Diois a particulièrement souffert des événements de janvier 1994.

Un inventaire systématique des tronçons endommagés a été entrepris, notamment sur la base de données recueillies auprès de services de la D.D.E. et de reconnaissances de terrain.

On a essayé dans la mesure du possible de retrouver pour chaque point d'impact la nature du phénomène dommageable, le type de dommage correspondant, la nature des travaux de réhabilitation réalisés, qu'ils aient été provisoires (mesures d'urgence), définitifs ou annexes (mesures de confortement, protection et prévention) et les coûts correspondants.

Pour chaque section endommagée on a ensuite tenté de retrouver, sur la base des témoignages et par la lecture des bulletins d'alarme émis par la D.D.E. à destination des pompiers et de la gendarmerie, la durée d'interruption du trafic routier ou toute autre forme de dysfonctionnement.

Il en ressort, après analyse, une série d'observations généralisables sur les caractéristiques d'endommagement d'un réseau routier.

#### 3.4.2. Dommages structurels

L'inventaire entrepris a permis de localiser 90 zones de manifestations de phénomènes, soit de mouvements de terrain (66 cas), soit hydrauliques (24 cas).

Les réseaux routiers communaux (fig. II.20) et départementaux (fig. II.21) ont été endommagés respectivement par 28 et 38 phénomènes de mouvements de terrain distincts contre 14 et 10 phénomènes hydrauliques.

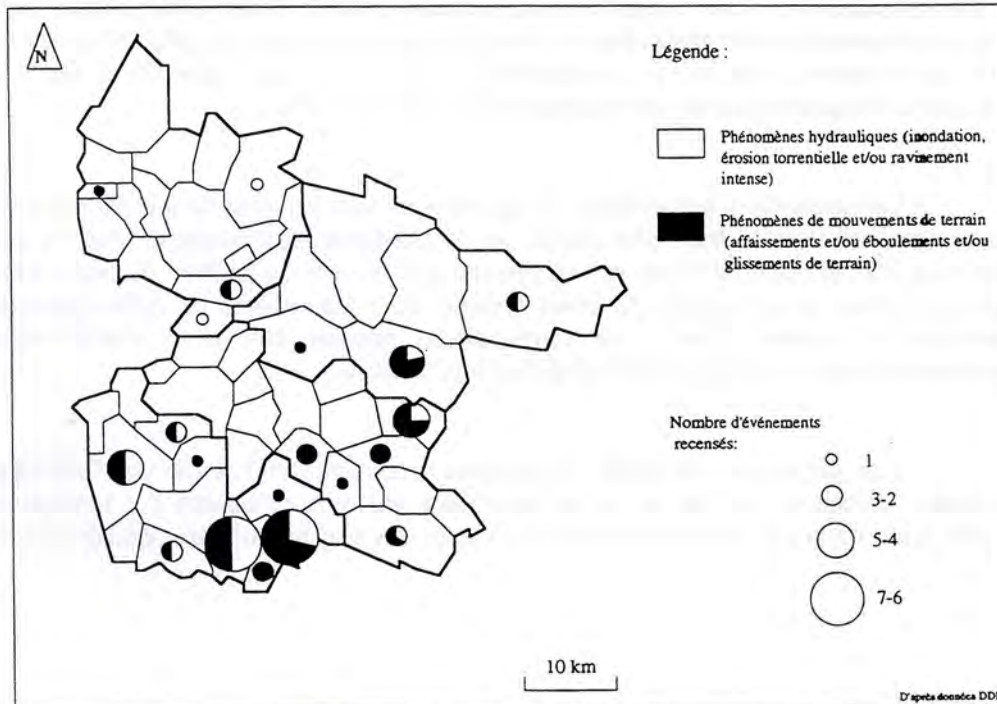


Figure II.20 - Distribution par communes du Diois des différents phénomènes responsables de dommages aux voies communales et chemins ruraux suite aux intempéries des 6 et 7 janvier 1994.

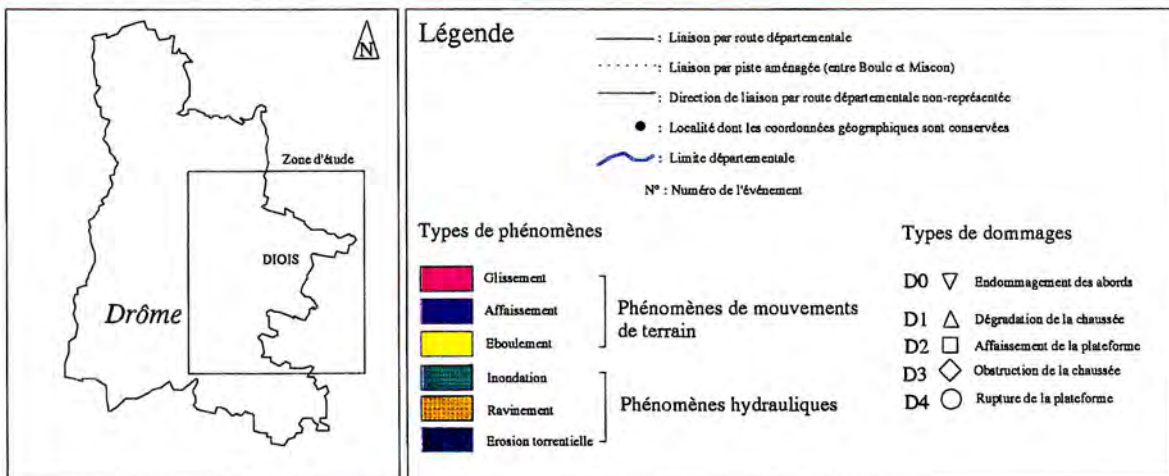
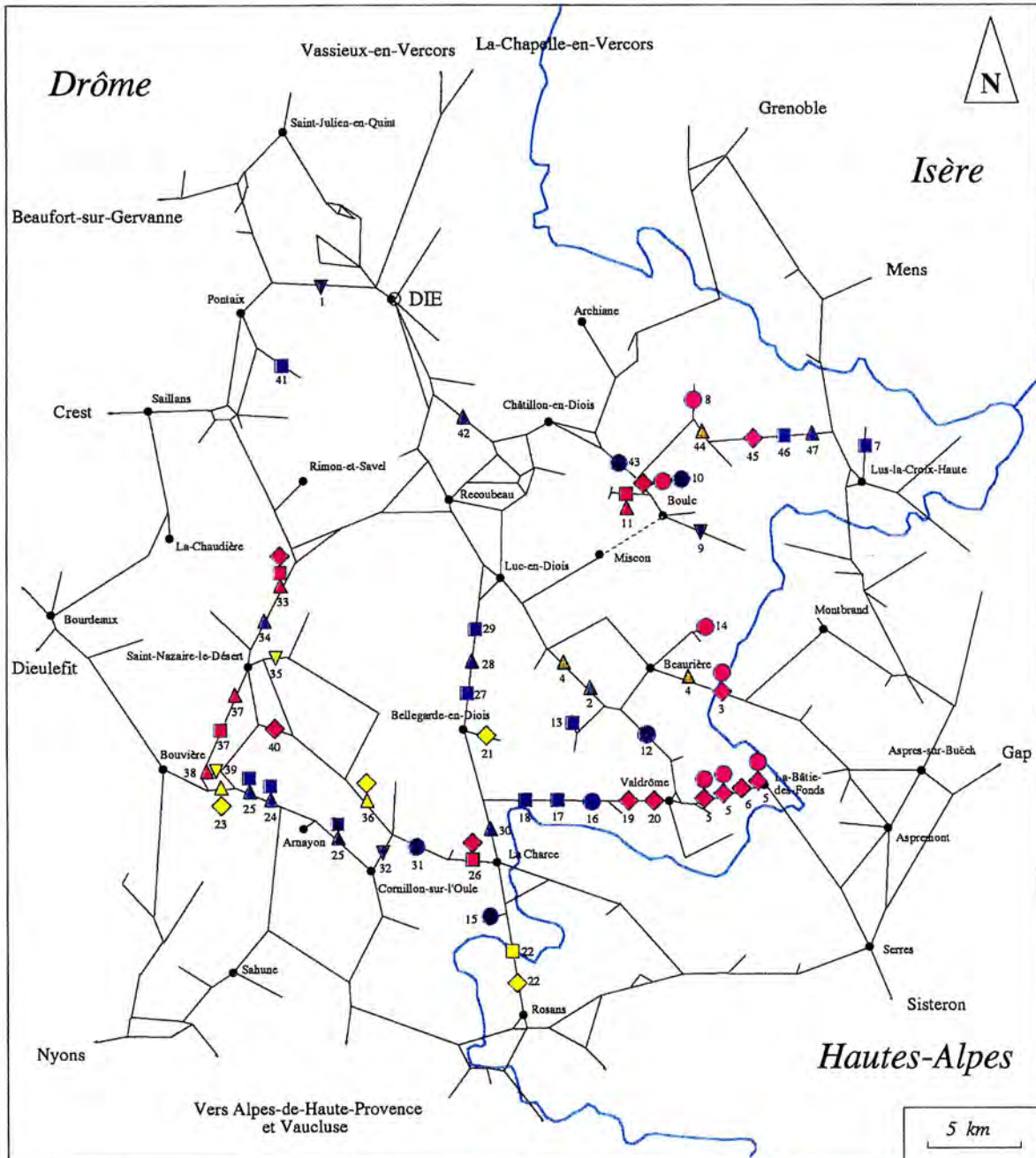


Figure II.21 - Localisation des dommages au réseau routier départemental du Diois suite aux intempéries des 6 et 7 janvier 1994.

Sur le plan économique, les coûts globaux par section <sup>22</sup> de route départementale endommagée (fig. II.22 et ann. X.1 et X.2) vont de 11 267 F (R.D.271) à 1 131 853 F (R.D.106), voire beaucoup plus si on considère le cas de la route R.D.148 (commune de Boulc) qui ne peut être réutilisée et nécessite la création d'un tunnel de déviation (cf. §.3.5, chap. II).

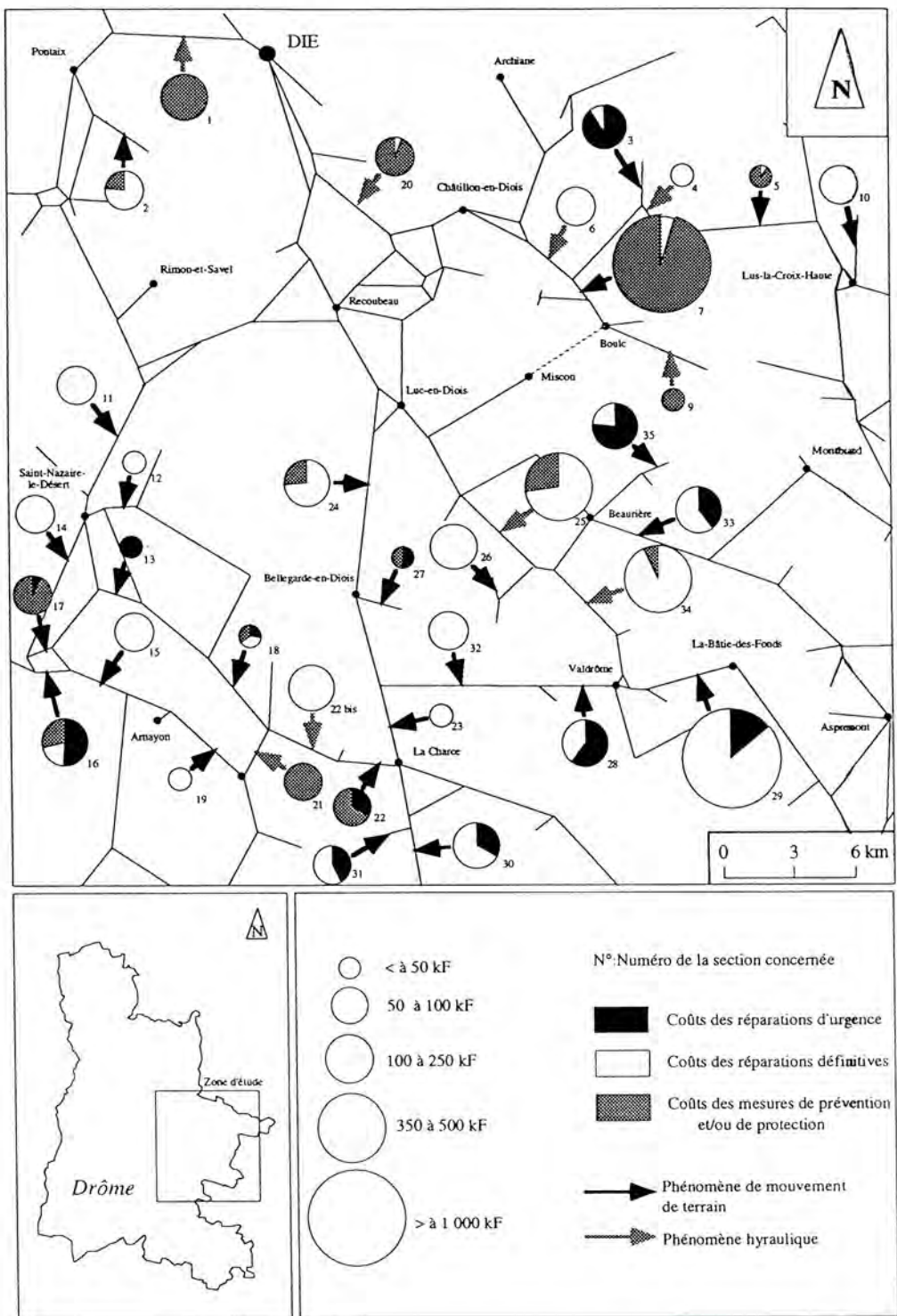
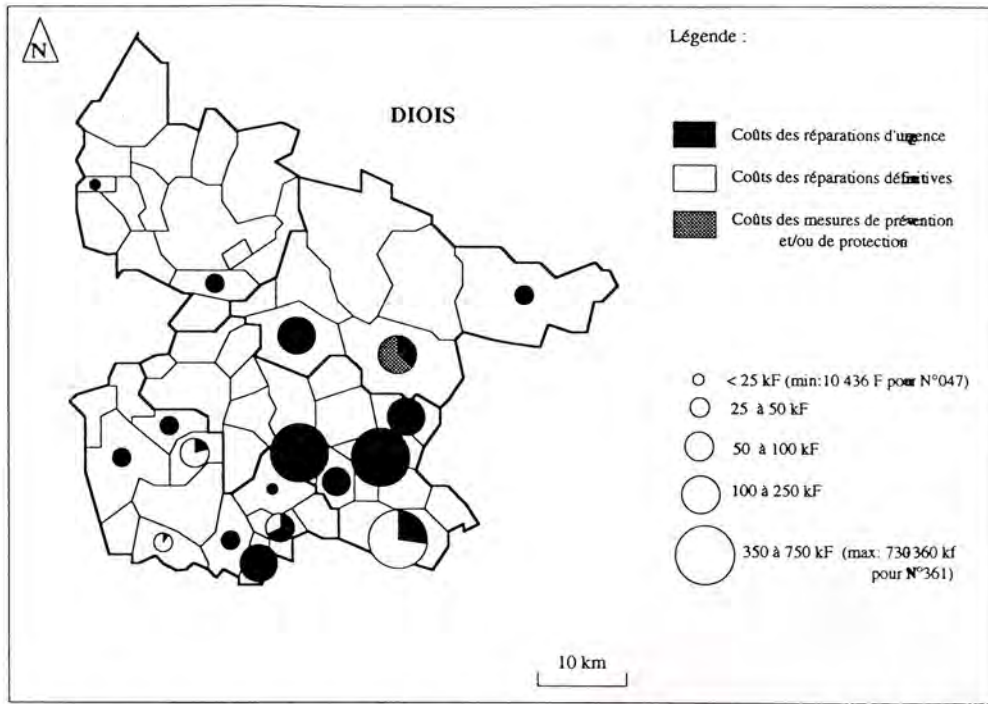


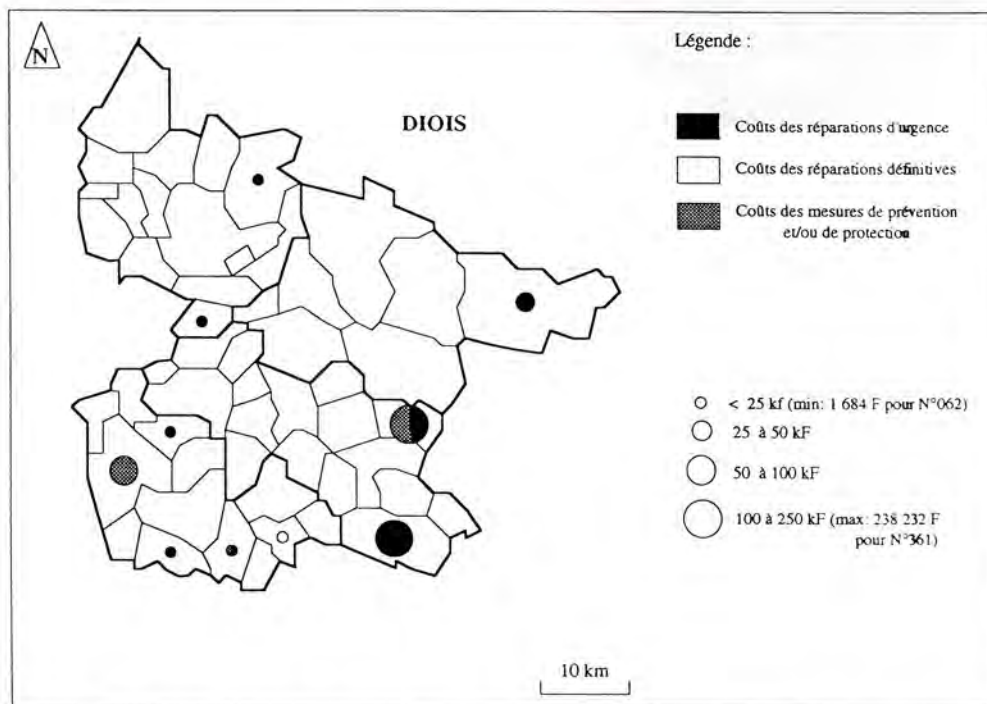
Figure II.22 - Carte de distribution des coûts des dommages au réseau routier départemental par section de route endommagée, suite aux intempéries des 6 et 7 janvier 1994 (cf. ann. X.1 et X.2).

<sup>22</sup> Une section étant définie par une portion continue de route entre deux nœuds

Concernant le réseau communal, les communes les plus touchées par les mouvements de terrain (**fig. II.23 et ann. X.3**) sont celles de Valdrôme (730 360 F) et Beaumont-en-Diois (372 496 F) et la moins touchée celle de Bellegarde-en-Diois (10 436 F). Les phénomènes hydrauliques (**fig. II.24 et ann. X.3**) ont pour leur part généré des coûts moins élevés avec un maximum de 238 232 F pour Valdrôme qui apparaît comme étant la commune la plus sinistrée par l'ensemble des phénomènes.



**Figure II.23** - Distribution par communes du Diois des coûts des dommages au réseau routier communal et rural imputables aux phénomènes de mouvements de terrain. Intempéries des 6 et 7 janvier 1994 (cf. ann. X.3).



**Figure II.24** - Distribution par communes du Diois des coûts des dommages au réseau routier communal et rural imputables aux phénomènes hydrauliques. Intempéries des 6 et 7 janvier 1994 (cf. ann. X.3).



Les phénomènes de mouvements de terrain se répartissent entre des glissements, des affaissements et des éboulements, tandis que les phénomènes hydrauliques sont représentés par des inondations (submersion), des ravinements intenses et des effets d'érosion torrentielle.

Consécutivement à l'action de ces phénomènes, on a recensé et renseigné 112 points d'endommagement sur la totalité du réseau routier ; 68 concernant le réseau départemental et 44 le réseau communal. Ceci vient du fait qu'à l'action d'un phénomène identifié correspondent parfois plusieurs points d'endommagement du réseau.

Sur ces 112 tronçons endommagés, 37 le sont par des glissements, 36 par des éboulements, 20 par des affaissements, 9 par des ravinements, 9 par de l'érosion torrentielle et 1 par inondation. L'échantillonnage est suffisamment représentatif pour confirmer la prépondérance des dommages consécutifs aux phénomènes de mouvements de terrain ( 93 cas) par rapport à ceux générés par des phénomènes hydrauliques (19 cas) sur l'ensemble du réseau routier du Diois (**fig. II.25**).

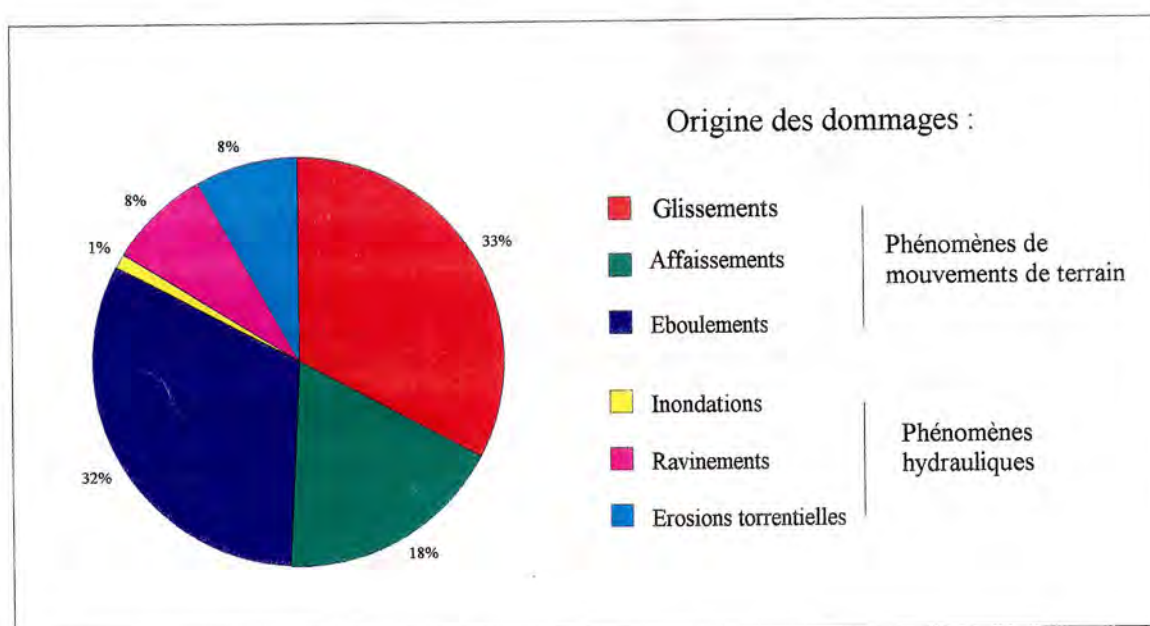


Figure II.25 - Réseau routier du Diois : distribution statistique du nombre de dommages par types de phénomènes d'origine. Intempéries des 6 et 7 janvier 1994.

La diversité des dommages apparaît aussi à travers leur mode d'expression. Ainsi on a pu définir quatre catégories distinctes de modes d'endommagement de gravité croissante, tant sur le plan économique (coût des réparations) que sur le plan fonctionnel (durée d'interruption du trafic) (**tab. II.11**). Cela va de la rupture de plate-forme pour le plus grave à la simple dégradation de chaussée pour le moins grave, en passant par les obstructions de chaussée et les affaissement de plate-forme. Un mode particulier concerne les abords de la route. Il s'agit le plus souvent de dommages n'affectant pas directement la chaussée mais plutôt les talus ou les remblais, mais qui à terme peuvent menacer sa stabilité et la rendre impraticable.

MODES D'ENDOMMAGEMENT STRUCTUREL	COUT MOYEN DES REPARATIONS (en kF 1993)	PERTURBATIONS FONCTIONNELLES INDUITES
Dégradation de la chaussée	21,3	Limitation de gabarit nécessaire
Affaissement de la plate-forme ou obstruction de la chaussée de faible volume (dizaine de m <sup>3</sup> )	46,5	Interruption momentanée du trafic routier (en heures)
Obstruction de la chaussée de volume élevé (centaine de m <sup>3</sup> )	97	Interruption prolongée du trafic routier (en jours)
Rupture de la plate-forme	138,2	Interruption durable à définitive du trafic routier (en semaines ou mois)

Tableau II.11 - Importance des modes d'endommagement du réseau routier du Diois.

Une analyse détaillée des coûts moyens de réparation portant sur 32 dommages différents consécutifs à des phénomènes de mouvements de terrain laisse apparaître des valeurs allant du simple au sextuple suivant le mode d'endommagement et pour une portion moyenne de route de 10 m de long (fig. II.26).

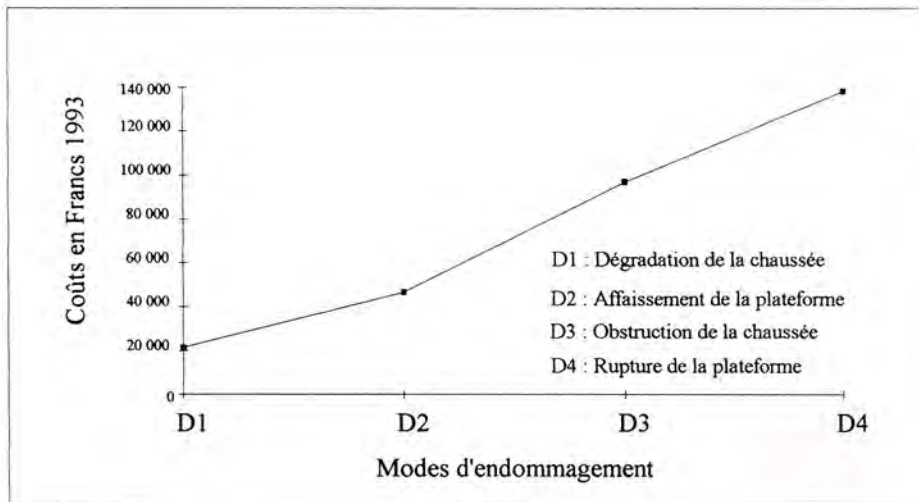


Figure II.26 - Réseau routier du Diois : évolution des coûts moyens de réparation par mode d'endommagement pour une longueur moyenne de route affectée de 10 m.

Sur l'ensemble des réseaux et tous phénomènes d'origine confondus, le mode d'endommagement le plus représenté est la dégradation de chaussée (38 cas), suivi de l'obstruction de la chaussée (37 cas), suivi de l'affaissement et de la rupture de plate-forme (16 cas chacun), suivi de l'endommagement des abords (5 cas) (fig. II.27).

Pour ce qui est plus particulièrement du réseau départemental, la figure II.21 donne une image de la distribution spatiale de ces modes d'endommagement. On y voit que l'ordre de représentativité des modes est conforme à celui précédent pour l'ensemble du réseau routier, mais de manière plus équilibrée (18, 17, 16, et 5 cas respectivement).

A comportement supposé identique de l'ensemble du réseau routier, il semblerait que ces modes d'endommagement sont surtout fonction de la nature du phénomène d'origine plutôt que de son intensité. Ainsi, on s'aperçoit que la plus grande diversité de ces modes apparaît sous l'effet des phénomènes de mouvements de terrain en général et plus particulièrement des glissements et éboulements (4 modes représentés pour chacun) comparé aux phénomènes hydrauliques qui entraînent surtout des dommages moins graves du type dégradation de chaussée.

Néanmoins, l'activité torrentielle est également très préjudiciable pour le réseau routier en provoquant en particulier des dommages du type rupture de plate-forme, mais dans des proportions moins importantes que pour les glissements (fig. II.28).

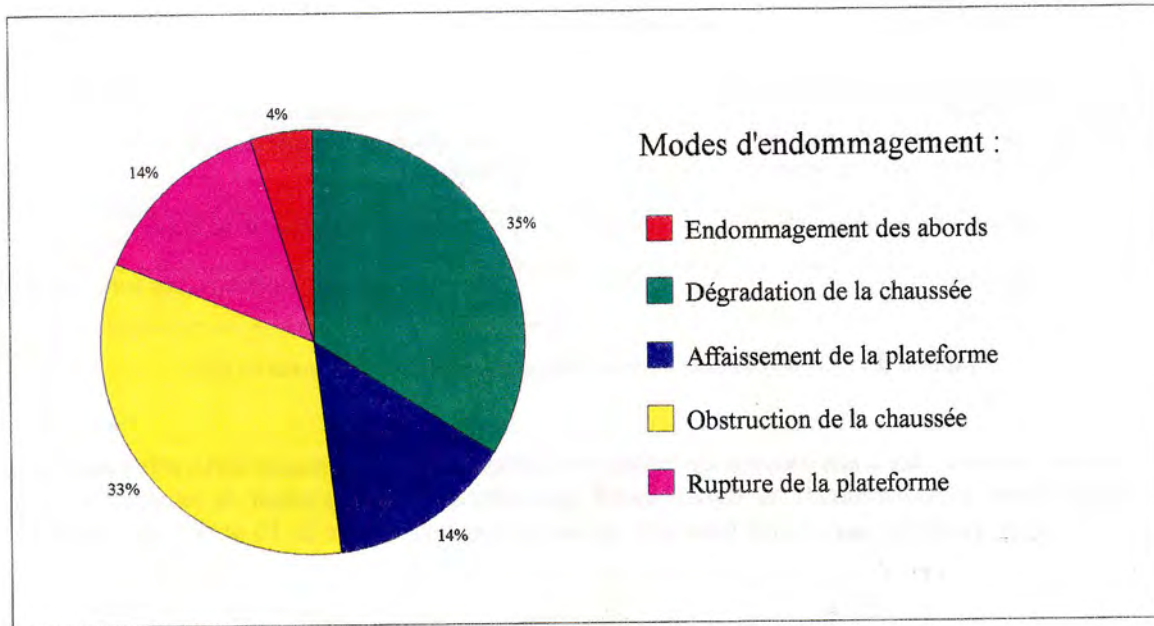


Figure II.27 - Réseau routier du Diois : importance relative des différents modes d'endommagement, tous phénomènes d'origine confondus. Intempéries des 6 et 7 janvier 1994.

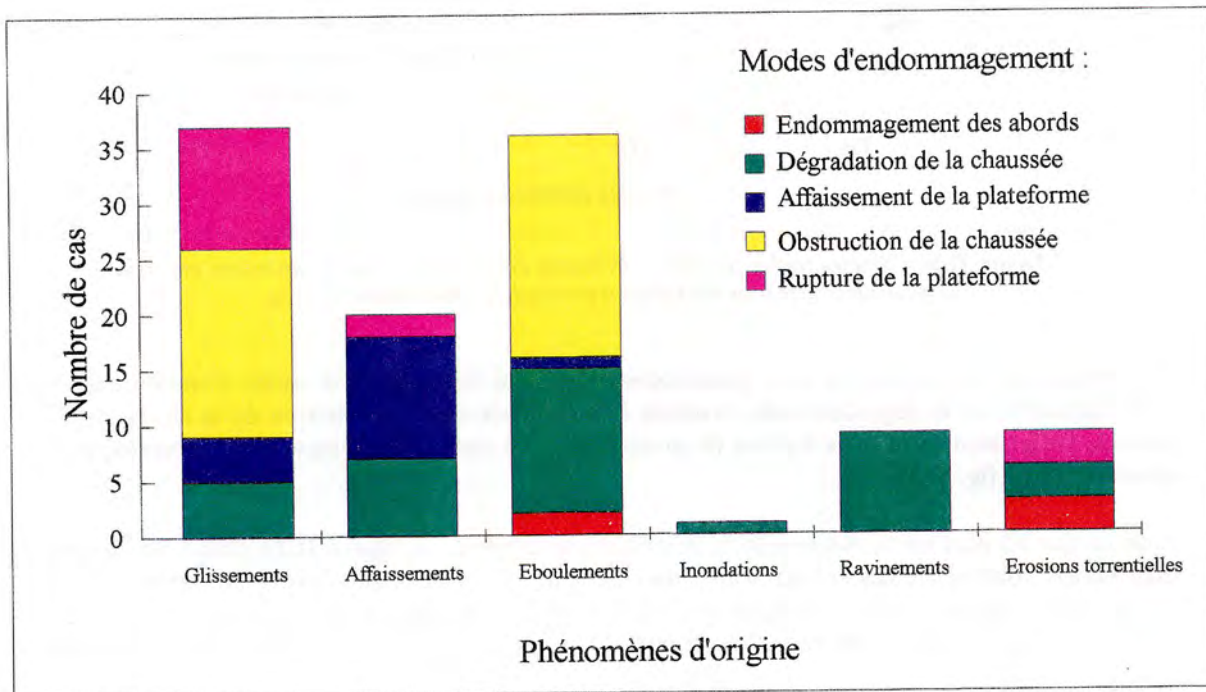


Figure II.28 - Réseau routier du Diois : distribution statistique des différents modes d'endommagement par types de phénomènes d'origine. Intempéries des 6 et 7 janvier 1994.

### 3.4.3. Dysfonctionnement du réseau routier départemental

Les dommages structurels constatés et répertoriés sur le réseau routier du Diois ont eu des répercussions certes monétaires, mais également sur le plan fonctionnel en perturbant le trafic routier et les communications qu'il assure traditionnellement. Ces dysfonctionnements se sont fait d'autant plus ressentir dans le Diois qu'il s'agit d'une région relativement montagneuse présentant des villages éloignés et isolés des grands axes de communication, et le plus souvent desservis par une seule route.

Ces perturbations se sont fait ressentir sur l'ensemble du réseau routier départemental le plus souvent sous la forme d'interruptions du trafic imposées par la réparation du ou des tronçons endommagés. La **figure II.29** donne une image de ces perturbations en précisant la durée d'interruption du trafic par section de route endommagée. L'aggravation du préjudice subi peut être appréciée par la prise en compte de la valeur du trafic journalier sur la section endommagée et le kilométrage de déviation nécessaire pour contourner cette section, quand cela a été possible. On obtient une image de ce qu'a été la paralysie des communications routières sur le Diois au moment des événements de janvier 1994 et les implications que cela a pu avoir tant sur le plan de l'organisation des secours que sur l'accès à certains villages. En effet, compte tenu de l'ampleur des dommages, le trafic s'est retrouvé paralysé par 36 sections de route endommagée, 23 d'entre elles n'ayant pu être contournées et 5 ayant pu l'être mais seulement au prix de plusieurs kilomètres de déviation. De ce fait, 9 villages et hameaux se sont retrouvés partiellement ou totalement isolés, certains comme le hameau du Pilhon ou le village de Borne durant plus de 15 jours (*cf. ann. VI.1*).

Les durées d'interruption du trafic ont donc été variables. Pour une section donnée, elles ont été fonction du nombre et de l'intensité des dommages qui conditionnent directement l'ampleur et la durée des travaux de réfection, mais aussi de la valeur fonctionnelle de la route endommagée qui est venue moduler la durée des travaux. Sous un aspect un peu théorique, cette valeur peut être approchée par la présence ou non de déviation pour contourner la section endommagée et par l'importance de son trafic habituel.

Par exemple, une section gravement endommagée (obstruction de chaussée plus rupture de plate-forme. *Cf. fig. II.21*) telle que celle menant au col de Cabre (R.D.93), a été réparée en une journée, les autorités ne pouvant tolérer un détour de plus de 90 kilomètres pour gagner le département des Hautes-Alpes et maintenir fermé davantage cet axe de communication majeur (liaison vallée du Rhône-Alpes du Sud) qui draine plus de 3 000 véhicules par jour. A contrario, par exemple, la route unique R.D.624 menant au village de Borne (commune de Glandage) bien qu'elle ne put être contournée même par une piste forestière, demeura fermée environ deux semaines. Cela a correspondu à la durée des travaux nécessaires à la reconstitution de la plate-forme de cette route qui ne draine qu'une douzaine de véhicules par jour.

A des dommages de même importance peuvent donc correspondre des durées d'interruption très variables suivant le caractère plus ou moins vital de l'axe endommagé. Néanmoins, si on s'affranchit de cette notion de valeur fonctionnelle de réseau et de la quantité de dommages pour ne retenir que le cas théorique d'un mode d'endommagement unique, on peut proposer avec plus ou moins de certitude quelques mises en relation simples entre dommages structurels et perturbations fonctionnelles pour un réseau routier en général (**fig. II.30**).

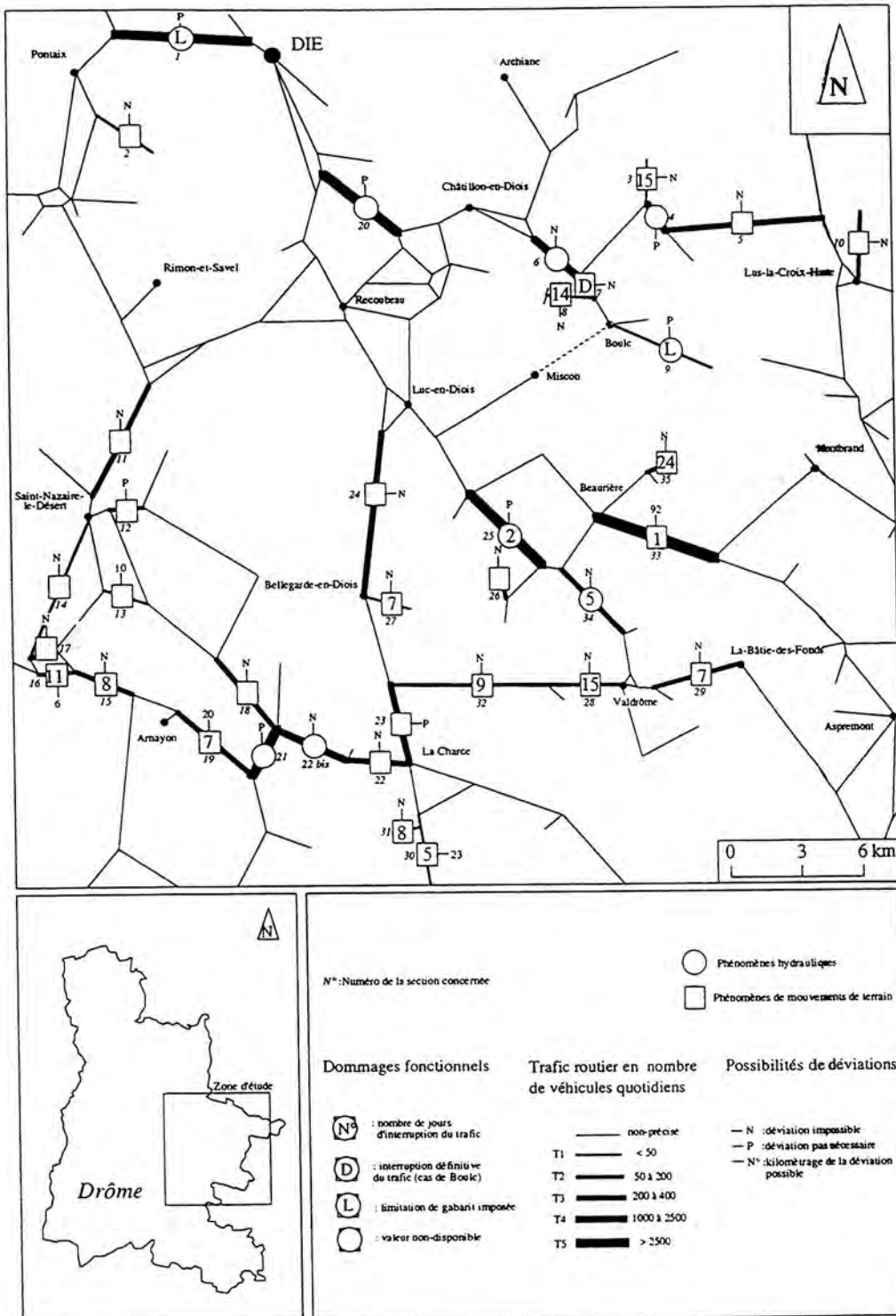


Figure II.29 - Critères de dysfonctionnement du réseau routier départemental du Diois, consécutivement aux intempéries des 6 et 7 janvier 1994.

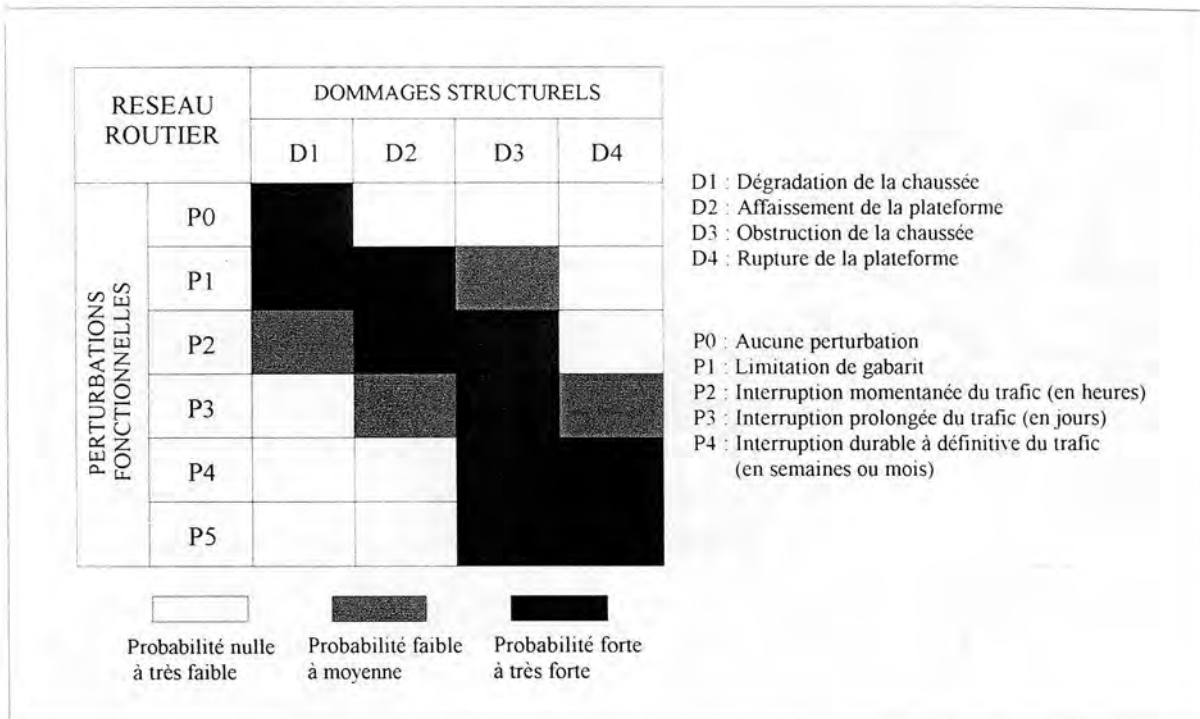


Figure II.30 - Relations entre dommages structurels et perturbations fonctionnelles sur un réseau routier.

### 3.5. Essai de mesure de préjudices indirects : cas de l'enclavement de Boulc

#### 3.5.1. Présentation du cas

Un des cas de glissement les plus préoccupants encore à ce jour est celui qui affecte le versant situé en rive gauche du ruisseau de Boulc, sur la commune de Boulc-en-Diois en contrebas des hameaux de Ravel-et-Ferrier. Il s'agit d'une instabilité de versant complexe et de grande ampleur, déjà répertoriée dans le passé mais réactivée par ces intempéries après une longue période de sommeil de plus d'un siècle.

Les premiers mouvements significatifs sont apparus dès le 10 janvier. Le mouvement constaté fut relativement lent mais les témoignages ont fait état d'une impression de descente de tout un pan de montagne accompagnée de nombreuses chutes de blocs dans le ruisseau en crue. Dans la journée du 11 on assista à une accentuation du mouvement entraînant un rétrécissement de la vallée, déjà étroite à cet endroit précis, si bien que le ruisseau dut trouver un nouveau lit en détruisant la route départementale R.D. 148 sur une longueur de 200 m.

Ce glissement affecte des formations de calcaires argileux déformés par une tectonique caractérisée par des plis est-ouest hachés par des failles d'orientation N.110° à N.160°. Il se décompose en trois secteurs (Marie, 1993) de volumes respectifs de 10 millions de m<sup>3</sup> (partie inférieure), 600 000 m<sup>3</sup> (pré Martal) et 900 000 m<sup>3</sup> (ravin des Gouteaux). Les indices d'instabilités sont visibles sur plus de 300 m de dénivelé avec en particulier des fissures ouvertes de plusieurs mètres et un décrochement sommital de plus de 10 m de rejet vertical.

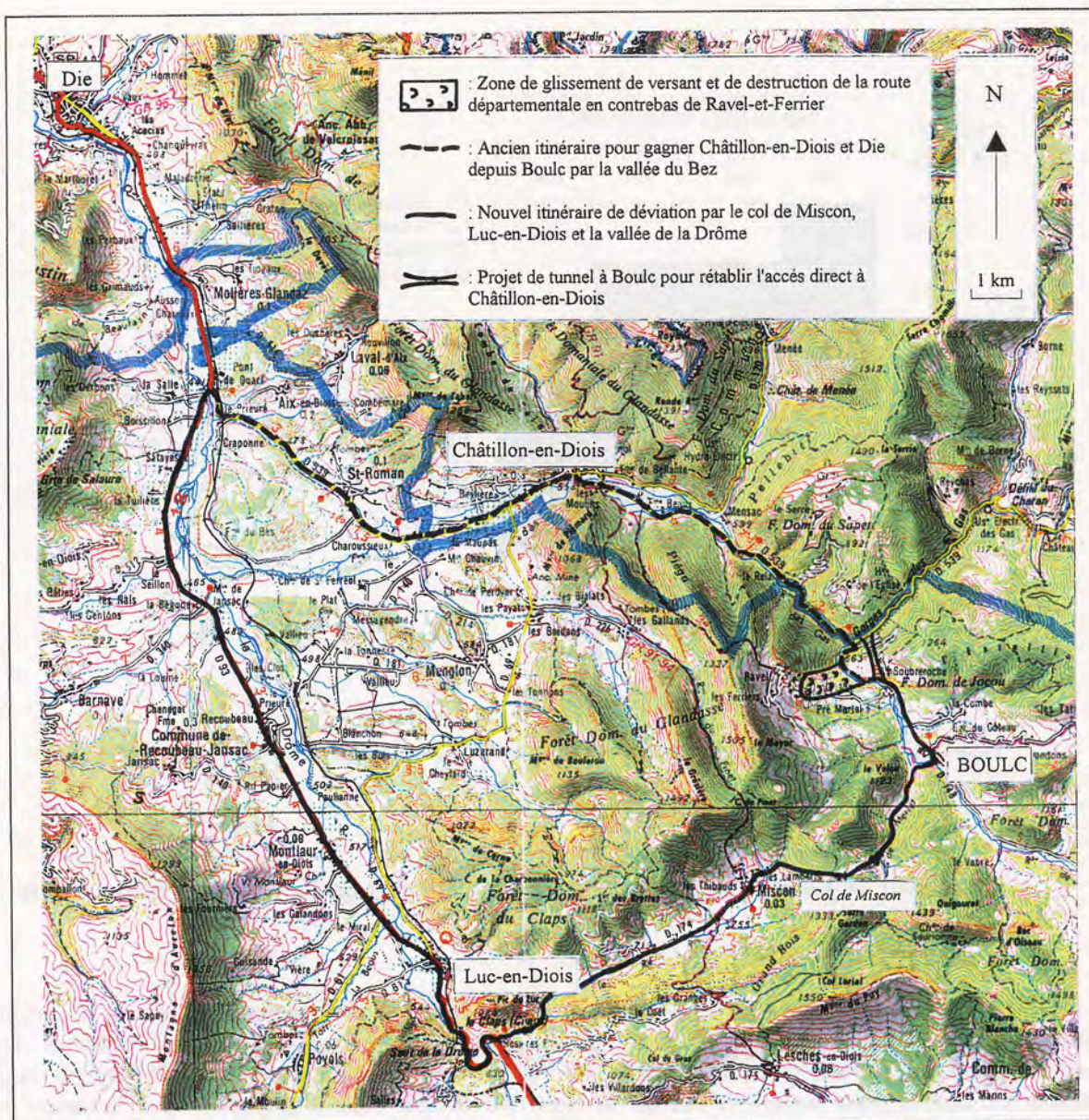


Figure II.31 - Carte de situation du cas de Boulc-en-Diois (d'après fond topographique IGN au 1/100 000<sup>e</sup>, carte de Valence-Grenoble).

A l'heure actuelle ce glissement est temporairement stabilisé car de nouveaux indices de mouvement apparaissent à chaque phase de précipitations intenses. Un risque latent d'évolution brutale de ce versant demeure et les autorités commencent à prendre au sérieux l'hypothèse d'une fermeture de la vallée, de formation d'un lac de retenue et plus grave encore d'une potentielle débâcle de ces eaux sur la vallée du Bez et la ville de Châtillon-en-Diois située en aval.

Compte tenu de l'impossibilité de réouverture de la route en fond de vallée au pied de glissement pour des raisons de sécurité, la commune de Boulc s'est retrouvée partiellement enclavée. Cela a nécessité la viabilisation urgente d'une piste forestière de déviation permettant de regagner la vallée de la Drôme et Die, non plus par Châtillon et la vallée du Bez mais par le col de Mison (1023 m) et Luc-en-Diois.

Cette situation a imposé aux habitants de Boulc un détour maximum de 38 km (soit un temps de parcours rallongé d'une demi-heure environ pour gagner Die) difficilement supportable, mais qui est toujours maintenu à l'heure actuelle faute de pouvoir obtenir le percement d'un tunnel sous le plateau de Souberoches qui permettrait de retrouver l'ancien itinéraire <sup>23</sup> (**fig. II.31**).

Cette situation d'enclavement partiel a rapidement eu des répercussions directes sur la commune de Boulc et indirectement sur d'autres communes avoisinantes en prenant le plus souvent la forme de préjudices. On a tenté, à partir de données disponibles et de nouvelles investigations d'apprécier l'allure de ces préjudices et d'en mesurer l'importance pour les mois qui ont suivi le glissement. Cette analyse vient éclairer la notion de préjudice indirect induit par la fermeture d'un axe de communication consécutivement à l'action d'un phénomène de mouvement de terrain de grande ampleur.

### 3.5.2. Analyse des préjudices sur la commune de Boulc

#### 3.5.2.1. Présentation de l'enquête

Cette analyse s'est faite en collaboration avec l'association "Avenir de Boulc" (loi 1901). Cette association est née dans les jours qui ont suivi le glissement. Elle tente en vain, depuis, d'attirer l'attention de l'opinion et des pouvoirs publics sur la nécessité de créer un tunnel pour désenclaver définitivement la commune.

Pour les besoins de l'analyse, une enquête a été réalisée deux mois après les événements auprès de la population de Boulc. Le questionnaire a été supervisé par l'association tandis qu'on en a assumé le dépouillement et les traitements (**ann. XI**).

L'enquête a porté sur 73 personnes (70 % de la population) réparties entre 21 personnes âgées (retraités), 38 adultes (actifs) et 14 enfants ou adolescents pour la plupart scolarisés. Une moyenne d'âge de 35 ans en fait une population relativement jeune comparativement à la majorité des autres communes du Diois.

Il ressort de cette enquête trois catégories de préjudices, différemment ressentis suivant la tranche d'âge de la population concernée, des rapports que cette population entretient avec l'extérieur ou bien le type d'activités économiques qu'elle exerce :

#### 3.5.2.2. Préjudices psychologiques et atteintes morales.

L'ensemble de la population interrogée connaît une dégradation de la qualité de vie qui s'exprime à travers des pertes de temps ou de la fatigue supplémentaire liées à l'accroissement des distances imposées par la déviation. Les atteintes morales apparaissent aussi, surtout chez les jeunes, à travers un mal de vivre généralisé induit par l'enclavement, avec des sentiments d'angoisse (chez les personnes âgées particulièrement), de perte d'appartenance à une communauté (perte d'identité), de coupure affective (notamment avec la population de Châtillon et à tel point que certains parlent même d'avoir été "amputés d'un bras").

<sup>23</sup> A ce titre, une partie de "bras de fer" s'est engagée entre les habitants de Boulc, unis dans un élan de solidarité et d'ingéniosité exemplaire, et les autorités préfectorales pour obtenir la création de ce tunnel qui ne sera probablement pas réalisé avant l'an 2000 compte tenu de son prix de revient estimé à 50 millions de francs. A ce jour, seule la considération du risque induit par une retenue potentielle pourrait faire accélérer ce projet de tunnel qui trouverait alors en plus une vocation hydraulique préventive pour vidanger une telle retenue.



Le sentiment d'isolement est marqué pour toutes les tranches d'âge (un peu moins néanmoins pour les adultes actifs qui sont amenés à se déplacer pour travailler) et fait intéressant, il est accentué majoritairement par la gêne psychologique liée au fait de passer désormais par un col pour sortir du village, au lieu d'emprunter, comme jadis, un fond de vallée <sup>24</sup>.

### 3.5.2.3. Préjudices sociaux

Ils apparaissent surtout du fait des difficultés d'accès (notamment à cause du temps de parcours rallongé et du caractère dangereux de la piste de Miscon) à différents types de services (santé, secours, administrations, commerces, éducation), d'activités (culturelles, associatives, sportives, professionnelles) et des nuisances apportées sur le plan des relations humaines (famille, amis).

Ce sont les personnes âgées qui supportent le plus mal les difficultés d'accès aux services de santé (médecin, hôpital, infirmière, etc.) et de secours, ces services étant en effet représentés essentiellement au niveau de Die et de Châtillon.

Par contre, les adultes et les jeunes sont beaucoup plus affectés que les personnes âgées pour la pratique d'activités culturelles, sportives et associatives également localisés à l'extérieur de la commune. Par conséquent, la plupart des activités culturelles menées sur Châtillon ont dû être abandonnées et celles sur Die (médiathèque, cinéma) réduites. On assiste donc d'une façon générale à un changement des habitudes culturelles favorisant plutôt l'abstinence ou la réduction que l'adaptation à de nouvelles formes d'activités.

### 3.5.2.4. Préjudices économiques

Deux mois après le glissement, ils sont déjà fortement marqués et affectent les habitants de Boulc soit sur le plan de la vie privée, soit sur le plan professionnel. Il s'agit d'une part des préjudices liés à l'enclavement et d'autre part de ceux liés au rallongement du trajet.

Sur le plan des activités économiques basées sur la commune (7 exploitations commerciales et artisanales et 14 exploitations agricoles enquêtées) l'enclavement entraîne une baisse de l'afflux de clientèle, des difficultés de vente des produits, des pertes de l'outil de travail pour les agriculteurs (champs, cultures situées du côté de Châtillon), des difficultés ou des refus de livraison et d'approvisionnement et des dévalorisations des biens qui se traduisent par des baisses de revenus substantielles. Les agriculteurs sont majoritairement les plus affectés et les baisses de revenus enregistrées déjà significatives de difficultés financières à venir.

Le rallongement du trajet entraîne des surcoûts tant au niveau des déplacements (usure des véhicules, frais d'essence) que des services (surtaxe des frais de livraisons). Ces surcoûts des déplacements affectent surtout les actifs travaillant à l'extérieur de la commune qui sont amenés à se déplacer quotidiennement (déplacements professionnels).

---

<sup>24</sup> On retrouve déjà ce sentiment dans le récit "Les Ames fortes" de l'écrivain Jean Giono, qui de passage dans la région au début du siècle écrivait : «... le col c'est quelque chose ! De ce côté-ci, c'est à nous, mais de l'autre côté, ça a beau descendre, ce n'est plus notre pays ».

Sur le plan de la vie privée, nombre de foyers connaissent aussi ces difficultés financières si bien que la moitié des sondés estiment leur durée de résistance économique face à cette situation réduite au mieux à deux ans. Certains envisagent de partir, laissant planer la menace d'un exode, mais probablement limité car environ 30 % des adultes et personnes âgées sondés seraient prêts à refaire le même choix de résidence à Boulc, du moins sur le plan de la vie privée, car sur le plan professionnel il en va différemment avec 50 % des actifs qui préféreraient trouver une autre alternative pour s'implanter.

### 3.5.2.5. Répercussions extérieures

Cet état des lieux, établi quelques mois seulement après les événements de Janvier 1994, permet d'apprécier toute la dimension du risque autre que naturel qui pèse aujourd'hui encore sur la commune de Boulc et ses 100 habitants. Une situation jugée intolérable par l'ensemble de cette population mais qui demeure bloquée et acceptée par les pouvoirs politiques dont les décisions reposent sur une stratégie économique qui ne prend pas encore en compte les aspects éclairés ci-dessus et qui se limite à considérer la commune de Boulc simplement comme une entité économique individualisée trop insignifiante pour justifier la réalisation d'un projet de tunnel de plusieurs millions de francs. Or il apparaît après enquête que les répercussions de cet enclavement partiel affectent aussi les communes avoisinantes dont les relations avec Boulc sont en train d'évoluer (**fig. II.32**). C'est en particulier le cas de la commune de Châtillon-en-Diois, notamment sur le plan économique.

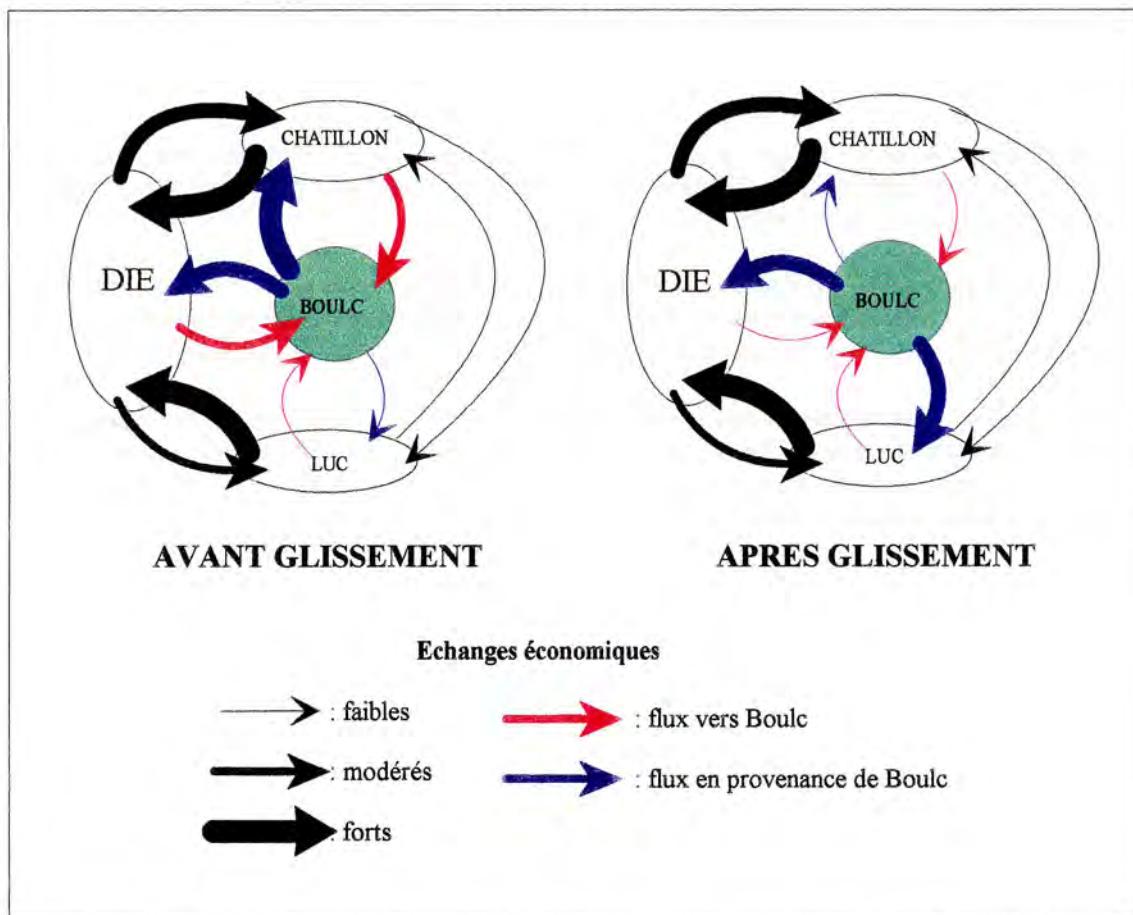


Figure II.32 - Schéma d'évolution des échanges économiques entre la commune de Boulc et les communes avoisinantes.

### 3.5.3. Analyse des préjudices sur la commune de Châtillon-en-Diois

De tout temps, les habitants de Boulc ont été tournés vers Châtillon-en-Diois et la vallée du Bez, revendiquant leur appartenance à ce canton.

Dès 1873, l'ancienne route située en rive gauche du ruisseau de Boulc était abandonnée, le secteur correspondant au pied du glissement ayant déjà été jugé trop dangereux, au profit d'un nouveau projet de route située en rive droite du ruisseau. Il nécessita entre autre la réalisation de l'actuel tunnel, creusé par les habitants eux-mêmes et avec leurs fonds propres. Ce chantier se poursuivit au moins jusqu'en 1930 et fut à l'image de la détermination de ces habitants résolument attachés à Châtillon.

La coupure physique et affective générée par le glissement de Ravel-et-Ferrier est venue perturber ces liens étroits entre les deux communes. Les résultats d'une enquête qu'on a entrepris dans le courant du mois de mai auprès des commerçants et artisans de Châtillon permettent d'en apprécier les répercussions économiques (**ann. XII**).

Châtillon-en-Diois, chef lieu de canton, comptait au moment de l'enquête 29 exploitations commerciales et artisanales pour une population d'environ 560 habitants. Seulement 14 réponses sur 29 questionnaires envoyés ont pu être analysées (**fig. II.33**). Elles permettent d'apprécier le poids de la clientèle Boulcoise qui se retrouvait avant les événements chez au moins 64 % de ces commerçants et artisans. La majorité d'entre eux s'estime désormais affectée par ces événements de Boulc (86 %) du fait d'une baisse de cette clientèle qui s'est faite ressentir plutôt de manière progressive.

Quelques Boulcois ont en effet continué à venir par solidarité faire leurs courses à Châtillon juste après les événements malgré un détour de 40 km, mais se sont ensuite définitivement détournés sur Die et surtout Luc-en-Diois.

Malgré des difficultés pour accéder à leur clientèle boulcoise (88 % des réponses), 43 % des commerçants et artisans qui allaient à Boulc avant les événements font encore l'effort, 5 mois après les événements, de se déplacer auprès d'elle.

Les répercussions sur les chiffres d'affaire sont largement ressenties auprès de 57 % de ces exploitants. La moitié d'entre eux restent pessimistes au sujet du devenir de leur activité, ce qui est représentatif de la gravité du préjudice, bien que les employés n'aient pas encore à pâtir de ces difficultés financières.

Les répercussions de cette situation d'enclavement qui s'éternise n'ont fait que s'accroître depuis, si bien qu'on est en train d'assister aujourd'hui à une véritable mutation économique autour du cas de Boulc. On a du mal à en apprécier les effets à plus long terme sur l'ensemble du canton de Châtillon si certains services et commerces venaient à disparaître.

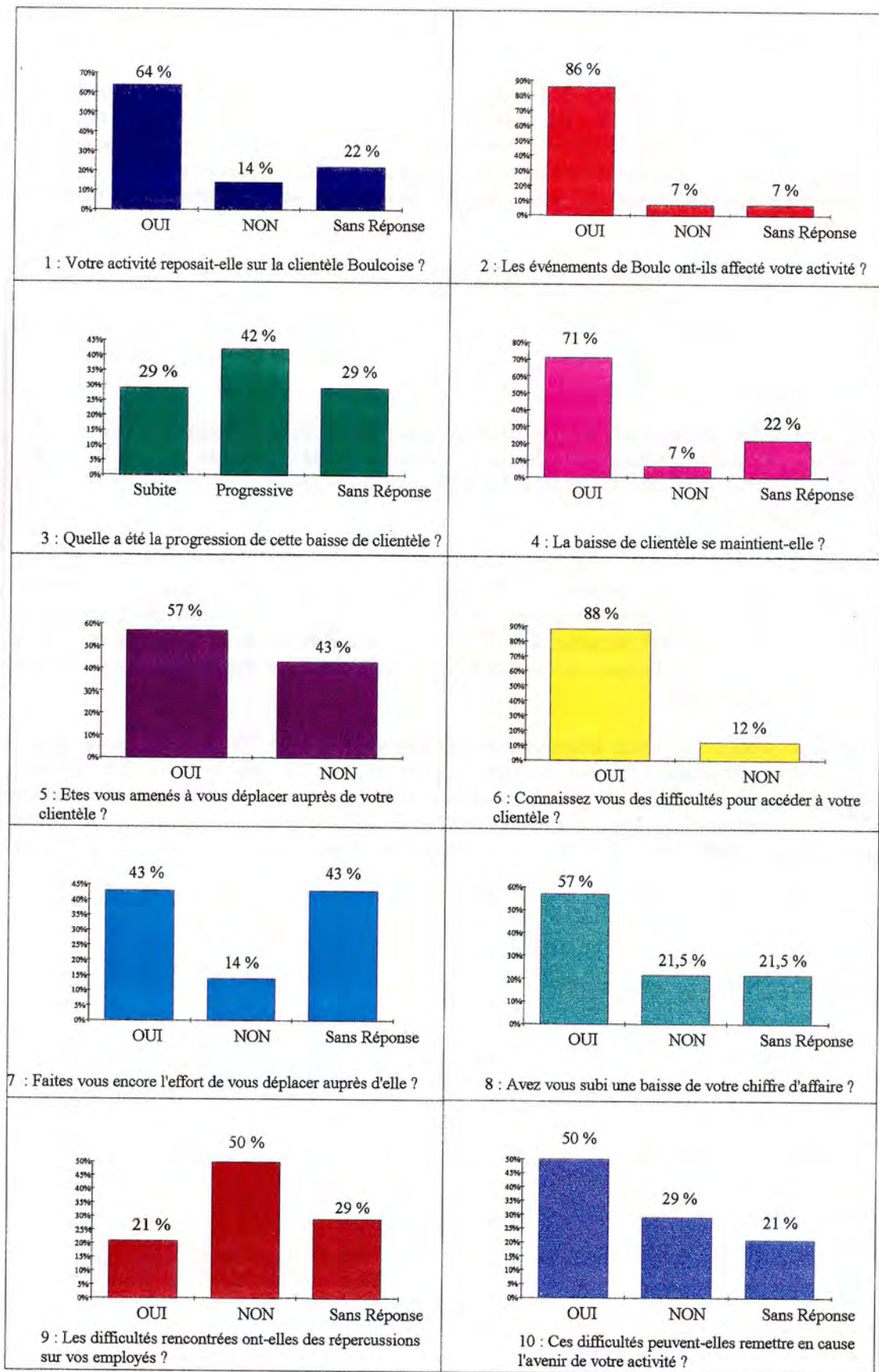


Figure II.33 - Résultats graphiques de l'enquête de mai 1994 menée auprès des artisans et commerçants de Châtillon-en-Diois.

### 3.6. Conclusion

Cette tentative de constat global menée sur le Diois permet de mesurer toute la difficulté rencontrée en général dans le cas des mouvements de terrain à dresser un bilan consolidé des conséquences pour une période et sur un territoire donné. Ceci est dû d'une part à la grande diversité des phénomènes de mouvements de terrain, à leur dispersion et d'autre part à la grande variabilité des modes d'endommagement directs ou indirects qu'ils provoquent sur des éléments de natures toutes aussi variées.

Or avec une centaine d'événements dommageables de type mouvements de terrain recensés sur le Diois, on a pu dresser une image de la capacité d'endommagement de ces phénomènes qui sont souvent sous-estimés par les aménageurs, car pas toujours spectaculaires, mais qui cumulés peuvent prendre des proportions socio-économiques, psychologiques ou environnementales non négligeables et que devra supporter à terme la collectivité.

On a à faire à des phénomènes le plus souvent permanents ou du moins endémiques, dont les répercussions peuvent se prolonger longtemps et même se cumuler faute de pouvoir les éradiquer à jamais. Ils peuvent alors devenir des facteurs de difficultés financières pour certaines petites communes aux budgets déjà bien serrés.

La tendance actuelle sur le Diois est de se résigner à réparer les dégâts plutôt que d'entreprendre de véritables actions préventives telles que l'élaboration de P.P.R. (Plans de Prévention des Risques) ou la surveillance de certains glissements préoccupants, sans tirer d'aucune façon des enseignements de ces récents événements. Ceci est probablement dû justement à l'absence de bilan global et donc à une perception trop partielle de l'impact de ces phénomènes sur l'ensemble d'un secteur qui aurait tendance à banaliser ces phénomènes.

Or, avec une période de retour d'événements semblables d'environ 30 années, compte tenu de la croissance démographique marquée de cette région depuis 20 ans, de son fort potentiel de développement touristique<sup>25</sup> et d'un déclin prononcé de l'agriculture qui se traduit notamment par une réduction de l'entretien du milieu naturel, on a de bonnes raisons de penser que le risque mouvements de terrain puisse prendre des proportions préoccupantes sur le Diois dans les prochaines années à venir.

---

<sup>25</sup> A titre d'information, on recense 13 campings situés sur un tronçon compris entre Saillans et Châtillon-en-Diois, ce qui représente une capacité d'accueil de 4 150 personnes. Par ailleurs, la population de Die passe de 4 361 habitants en hiver à 15 000 en été du fait de l'affluence touristique (source syndicat d'initiative de Die).

## 4. Le glissement de terrain de la Salle-en-Beaumont (Isère, France) : une catastrophe au retentissement national

### 4.1. Présentation

Le samedi 8 janvier 1994 vers 1 h 15 du matin, suite à une période de fortes précipitations persistante depuis trois jours (cf. § 3.2.1, chap. II) sur le sud-est de la France, un glissement de terrain essentiellement argileux d'une superficie d'environ 7 hectares ravageait la combe des Parajons sur la commune de la Salle-en-Beaumont dans le département de l'Isère, à environ 45 km au sud-est de Grenoble (fig. II.34).

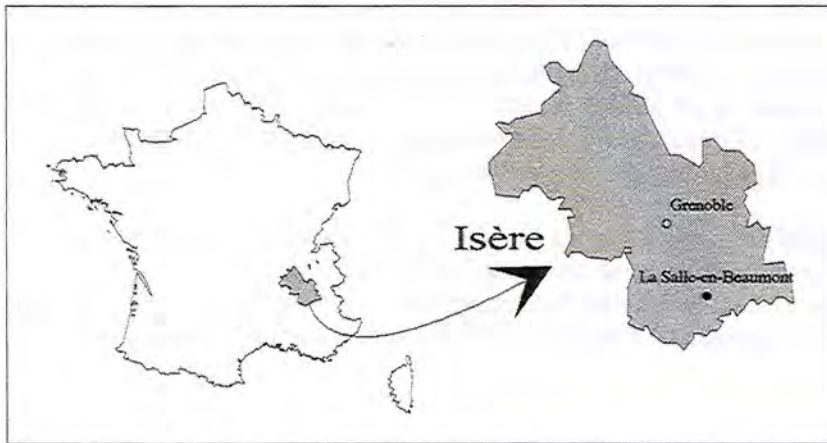


Figure II.34 - Situation de la Salle-en-Beaumont.

Les dommages ont été importants, non seulement pour la population (4 victimes) mais aussi en raison des conséquences sur les habitations et les différents réseaux de communication et d'alimentation.

L'état de crise généré par cet événement (cf. ann. XIII et XIV) a eu un retentissement national et un fort impact

psychologique sur des populations marquées par une série d'épisodes pluvieux particulièrement dommageables depuis plusieurs mois.

Cette catastrophe a-t-elle provoqué un déclic dans la conscience des décideurs et marqué le début d'une série de nouvelles dispositions juridiques et techniques en faveur de la prévention et de la gestion des risques naturels sur le territoire français<sup>26</sup>.

### 4.2. Description des phénomènes

Le glissement de terrain en question, d'un volume estimé à 1,3 millions de m<sup>3</sup> a affecté la combe des Parajons sur un dénivelé de l'ordre de 100 m (890-180 m) (Villain, 1994).

Sur le plan de sa rhéologie et de sa propagation, il s'est apparenté davantage à une coulée bien que la zone de départ soit caractéristique de celle d'un glissement rotationnel.

L'arrachement a mis à nu sur 30 à 40 m de haut des dalles de rocher calcaire d'où sortaient de nombreux écoulements qui ont alimenté de petites retenues rapidement formées au pied de la niche.

<sup>26</sup> Il s'agit de 15 nouvelles propositions de loi annoncées dès le 24 janvier 1994 par le ministre de l'environnement à l'issue d'un comité interministériel extraordinaire destiné à tirer la leçon de ces événements récents et entérinées par le décret d'application du 2 février 1995 sous la désignation de "loi Barnier".

Dans le corps même du glissement et sur le front, les terrains ont été fortement fissurés mais tout en restant secs. De nombreuses et importantes fissures ont en effet découpé la masse glissée en compartiments au sein desquels le remaniement est resté faible.

La masse glissée est venue barrer le cours du ruisseau de la Salle sur 200 m de long, ce qui a provoqué la formation d'un lac d'une capacité de 15 000 à 20 000 m<sup>3</sup> qui a fini par déborder le long du front du glissement puis s'est écoulé entre le cimetière et la mairie. Sa vidange a pu se faire par pompes successives et ouvertures de brèches, écartant ainsi toute possibilité de rupture brutale.

La principale cause de déclenchement est sans aucun doute de nature météorologique, s'exerçant sur une lithologie favorable à la liquéfaction, constituée ici d'argiles litées d'origine glacio-lacustre, et une fracturation importante favorable au drainage et à l'alimentation en profondeur de la masse glissée.

Bien que la sécheresse établie depuis 1988 ait persisté à peu près partout jusqu'à la fin de l'été 1993, cette année 1993 est restée en matière de pluviométrie l'année la plus humide des dix dernières, avec même un paroxysme qui a fait du mois de décembre le plus pluvieux de ces trente dernières années. Localement on a eu des précipitations violentes et exceptionnelles mais limitées dans l'espace. Le relevé des précipitations pour la journée du 6 janvier montre qu'il est tombé 196 mm au barrage du Sautet, 192 mm à Corps et près de 150 mm à la Salle-en-Beaumont. Quantités importantes, mais renforcées par le fait qu'il a plu sans discontinuer pendant plusieurs jours.

De plus, le débit du canal du Beaumont était de l'ordre de 500 l/s, or celui-ci présentait un manque d'étanchéité et des fuites importantes qui ont pu venir alimenter la zone de glissement. Avant le glissement, il existait au niveau de la zone concernée deux sources, un puits et une zone marécageuse ce qui laisse penser qu'il s'agissait à l'origine d'un terrain déjà fortement saturé en eau.

### ***4.3. Description sommaire des principaux modes d'endommagement***

Cette catastrophe a fait 4 victimes. Il s'agit de personnes surprises dans leur sommeil par le glissement et qui se sont retrouvées ensevelies sous les décombres de leurs maisons, elles mêmes recouvertes par une vingtaine de mètres de terre. C'est d'ailleurs la présence de cette épaisseur de terre qui a laissé peu d'espoir aux sauveteurs de retrouver des survivants, la difficulté première ayant été de retrouver l'emplacement de ces habitations. Au total ce sont douze familles qui ont été sinistrées par ce glissement et qu'il a fallu reloger en d'autres lieux plus sûrs.

Sous l'effet du glissement les bâtiments ont été endommagés à des degrés divers, soit par effondrement pour ceux situés en surface de la zone glissée (2 habitations), soit par impact latéral <sup>27</sup> puis ensevelissement pour ceux situés en zone de réception aval de la coulée (5 habitations), soit par simple poussée latérale pour ceux situés au contact du front de la coulée (4 bâtiments dont l'église qui a dû être complètement détruite par la suite) (cf. **fig. II.35**).

<sup>27</sup> Certains témoins affirment avoir entendu un grondement sourd suivi d'un effet de souffle caractéristique de la violence du phénomène qui a exercé un véritable effet d'impact sur les structures situées sur sa trajectoire. D'après certains secouristes, les maisons ont littéralement explosé sous l'effet de cet impact avant d'être ensevelies.

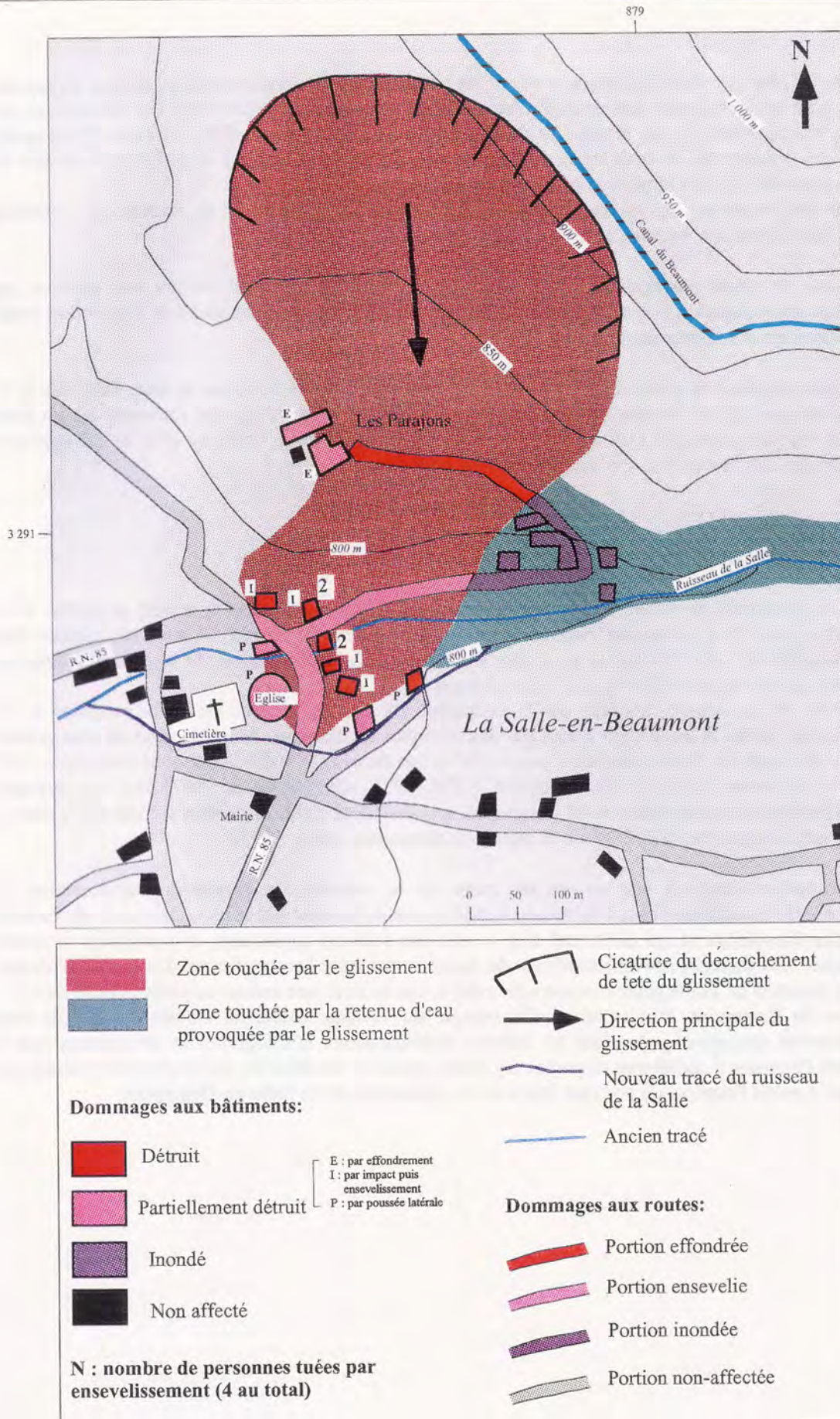


Figure II.35 - Glissement de terrain de la Salle-en-Beaumont : extension des phénomènes et nature des dommages aux bâtiments et routes (d'après observations *in situ* du 12/01/1994).



Les dégâts les plus graves ont été enregistrés sur les bâtiments situés à l'aplomb de la surface de rupture ainsi que pour ceux ensevelis. Les deux d'entre eux dans lesquels furent retrouvées les victimes ont été propulsés et éparpillés sur une dizaine de mètres autour de l'église avant d'être ensevelis (Bourgeois, 1993). Ceux poussés par le front de la coulée ont été disloqués et voués à la destruction du fait de l'endommagement de leurs structures et de leur emplacement.

A ce bilan des dommages aux bâtiments doivent être ajoutés les effets du lac de retenue qui a entraîné quelques dégâts mineurs, essentiellement d'ordre mobilier, sur 5 bâtiments.

Les portions de routes ont également été endommagées différemment suivant leur position par rapport aux phénomènes. Cela va de l'ensevelissement (obstruction de chaussée) à la destruction totale par effondrement et remaniement (*cf. fig. II.35*).

Le plus gros préjudice en terme de perturbations sur le trafic routier a porté sur la route nationale R.N. 85, ensevelie sous 20 m de terre sur une longueur de 200 m. Elle n'a pu être rouverte, sur un tracé provisoire, que 20 jours plus tard après un déblaiement intensif qui a mobilisé plus de 30 engins et camions réunis à la faveur d'un groupement d'entreprise.

#### 4.4. Conclusion

Ce glissement de terrain a pris tout le monde au dépourvu et pose le délicat problème de la fiabilité des plans d'exposition aux risques de types mouvements de terrain. La zone qui a glissé était en effet considérée comme étant la plus sûre du territoire de la commune, et le conseil municipal envisageait de lotir les parcelles les plus accessibles et les mieux exposées.

Les services RTM avaient identifié sur la commune un certain nombre de lieux propices à des glissements de terrain et les avaient traités par des systèmes de drainage. Mais l'endroit où s'est produit la catastrophe avait été classé comme ne présentant aucun danger (*cf. carte des risques naturels au 1/10 000<sup>e</sup> de la commune de la Salle-en-Beaumont, RTM, 1977, réactualisée en 1992*) bien que quelques indices d'instabilité correspondant à un glissement apparemment stabilisé avaient été identifiés dans le passé (*cf. carte Zermos au 1/20 000<sup>e</sup> de la région du Beaumont, Isère, 1975*).

Cette constatation incite à une remise en cause de la validité des méthodes traditionnelles de cartographie de l'aléa mouvements de terrain fondées essentiellement sur la reconnaissance de facteurs permanents d'instabilité et qui délaissent trop le rôle des facteurs aggravants, en particulier de nature hydraulique. Ces facteurs peuvent modifier de façon importante les conditions d'équilibre d'un site, même en présence de faible pente comme cela a été le cas ici avec une valeur moyenne proche de 15°. La région du Beaumont, tout comme celle voisine du Trièves, recèle un certain nombre de sites potentiellement dangereux présentant les mêmes configurations lithologiques et structurales que la combe des Parajons. Il semblerait opportun d'y tester quelques modèles de déclenchement hydraulique en mettant à profit l'expérience pouvant être tirée du glissement de la Salle-en-Beaumont.

## ***5. Conclusion du second chapitre***

Ces trois analyses de cas ont permis de définir quelques typologies des dommages propres aux phénomènes de mouvements de terrain et d'apprécier à travers celles-ci le rôle de quelques uns des facteurs de vulnérabilité qui ont été introduits dans le premier chapitre (**fig. I.6**).

Ces dommages, préjudices et dysfonctionnements ont pu être hiérarchisés et illustrés sur les trois cas analysés et même partiellement quantifiés économiquement sur le cas du Diois notamment au niveau du réseau routier et de l'enclavement de Boulc.

Les constats d'endommagement menés, ont été réalisés "à chaud", quelques heures à quelques mois après les événements étudiés. C'est la raison pour laquelle l'analyse des dommages structurels y est davantage développée, compte tenu du peu de recul dans le temps qu'elle nécessite. Cependant, pour avoir une image plus précise des perturbations fonctionnelles, des préjudices et des coûts indirects, il serait souhaitable de prendre davantage de recul d'observation, à la faveur de nouvelles missions de reconnaissance par exemple.

Par ailleurs, ce type d'analyse reste encore trop peu fréquent dans le cas des mouvements de terrain, et il serait souhaitable de les généraliser au moyen d'équipes pluridisciplinaires, de manière à compléter progressivement la matrice d'endommagement entre phénomènes de mouvements de terrain et éléments exposés et entretenir une "mémoire des catastrophes". La perception du risque mouvements de terrain n'en serait alors que meilleure, la prévention plus efficace et l'évaluation de la vulnérabilité facilitée.

## **CHAPITRE III**

# **L'EVALUATION DE LA VULNERABILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN**

### **1. Introduction**

En restant dans la logique des concepts exposés au premier chapitre et en mettant à profit les enseignements tirés des analyses en retour du second chapitre, on tente dans ce troisième chapitre de bâtir une méthodologie d'évaluation quantitative de la vulnérabilité aux mouvements de terrain, qui soit reproductible.

Cette quantification de la vulnérabilité passe par l'élaboration d'une nouvelle classification des mouvements de terrain permettant d'éclairer la notion d'intensité des phénomènes et par la constitution de typologies d'endommagement spécifiques. Elle se matérialise par la constitution de matrices d'endommagement qui constituent le coeur de la méthodologie d'évaluation.

Les étapes méthodologiques une fois définies, on tente de les illustrer par quelques applications fictives sur des zones exposées d'une part à des chutes de blocs et d'autre part à des glissements.

## 2. La quantification de la vulnérabilité

### 2.1. Présentation

Comme cela a été énoncé dans le §. 2.3.2 du chapitre I, l'évaluation de la vulnérabilité, selon une approche quantitative, passe par la détermination du niveau d'endommagement potentiel d'un certain nombre d'éléments exposés situés dans la zone d'extension prévisible du phénomène. Cela revient donc à prévoir et à quantifier, dans la mesure du possible, la nature de l'interaction entre éléments exposés et phénomènes.

Cependant, compte tenu de la diversité, de la complexité et de la variabilité spatio-temporelle des mécanismes mis en jeu par les phénomènes de mouvements de terrain, il est souhaitable de réduire leur classification à une expression plus simple qui soit représentative de leur processus d'endommagement, ou en d'autres termes et par analogie aux séismes, de la nature de la sollicitation qu'ils exercent sur les éléments qui y sont exposés.

La seconde difficulté est d'arriver à caractériser l'intensité destructrice de cette sollicitation par des critères physiques simples.

Un fois cette étape réalisée, on disposera d'un schéma homogène de structuration et de quantification de la vulnérabilité des éléments exposés sous la forme de matrices dites "d'endommagement". La constitution de ces matrices nécessitera au préalable de définir des typologies à la fois des éléments exposés et de leurs modes d'endommagement. On verra que la réalisation de cette étape n'est pas aisée, compte tenu notamment du peu de données statistiques dont on dispose et de la méconnaissance des différentes fonctions d'endommagement qui conditionnent ces matrices.

### 2.2. La capacité d'endommagement des mouvements de terrain

#### 2.2.1. Notion de processus d'endommagement

Le processus d'endommagement, ou sollicitation, décrit l'action du phénomène sur l'élément structurel (bien) ou corporel (personne) qui le subit.

Contrairement à d'autres phénomènes naturels tels que les inondations ou les séismes, les mouvements de terrain se singularisent par différents types de processus d'endommagement. En effet, les phénomènes hydrauliques ont essentiellement des effets de submersion statique ou dynamique tandis que les séismes sont pour leur part générateurs de vibrations du sol. Il en va autrement avec les mouvements de terrain pour lesquels on a été amené à distinguer quatre grandes familles de sollicitations (Leone *et al.*, 1995). Il s'agit :

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

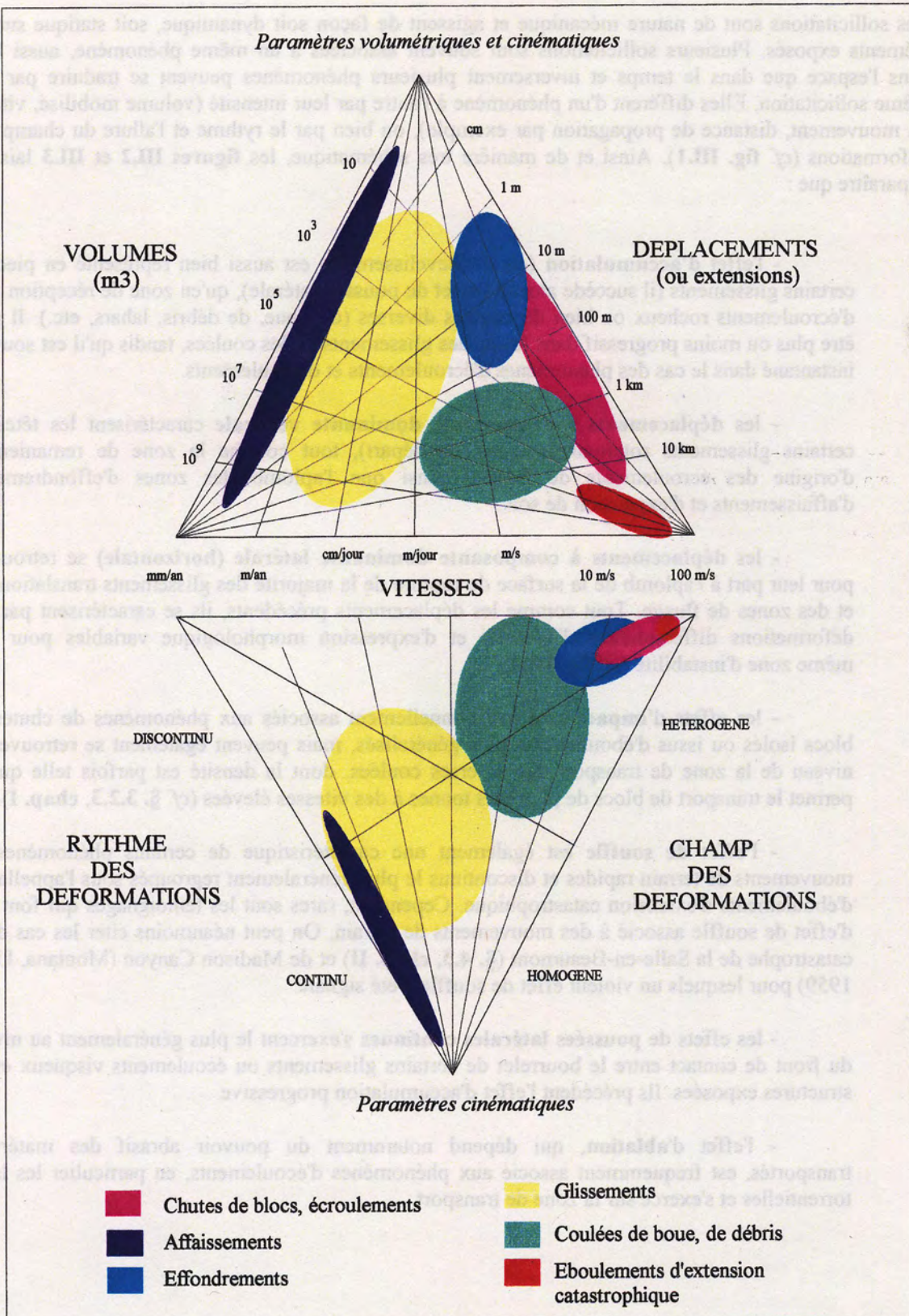


Figure III.1 - Domaines relatifs aux différents phénomènes de mouvements de terrain sur la base de quelques paramètres caractéristiques de leur intensité (modifié et complété d'après Mirgon *et al.*, 1993).

Ces sollicitations sont de nature mécanique et agissent de façon soit dynamique, soit statique sur les éléments exposés. Plusieurs sollicitations sont souvent associées à un même phénomène, aussi bien dans l'espace que dans le temps et inversement plusieurs phénomènes peuvent se traduire par une même sollicitation. Elles diffèrent d'un phénomène à l'autre par leur intensité (volume mobilisé, vitesse du mouvement, distance de propagation par exemple), ou bien par le rythme et l'allure du champ des déformations (cf. **fig. III.1**). Ainsi et de manière très schématique, les **figures III.2 et III.3** laissent apparaître que :

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

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

- les **déplacements à composante dominante latérale (horizontale)** se retrouvent pour leur part à l'aplomb de la surface de rupture de la majorité des glissements translationnels et des zones de fluage. Tout comme les déplacements précédents, ils se caractérisent par des déformations différentielles d'intensité et d'expression morphologique variables pour une même zone d'instabilité (cf. **fig. III.4**).

- les effets **d'impact** sont traditionnellement associés aux phénomènes de chutes de blocs isolés ou issus d'éboulements plus généralisés, mais peuvent également se retrouver au niveau de la zone de transport des diverses coulées, dont la densité est parfois telle qu'elle permet le transport de blocs de plusieurs tonnes à des vitesses élevées (cf. **§. 3.2.3, chap. I**).

- l'**effet de souffle** est également une caractéristique de certains phénomènes de mouvements de terrain rapides et discontinus le plus généralement regroupés sous l'appellation d'éboulements d'extension catastrophique. Cependant, rares sont les témoignages qui font état d'effet de souffle associé à des mouvements de terrain. On peut néanmoins citer les cas de la catastrophe de la Salle-en-Beaumont (**§. 4.3, chap. II**) et de Madison Canyon (Montana, USA, 1959) pour lesquels un violent effet de souffle a été signalé.

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

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

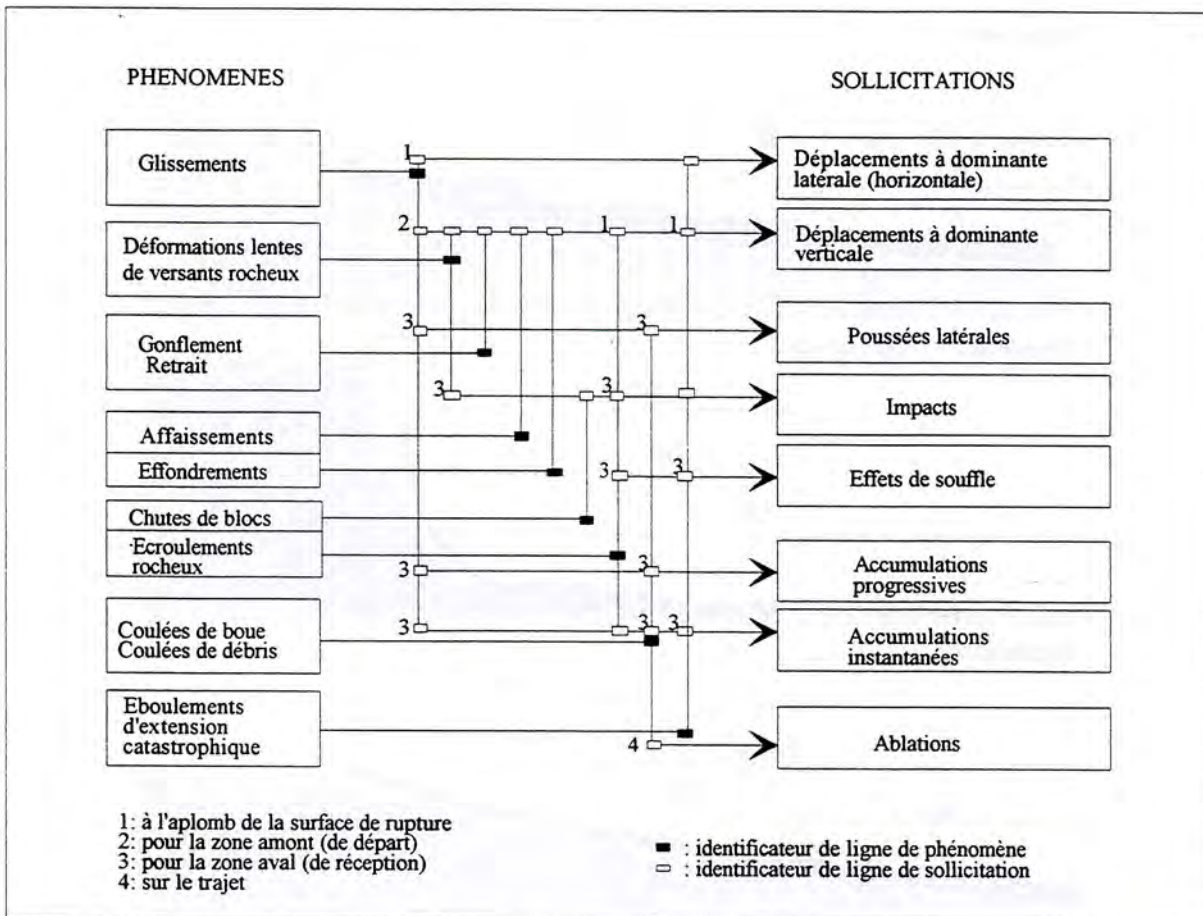


Figure III.2 - Grands types de sollicitations associées aux principaux phénomènes de mouvements de terrain.

Cette typologie simplifiée des mécanismes des mouvements de terrain permet donc de distinguer au total huit sous-classes de sollicitations élémentaires (fig. III.2) caractéristiques du potentiel d'endommagement de ces phénomènes. Cependant, conformément à ce qui a pu être décrit dans l'analyse en retour de la catastrophe de la Josefina (§. 2.6.2, chap. II), l'apparition de phénomènes induits nécessite de considérer parfois, dans toute tentative de prévision du risque, d'autres types de sollicitations, en particulier de nature hydraulique.

En cartographie préventive, cette traduction du phénomène en terme de sollicitation (s) associée (s) revêt un intérêt capital car elle sous-entend que l'on s'intéresse à l'extension prévisible du phénomène. On peut ainsi prétendre franchir un pas dans la cartographie du phénomène potentiel en passant de cartes de facteurs de prédisposition (cf. §. 2.2.2.1, chap. I) à des cartes de modes de sollicitations mécaniques. Cette opération est encore rarement réalisée, du moins en cartographie opérationnelle classique, compte tenu des difficultés propres à la modélisation de la propagation des phénomènes de mouvements de terrain.

On voit donc ici que les études de vulnérabilité sont tributaires de la capacité à caractériser l'aléa, du moins dans sa dimension spatiale et qu'**analyses de vulnérabilité et d'aléa sont forcément liées**, contrairement à ce que l'on peut voir dans la majorité des études actuelles de risque. On pense en particulier aux nombreux P.E.R. réalisés, pour lesquels les analyses dites de vulnérabilité se bornent à un inventaire des principaux enjeux existants, le plus souvent sans faire le lien avec la nature du phénomène impliqué.

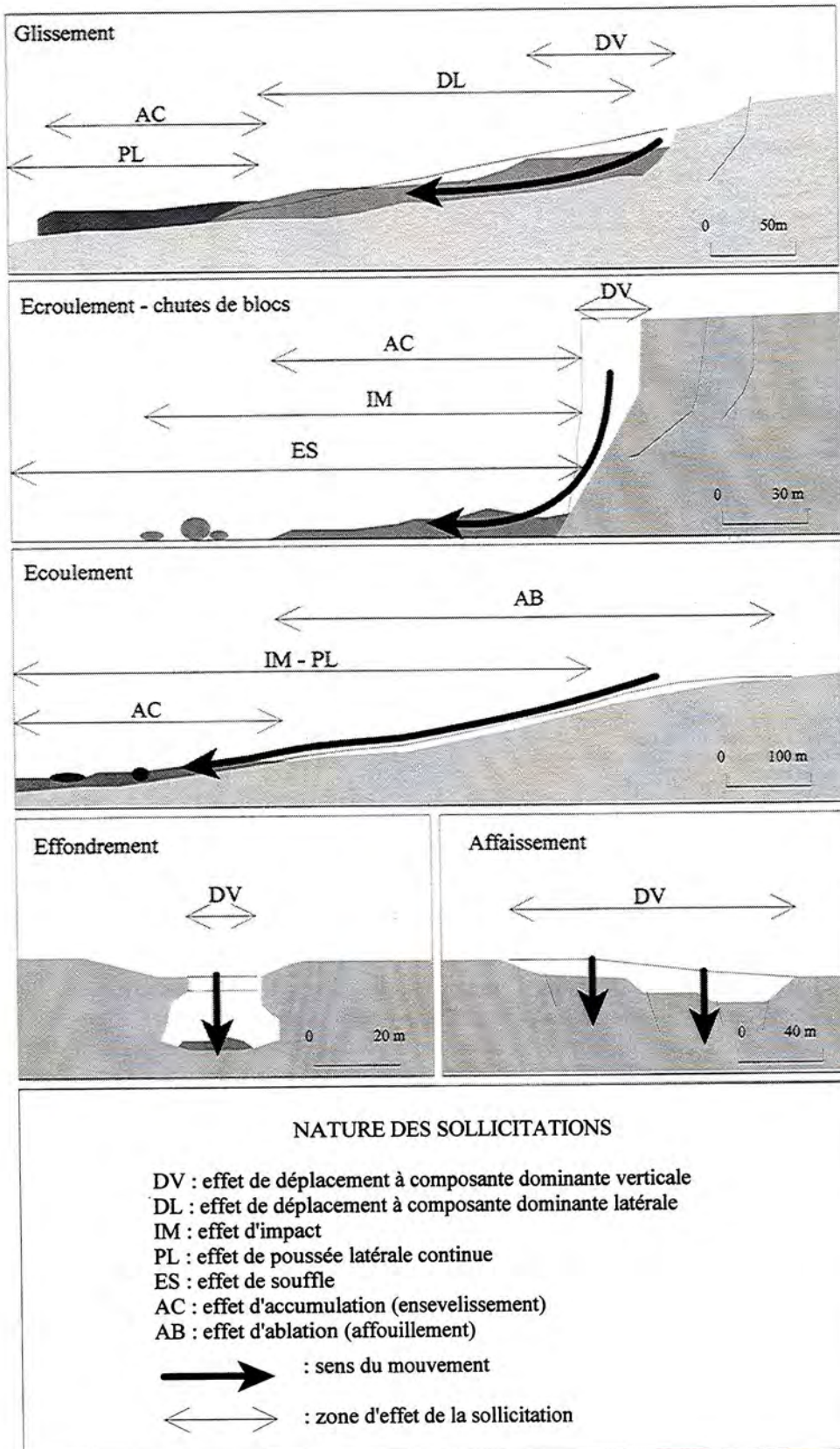


Figure III.3 - Zones d'effet des sollicitations générées par quelques grands types de phénomènes de mouvements de terrain.



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

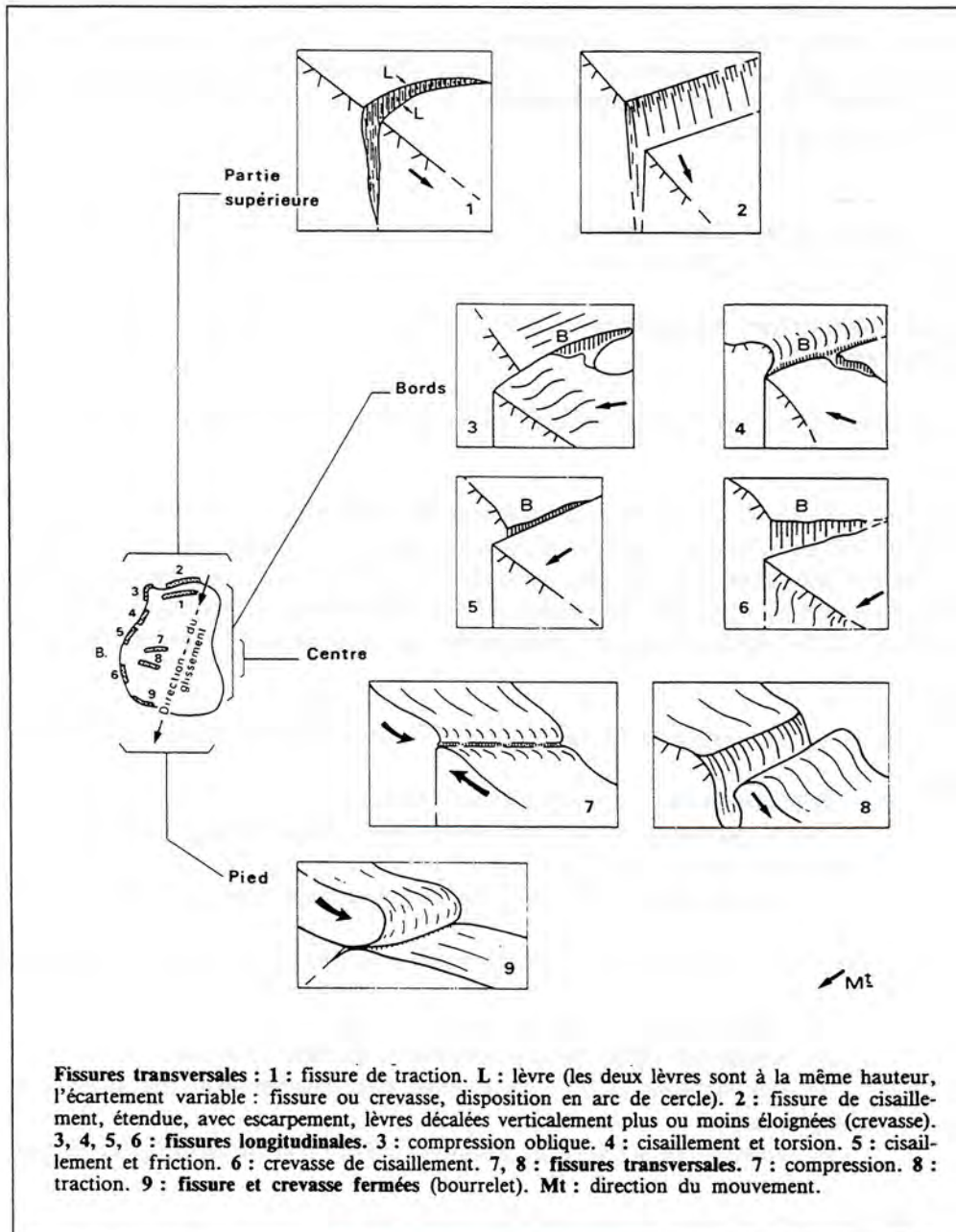


Figure III.4 - Différents types de fissures ou crevasses dans un glissement (d'après Bombard, 1968 in Flageollet, 1989).

## 2.2.2. Notion d'intensité destructrice

### 2.2.2.1. Critères d'intensité

Actuellement, la notion d'intensité demeure très mal définie pour les mouvements de terrain et aucune réflexion méthodologique n'est connue à ce jour **sur l'ensemble de ces phénomènes**. Or, il semble a priori fondamental de déterminer le niveau d'intensité d'un phénomène potentiel pour pouvoir juger différenciellement du niveau de comportement des structures et des personnes qui y sont exposées.

Contrairement aux intensités des sollicitations sismiques ou hydrauliques qui peuvent être caractérisées seulement par quelques paramètres indépendants (accélération du sol pour les premières et vitesse d'écoulement, hauteur d'eau et durée de submersion pour les secondes), il en va différemment avec les mouvements de terrain pour lesquels la diversité des sollicitations associées nécessite de considérer un plus grand nombre de paramètres représentatifs de leur pouvoir destructeur. Ceux-ci peuvent être regroupés en trois catégories :

- les **paramètres dimensionnels** ou **géométriques** (surface, volume, forme, profondeur, amplitude, distance, hauteur et épaisseur) ;
- les **paramètres cinématiques** (vitesse, débit, accélération, rythme et champ des déformations) ;
- les **autres** (viscosité et autres paramètres rhéologiques, masse, charge solide).

Dans le cadre de ce travail, on propose de retenir une douzaine de critères d'intensité, correspondant soit directement à certains de ces paramètres physiques, soit à des grandeurs pouvant être définies par ces paramètres, comme par exemple des forces ou des énergies. Ce choix semble suffisant pour qualifier, voire dans la mesure du possible quantifier, les intensités de l'ensemble des sollicitations apportées par les principaux phénomènes de mouvements de terrain (**fig. III.5**). Il s'agit :

- pour les zones soumises à des déplacements à composante dominante latérale (DL) :
  - de la **vitesse (VL)** des déplacements latéraux ;
  - de l'**importance (CDL) du champ des déformations de surface** associé à ces déplacements ;
  - de la **profondeur (PSR)** de la surface de rupture de la masse en mouvement ;
- pour les zones soumises à des déplacements à composante dominante verticale (DV) :
  - de la **vitesse (VV)** des déplacements verticaux ;
  - de l'**amplitude (DH)** des déplacements verticaux instantanés ;
  - de l'**importance (CDV) du champ des déformations de surface** associé à ces déplacements ;
  - du **mouvement différentiel unitaire (MDU)** associé aux déplacements continus ;
- pour les zones soumises à une poussée latérale continue (PL) :
  - de la **pression (P)** exercée au front de la masse en mouvement ;
  - de la **géométrie (SC)** de la surface de contact entre le front de la masse en mouvement et la structure ;

- pour les zones soumises à des impacts (IM) :
  - de l'énergie cinétique (EC) de la masse en mouvement ou de son équivalence pour un volume donné (ECv) ou une vitesse donnée (ECc) ;
- pour les zones soumises à un effet de souffle (ES) :
  - de la distance (D) entre la zone de départ de la masse en mouvement et l'élément exposé ;
- pour les zones soumises à des accumulations (AC) :
  - de la hauteur (H) des dépôts ;
- pour les zones soumises à de l'ablation (AB) :
  - de la profondeur (PA) d'ablation du sol.

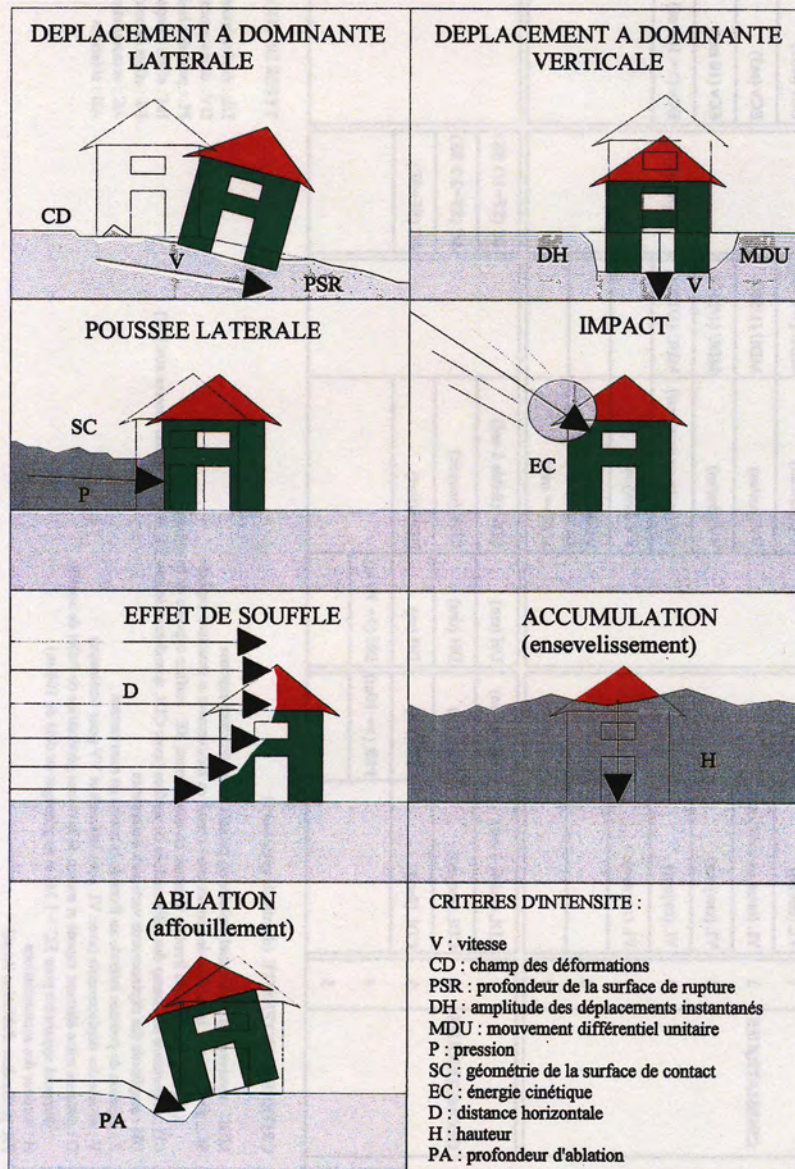
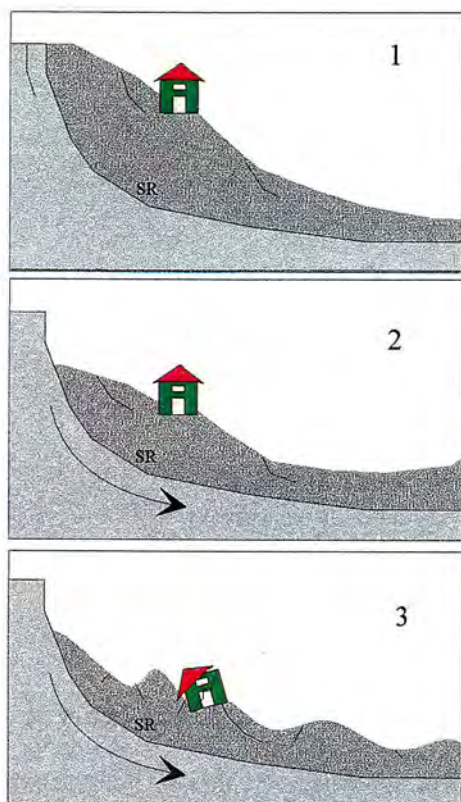


Figure III.5 - Illustration des grands types de sollicitations mouvements de terrain et critères de mesure de leur intensité. Exemple d'action sur un bâtiment.



## 2.2.2.2. Echelles d'intensité

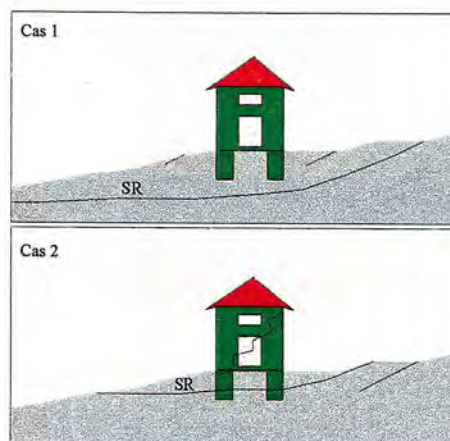
Cette tentative de quantification de l'aléa mouvements de terrain conduit à proposer dans le **tableau III.1** différentes échelles de valeurs de ces critères. Elles sont de nature soit cinématique, soit géométrique. Ces valeurs sont à considérer au niveau de la zone d'interaction entre phénomène et élément exposé.



**Figure III.6** - Importance du champ des déformations lié à des déplacements (1 : état initial, 2 : champ faible à nul (surface d'origine conservée), 3 : champ fort (surface d'origine bouleversée), SR : surface de rupture).

Certaines études permettent de prévoir l'évolution de ces déformations et vitesses associées, du moins dans le cas théorique d'un glissement simple (cf. Cartier & Delmas, 1984 et Delmas *et al.*, 1987).

- La **profondeur de la surface de rupture (PSR)** comporte quatre classes d'ordre de grandeur du demi-mètre à la dizaine de mètres et plus. Ces classes sont intéressantes à considérer pour juger du cisaillement ou non des fondations de différentes infrastructures exposées, autrement dit des déformations en profondeur (**fig. III.7**). On suppose alors que la vitesse des déplacements latéraux est suffisamment importante pour cisailier les fondations dont la profondeur est supérieure ou égale à la profondeur de la surface de rupture (supérieure au cm/jour).



**Figure III.7** - Interaction entre surface de rupture (SR) et fondations d'un bâti (1 : bâti épargné, 2 : bâti endommagé).

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

- L'**importance du champ des déformations de surface (CDL et CDV)** est décomposée en trois classes d'intensité croissante : faible (surface d'origine conservée en partie ou en totalité), moyenne, et forte (surface d'origine bouleversée) (**fig. III.6**). Cela reste un critère purement qualitatif qui dépend notamment de la vitesse des déplacements, de la géométrie et profondeur de la surface de rupture ainsi que de la nature des terrains en mouvement. Pour plus de rigueur, il serait intéressant de considérer, dans le cas où existent des déformations, l'allure homogène ou au contraire hétérogène du champ des déformations.

- L'amplitude des déplacements verticaux instantanés (DH), à composante dominante verticale, est décomposée en quatre classes de valeur allant de l'ordre du cm à la dizaine de mètres et plus. On peut également nommer ce critère "mouvement absolu" en référence à la terminologie suivante (fig. III.8).

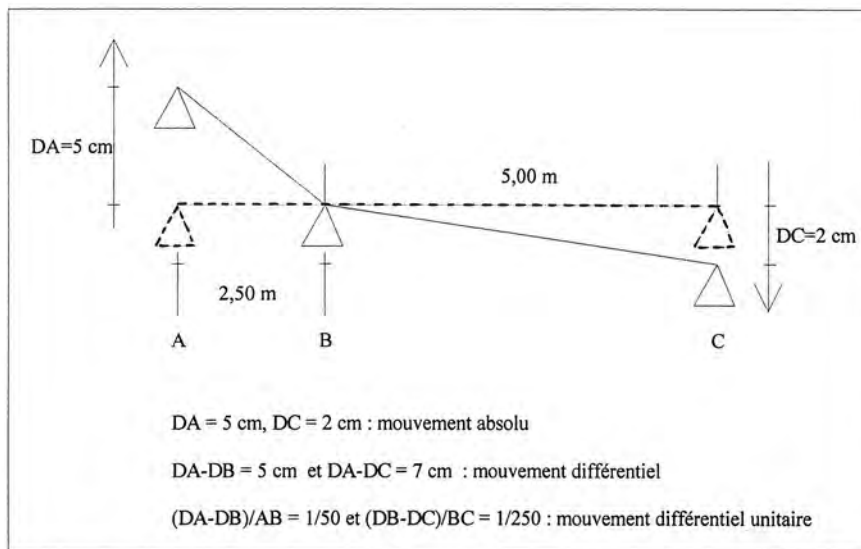


Figure III.8 - Mouvements absolu, différentiel et différentiel unitaire (d'après Mouroux *et al*, 1988).

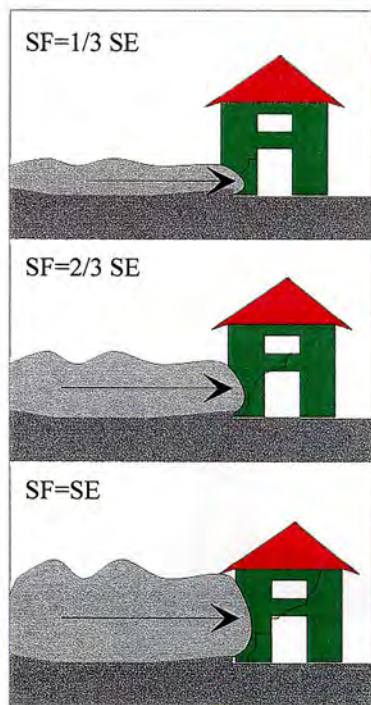


Figure III.9 - Géométries du contact entre bâti de surface exposée SE et front de la masse en mouvement de surface SF.

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

- La **pression** (P) exercée au front d'une masse en mouvement est difficilement quantifiable. Elle est probablement de l'ordre du MPa à quelques dizaines de MPa au front de certains glissements de grande ampleur et jusqu'à dix fois supérieure à la pression hydrostatique au niveau du bourrelet frontal de certaines coulées de débris (Sauret, 1987). Il semble a priori très délicat d'en proposer une échelle de valeur. Aussi est-il préférable d'adopter un autre critère d'appréciation, beaucoup plus qualitatif, qui repose sur la géométrie de la surface de contact entre front de la masse en mouvement et élément exposé. Cela permet, faute de mieux, de distinguer pour le bâti trois cas de figures auxquels seront associés des niveaux d'endommagement variables (fig. III.9).

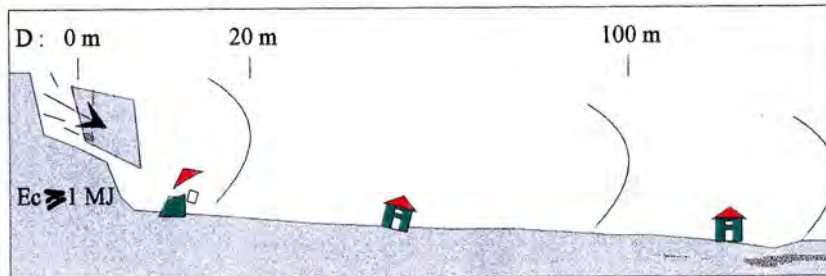
- Concernant le critère **énergie cinétique** (EC), on a retenu pour la quantification en unité kilo-joules, 5 classes de valeurs allant de l'ordre du millième de kJ au millier de kJ. L'effet d'impact étant réservé à des volumes rocheux indépendants (blocs), la valeur maximale de EC retenue a été calculée à partir d'une hauteur de chute libre fixée à 200 m, ce qui donne une vitesse critique théorique en fin de chute de 60 m/s<sup>28</sup>. Cas extrême, mais possible dans la nature.

Le **tableau III.2** donne les équivalences en vitesse et volume de ces valeurs, pour une masse volumique moyenne de matériaux de 2 300 kg/m<sup>3</sup>.

EC (kJ) $Ec = \frac{1}{2} m \cdot v^2$	10 cm <sup>3</sup>	1 m <sup>3</sup>	10 m <sup>3</sup>	100 m <sup>3</sup>
m/s	0,1	1	10	100
10 m/s	1	100	1000	10 000

**Tableau III.2** - Equivalences vitesse-volume des différentes valeurs du critère énergie cinétique.

- Le critère **distance horizontale** (D) entre élément exposé et zone de départ de la masse en mouvement a été retenu pour qualifier l'effet de souffle. On suppose que cet effet de souffle apparaît à partir d'une énergie cinétique libérée de l'ordre du méga-joules (MJ) et qu'il se propage alors, dans tous les cas de figure, au delà de 100 m, ce qui semble en accord avec les rares cas réels analysés. Trois tranches de distance d'éloignement de l'élément exposé ont été retenues : 0-20 m, 20-100 m, 100 m et plus (**fig. III.10**).



**Figure III.10** - Distances D d'éloignement à la source de l'effet de souffle.

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

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

<sup>28</sup> La vitesse en fin de chute est donnée par la relation  $Vc = \sqrt{2gh}$  pour un corps soumis aux lois de la pesanteur qui subit une accélération uniforme. Avec  $g=9,8 \text{ ms}^{-2}$  et  $h=200 \text{ m}$ .





Abe.	: Aberfan (Grande Bretagne, 1966) : H = 10 m
Ban.	: Bangkok (Thaïlande) : VV = 10 cm/an en 1980
Bli.	: Blitar (Indonésie, 1919) : H = 25 m et VL = 18 m/s
Cad.	: Cadenet (Vaucluse, France, 1986) : ECv (2 m <sup>3</sup> )
Car.	: Cartago (Costa Rica, 1963) : H = 12 m
Chl.	: Chlowena (Suisse, 1994) : VL = 10 m/jour pour le front du glissement
Cla.	: La Clapière (Alpes-Maritimes, France, depuis 1975) : VV = 3 m/an en moyenne et pic de 10 cm/j en 1987
Elm.	: Elm (Suisse, 1881) : VL = 80 m/s
Gal.	: Galveston (Texas, U.S.A., depuis 1900) : VV > 2 cm/an en moyenne depuis 1900
Ger.	: Saint-Gervais (Haute-Savoie, France, 1892) : VL = 7 m/s et ECv (200 m <sup>3</sup> )
Gra.	: Mont Granier (Savoie, France, 1248) : H = plusieurs dizaines de m
Hus.	: Mont Huascarán (Pérou, 1970) : VL = 75-100 m/s et H = 10 m
Jos.	: Josefina (Equateur, 1993) : H = 100 m
Kam.	: Kami-Hurano (Japon, 1926) : VL = 50 m/s
Low.	: Lower Gros Ventre (Wyoming, U.S.A., 1925) : VL = 22-50 m/s
Mad.	: Madison canyon (Montana, U.S.A., 1959) : Effet de souffle et VL = 50 m/s
May.	: Mayunmarca (Pérou, 1974) : VL = 36-55 m/s
Mex.	: Mexico (Mexique) : VV = 20 cm/an en moyenne entre 1930 et 1960
Nic.	: Saint-Nicolas (Meurthe-et-Moselle, France, depuis 1982) : VV = 50 cm/an
Orl.	: Orlando (U.S.A., 1981) : DH : 24 m
Pac.	: Pacifica (Californie, U.S.A., 1982) : VL = 11 m/s
Pis.	: Tour de Pise (Italie, depuis 1173) : VV = 2 mm/an vers 1690 ; 1 mm/an entre 1800 et 1900 et moins de 1 mm/an depuis
Pla.	: Commune du Planay (Savoie, France, 1988) : VL = 3m/an en moyenne pour partie aval et 1,5 m/jour pour paroxysme de 1988
Ran.	: Ranrahirca (Pérou, 1962) : ECv (3 000 m <sup>3</sup> )
Rav.	: Torrent de la Ravoire (Savoie, France, 1981) : PA > 15 m
Roq.	: Roquebillière (Alpes-Maritimes, France, 1926) : VL = 5 m/jour
Rou.	: Route C.D. 902 (Savoie, France, 1986) : ECv (27 m <sup>3</sup> )
Sal.	: Salle-en-Beaumont (Isère, France, 1994) : Effet de souffle, Poussée latérale et H = 20 m
Sau.	: Saint-Saulves (Nord, France, 1983) : DH = 20 m
Séc.	: Séchilienne (Isère, France) : VV = 2 mm/j en 1989
Val.	: Torrent de la Valette (Alpes de Haute-Provence, France, depuis 1982) : VL = 40 cm/jour en périodes de pluies

Tableau III.4 - Niveaux d'intensité de quelques mouvements de terrain connus (les abréviations renvoient au tableau III.3).

Le **tableau III.3** donne un aperçu du niveau de représentativité de ces différentes échelles d'intensité pour les principaux phénomènes de mouvements de terrain. La typologie des phénomènes retenue renvoie directement à la description qui en est faite au §. 3.2 du **chapitre I**. Les gammes de valeur des critères d'intensités sont celles proposées dans le **tableau III.1** et les exemples retenus en guise d'illustration d'un niveau d'intensité donné sont détaillés dans le **tableau III.4**. Ce tableau représente en quelque sorte une classification des phénomènes de mouvements de terrain en termes d'intensité, ou de pouvoir destructeur, et ce indépendamment de la nature et du niveau des dommages possibles.

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

## 2.3. Modes et niveaux d'endommagements des éléments exposés

### 2.3.1. Typologie des éléments exposés

Par le terme "éléments exposés", dont l'équivalent anglo-saxon est "*elements at risk*" (Varnes, 1984), on définit des biens, des personnes et des fonctions susceptibles d'être endommagés. Dans le cadre de cette tentative de quantification de la vulnérabilité, six grandes familles d'éléments exposés ont été retenues (*cf.* **tab. III.5**).

Elles recouvrent la majorité des éléments structurels susceptibles d'être recensés sur une carte topographique : le bâti, les réseaux et les surfaces dites naturelles (c'est à dire non-urbanisées) auxquels sont associés des personnes, des sous-éléments le plus souvent mobiles ou temporaires (animaux, végétaux, mobilier, véhicules, stocks, récoltes) et des fonctions diverses (économiques, sociales, de transport-communication-distribution, etc.).

Cette typologie des éléments exposés repose donc à la base sur un découpage spatial du territoire et son principe s'apparente à celui préconisé par la Délégation au Risques Majeurs (D.R.M., 1985a) pour l'élaboration des plans d'exposition aux risques (P.E.R.). La typologie de la D.R.M. repose pour sa part sur un découpage du territoire beaucoup moins discriminant : celui donné par les plans d'occupation des sols (P.O.S.).

### 2.3.2. Typologie des modes d'endommagement

En mettant à profit le retour d'expériences tirées d'analyses de cas, en particulier ceux traités dans le **chapitre II**, on a défini pour chaque type d'élément exposé une typologie des principaux modes d'endommagement spécifiques aux phénomènes de mouvements de terrain. Cela conduit à proposer, pour l'ensemble des éléments exposés retenus, 55 modes d'endommagement différents classés par niveau d'intensité (ID) croissante (**tab. III.5**).

Conformément à ce qui a été écrit dans le §. 2.3.2. du **chapitre I** au sujet de la vulnérabilité dans son acception quantitative, les dommages sont classés en trois grandes catégories, suivant la nature des éléments affectés :

- les dommages structurels (ou matériels) ;
- les dommages corporels (ou préjudices corporels) ;
- les perturbations fonctionnelles (ou dysfonctionnements).

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

Tableau III.5 - Typologie des modes et niveaux d'endommagement des principaux éléments exposés aux mouvements de terrain (avec ID : intensité des dommages, D : taux d'endommagement, structurels (Ds), corporels (Dc) et fonctionnels (Df)).

Cette typologie se différencie de celles existantes par son caractère général, c'est-à-dire non spécifique à un contexte régional, et par le fait qu'elle est censée s'appliquer à l'ensemble des phénomènes de mouvements de terrain et non pas seulement à certains types.

Alexander (1986 et 1988), par exemple, est le premier auteur à avoir proposé une échelle d'intensité des dommages au bâti, mais valable seulement pour les phénomènes de subsidence et de glissements rotationnels ou translationnels. Elle comporte sept niveaux d'intensité et a été élaborée à partir d'études pathologiques exemplaires menées sur le site d'Ancona en Italie, suite au glissement du 13 décembre 1982 (Alexander, 1984) (tab. III.6).

Concernant l'effet des phénomènes de gonflement de sols, on peut également citer les échelles d'endommagement structurel du bâti établies par le Building Research Establishment (U.S.A.) (in Mouroux *et al.*, 1988.) ou bien par Mouroux *et al.* (1988).

En France, la Délégation aux Risques Majeurs propose également une échelle plus générale de l'endommagement du bâti comportant cinq niveaux d'intensité (D.R.M., 1990). Elle s'inspire largement d'études pathologiques de constructions soumises à des séismes (tab. III.6).

Enfin, on peut également citer l'échelle de gravité d'une catastrophe établie par le Colorado Geological Survey (in Asté, 1991). Elle repose sur quelques types de préjudices susceptibles d'apparaître en cas de manifestation d'un mouvement de terrain, mais n'a de valeur qu'indicative.

D.R.M. (1)		ALEXANDER (2)	
Modes d'endommagement	ID	Modes d'endommagement	ID
Dommages légers non-structuraux (gros oeuvre non touché), stabilité non affectée	1	Fissuration des murs. Aucune distorsion des structures ou de détachements d'éléments d'architecture extérieurs.	1
		Bâtiment habitable, réparations non-urgentes. Les déformations des fondations et l'inclinaison des murs ne sont pas suffisantes pour affecter la stabilité de l'ensemble de l'édifice.	2
Fissuration des murs	2	Les murs s'écartent de la verticale de 1 à 2 degrés. Des fissures importantes apparaissent dans les éléments de la structure. Les fondations sont soumises à un tassement différentiel d'au moins 15 cm. Le bâtiment nécessite une évacuation.	3
		Les murs s'écartent de la verticale de plusieurs degrés. Fracturation des structures. Tassement différentiel des fondations d'au moins 25 cm. Planchers inclinés de 1 à 2 degrés. Les cadres des portes et des fenêtres sont trop tordus pour être utilisables. Les occupants doivent être évacués.	4
Déformations importantes Lézards largement ouvertes Evacuation nécessaire	3	Les murs s'écartent de la verticale de 5 à 6 degrés. Les structures sont grossièrement tordues et la subsidence cause de sérieuses fissures aux planchers et aux murs. Désolidarisation possible des bâtiments en bois de leurs fondations. Les murs en briques s'effondrent partiellement. Les occupants doivent être relogés pour longtemps. La réhabilitation du bâtiment semble compromise.	5
		Effondrement partiel. Nécessité d'évacuer immédiatement les occupants et d'interdire le site en prévision d'effondrements éventuels de façades.	6
Effondrement partiel du plancher ou brèches dans les murs Désolidarisation des parties Evacuation immédiate	4	Effondrement total. Nécessite le déblaiement du site.	7
		Effondrement total. Nécessite le déblaiement du site.	7
(1) par référence aux résultats d'études pathologiques de constructions soumises à séismes (DRM, 1990).		(2) par référence aux constats d'endommagement dans la région d'Ancona, Italie (Alexander, 1988).	
ID : intensité des dommages structurels (arbitraire)			

Tableau III.6 - Exemples d'échelles d'endommagement structurel du bâti existantes.

### 2.3.3. La mesure du niveau d'endommagement

#### 2.3.3.1. Notions de taux d'endommagement et de valeur de l'élément exposé

Modes et niveaux d'endommagement définis précédemment (**tab. III.5**) peuvent être traduits et quantifiés en terme de pertes associées, celles ci étant de nature soit économique (coûts directs et indirects <sup>29</sup> ; cf. **fig. III.11**), soit humaine, soit fonctionnelle.

Pour ce, on recourt à l'utilisation de **taux d'endommagement**, véritables unités d'évaluation de la vulnérabilité, de valeurs comprises entre 0 et 1. On en définit trois types suivant la nature des dommages auxquels ils s'appliquent :

- les taux d'endommagement structurel (DS) ;
- les taux de préjudice corporel (DC) ;
- les taux de dysfonctionnement(DF).

Sur le plan théorique, le taux d'endommagement D, compris entre 0 et 1, correspondant à un niveau d'endommagement donné s'obtient par la formule suivante :

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

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

Ces valeurs unitaires peuvent être de nature économique (valeur vénale ou marchande et valeur d'usage), fonctionnelle, esthétique, affective, environnementale (Grasmick, 1994), écologique, paysagère (Bouchard & Deguelle, 1994), identitaire, patrimoniale, sacrée, etc., et d'importances variables suivant les contextes socio-économiques, culturels et décisionnels <sup>30</sup>. Le taux d'endommagement ainsi défini, présente alors l'avantage, sous la forme d'une unité adimensionnelle, de pouvoir être redéfini pour chaque contexte socio-culturel et de permettre ainsi des analyses de vulnérabilité comparatives, d'un pays à l'autre ou même d'une région à l'autre par exemple. De plus, pour un même pays, il n'a pas besoin d'être réactualisé et demeure transposable d'un cas à un autre, une fois les modes d'endommagement bien définis.

Dans la pratique, les trois catégories de taux ont pu être estimées par différentes approches plus ou moins rationnelles et variables suivant la nature des dommages correspondants (**tab. III.5**). Le système de valeur de référence choisi pour leur calcul est le plus souvent de nature économique.

#### 2.3.3.2. Taux d'endommagement structurel (Ds)

Ils s'appliquent à la catégorie des dommages structurels. Ils ont été généralement calculés en divisant, pour un même type d'élément exposé, les coûts des différents niveaux d'endommagement considérés (estimés à travers les coûts des réhabilitations) par le coût du niveau d'endommagement maximum possible (et qui représente la destruction totale du bien). Cela revient en d'autres termes, suivant la nature des données disponibles, à diviser le coût de réhabilitation du bien par sa valeur vénale avant endommagement.

<sup>29</sup> Les coûts directs et indirects correspondent respectivement aux dommages directs et indirects. Les dommages directs sont ceux liés physiquement à l'agent destructeur et simultanés à l'événement. Les dommages indirects désignent par contre les conséquences induites des dommages directs et leurs répercussions à plus ou moins long terme, notamment sur les activités économiques.

<sup>30</sup> Par exemple, pour un même niveau d'endommagement donné, le montant des réparations sera variable d'un pays à l'autre, pour une multitude de raisons, le plus souvent d'ordre socio-économique (état du marché, coût de la main d'oeuvre, etc.).

Cette opération n'a pu se faire qu'à condition de disposer de données statistiques suffisantes sur les dommages. Elles ont été fournies en partie par les analyses pathologiques, menées soit directement, soit indirectement par le biais des consultations bibliographiques.

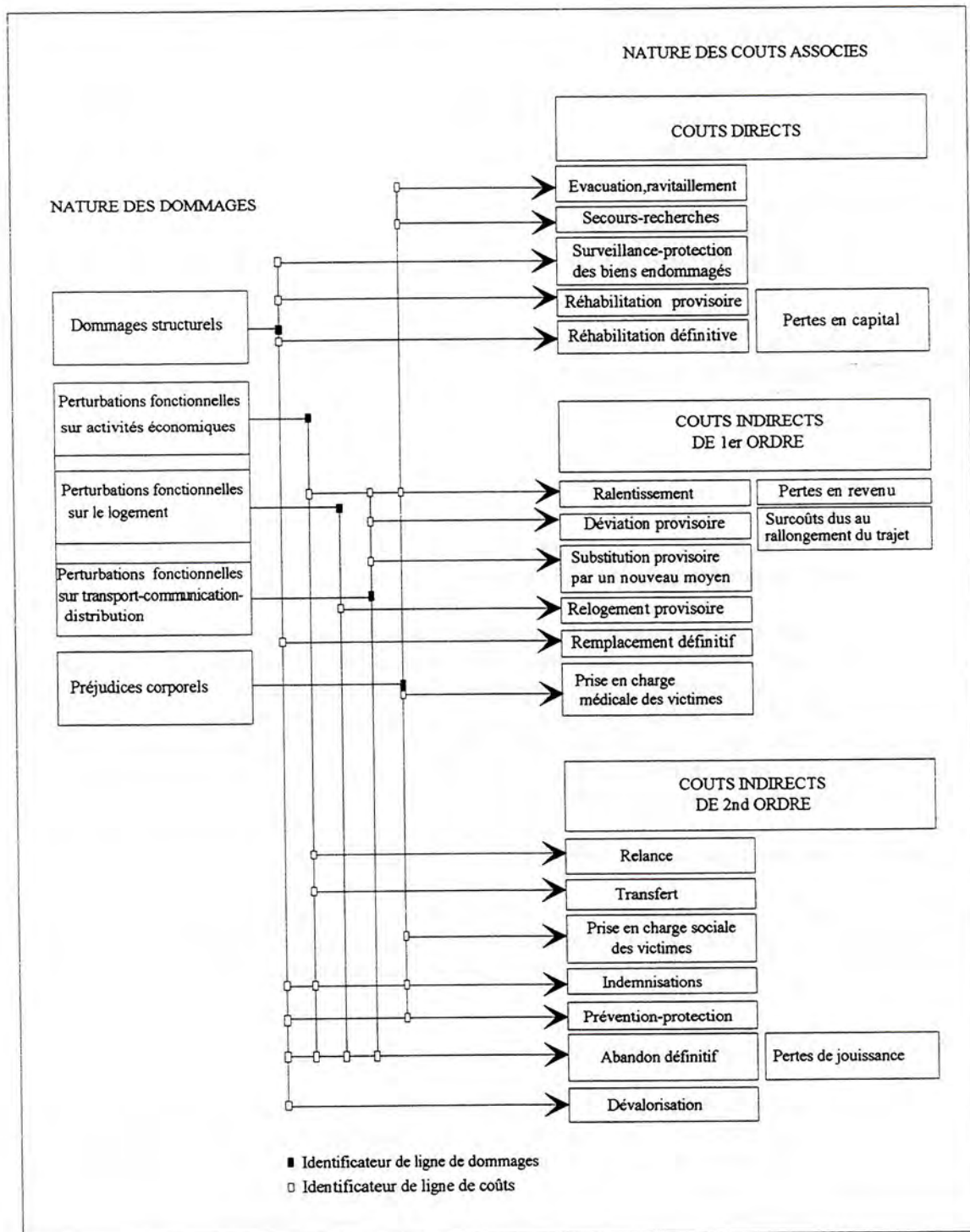


Figure III.11 - Typologie des pertes économiques associées aux principaux dommages.

Par exemple, les analyses pathologiques menées sur l'endommagement du réseau routier du Diois ont permis de définir les différents taux d'endommagement de ce dernier (**tab. II.11** du §. 3.4, chap. II). Les analyses bibliographiques ont pour leur part contribuées à définir les taux d'endommagement du bâti en référence aux analyses pathologiques menées sur les constructions après séismes (D.R.M., 1990). Les autres taux ont souvent été estimés de manière plus intuitive, faute de données statistiques suffisantes, et leur fiabilité demeure donc plus incertaine. On voit donc encore à ce niveau de structuration du concept de vulnérabilité, l'intérêt et l'importance des constats d'endommagement.

### 2.3.3.3. Taux de préjudice corporel (Dc)

En gardant le même principe que pour les dommages structurels, les taux de préjudices corporels ont été calculés en référence au **prix d'une vie humaine**. Cette quantification économique de la valeur humaine est un problème délicat et difficile qui a surtout été étudié jusqu'à présent dans le domaine routier.

Différentes approches permettent cependant de l'évaluer. Elles aboutissent à des ordres de grandeur comparables (**tab. III.7**).

	Approche 1 (valeurs 1992)	Approche 2 (valeurs 1994)	Approche 3 (valeurs 1993)
Blessé léger	18 000 F	18 000 F	13 000 F
Blessé grave	205 000 F	370 000 F	230 000 F
Décès	4 500 000 F	3 600 000 F	2 000 000 F

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

**Tableau III.7** - Approches comparatives de quantification de la valeur vénale de la vie humaine

- La première repose sur le principe de la "**disponibilité à payer**" (Commissariat Général du Plan, 1994), plus précisément de la disposition des personnes à payer pour une réduction de leur probabilité de décès. Mais la mise en oeuvre directe et complète de ce principe se heurte à des obstacles d'ordre à la fois théorique et pratique. Une méthode d'estimation de la disponibilité à payer est celle dite des "valeurs déclarées", où la disponibilité à payer se déduit de réponses à des enquêtes d'intention auprès des usagers. Mais ces enquêtes sont délicates à mener et il n'en existe pas encore en France.

- Une autre approche repose sur le principe du "**capital humain compensé**" (Le Net, 1994, in Commissariat Général du Plan, 1994). Elle revient à évaluer les pertes de production actualisées résultant du décès. Ainsi, certaines études évaluent la valeur collective de la vie d'un individu comme la somme actualisée des satisfactions qu'il recueillera dans le futur. Le résultat numérique est de 4 millions de francs (Duval, 1993 in Commissariat Général du Plan, 1994).

- La dernière approche permettant d'évaluer le prix de la vie humaine est celle de l'estimation du "**coût pour la collectivité**" des accidents (qui n'est supporté que partiellement par les assurances), en tenant compte en particulier des frais médicaux et de la perte de production (Le Net, 1978 et Merlin, 1994). Selon cette approche, Ledoux (1989) précise qu'il est classique de distinguer blessés et décédés mais qu'il est parfois pertinent de préciser davantage, compte tenu du fait que les coûts des différentes catégories de préjudice sont très variables. Ainsi, en référence aux accidents de la route, le montant de l'indemnisation moyenne perçue par un blessé grave (plus de dix jours d'hospitalisation, assurances et sécurité sociale comprise) en 1987 a été estimé à 140 000 F, et à 10 000 F pour un blessé léger ; le coût moyen d'un décès (assurance, sécurité sociale et frais d'obsèques) à 1,6 millions de francs. Il précise par ailleurs que les assurances de la commune d'Hyères (Var) ont versé 500 000 F à la suite d'un accident mortel par chute d'un bloc en 1984.

#### 2.3.3.4. Taux de dysfonctionnement (Df)

Contrairement aux taux précédents, la définition du taux de dysfonctionnement (appliqué aux dommages fonctionnels) est plus problématique. Aussi a-t-il paru nécessaire de distinguer deux sous-types de taux de dysfonctionnement.

- Le premier sous-type de taux s'applique aux perturbations engendrées sur les activités économiques et peut se définir en référence au chiffre d'activité annuel (exprimé en % de baisse du chiffre d'affaire ou d'exploitation de l'activité en question).

Il a donc, comme pour les taux précédents, une connotation économique, et sera utilisé pour le chiffrage des coûts dits indirects et notamment des pertes de revenus.

Les fourchettes de valeurs proposées restent indicatives et sont volontairement larges. En effet, ces baisses de revenus sont très variables d'une activité à l'autre pour un même niveau de perturbation donné. De plus, ces répercussions économiques peuvent agir à plus ou moins long terme et on n'a pas toujours le recul nécessaire pour pouvoir les quantifier. Les analyses menées à ce niveau sur les cas de Boulc et Châtillon-en-Diois illustrent bien cette difficulté (*cf.* §. 3.5, **chap. II**).

- Le second sous-type de taux s'applique aux perturbations engendrées sur les fonctions autres que celles à vocation économique. On a défini ces taux de façon arbitraire par une valeur comprise entre 0 et 1 proportionnelle à l'intensité des perturbations. Ces taux pourraient certainement, comme pour les préjudices corporels, être calculés en référence à un système de valeurs économiques, mais cette approche reste parfois complexe et il reste à trouver les critères de quantification pertinents.

Par exemple, le taux Df appliqué aux perturbations au logement peut être calculé par rapport au coût moyen du relogement. De la même façon, le taux Df appliqué aux perturbations sur l'emploi peut être calculé par rapport au coût supporté par la société d'une perte d'emploi (mise au chômage). On voit que ces estimations, simples en apparence, peuvent cacher des évaluations économiques complexes qui sortent du cadre de ce travail.

## 2.4. Matrices d'endommagement

### 2.4.1. Présentation

Par matrices d'endommagement on désigne des tableaux de correspondances, en termes de taux d'endommagement, entre les types de phénomènes de mouvements de terrain (soit directement, soit indirectement et représentés par un niveau d'intensité donné correspondant à un type de sollicitation donnée) et les différentes catégories d'éléments exposés définies précédemment. De telles matrices, d'emploi courant en risque sismique<sup>31</sup>, sont jusqu'à présent inexistantes dans le domaine du risque mouvements de terrain, exception faite pour l'ébauche de matrice proposée par la délégation aux risques majeurs (D.R.M., 1990) et qui concerne seulement le bâti.

<sup>31</sup> On les dénomme aussi matrices de dégâts. Elles sont pour l'essentiel d'origine californienne et japonaise et sont utilisées pour l'élaboration de scénarios sismiques (Châtelain *et al.*, 1994).



SOLLICITATIONS		ELEMENTS EXPOSES																						
NATURE	I	BATIS				RESEAUX								SURFA NATUR			SOUS-ELEMENTS			PERSONNES				
		B1	B2	B3	B4	R1	R2	C	L1	L2	L3	VF	Ca	T	CE	PE	OA	OV	M,V	Pr	Pvf	Pt		
PHENOMENES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN	DEPLACEMENTS	DL	VL1	0,3	0,2	0,1		0,1	0,05	0,4	0,05	0,1	0,01	0,3	0,1	0			0	0	0		0	
			VL2	0,4	0,3	0,2		0,4	0,3	0,6	0,3	0,2	0,1	0,5	0,3	0,3			0	0	0		0	
			VL3	0,6	0,5	0,4	0,3	0,5	0,4	0,8	0,5	0,4	0,2	0,7	0,7	0,4			0	1	0		I-II	
			VL4	1	0,9	0,8	0,7	0,8	1	0,7	0,8	0,5	0,8	0,9	0,7				1	1	1		II-III	
			VL5	1				1	1	1	0,8	1	1	0,9					II	II	II		IV-V	III-IV
			CD1	I-II				I-II	II	1	II	II	0						0	0	0		I-II	
			CD2	III-IV				II-III	II-III	I-II	III	II-III	II						1	1	I-II		II-III	
			CD3	V				II-IV	III	II	IV	III	III						II	II	II		IV-V	III-IV
			PSR1	II		I																		
			PSR2	III		II																		
			PSR3	IV-V																				
			PSR4	V																				
	DV	DH1	0,3	0,2	0,1	0,05	0,3	0,4	0,1	0,05	0,3	0,2	0,3					0	0	0		0		
		DH2	0,6	0,5	0,4	0,3	0,4	0,6	0,2	0,1	0,6	0,4	0,6					0	0	0		0		
		DH3	0,7	0,6	0,5	0,4	0,8	0,8	0,5	0,4	0,3	0,8	0,8	0,8				1	1	I-II		III-IV		
		DH4	1	0,9			1	1	1	0,8	1	1	1					II	II	II		IV-V		
		VV1	0,1	0,05			0	0	0	0	0	0	0					0	0	0		0		
		VV2	0,2	0,1			0,3	0,2	0,5	0,01	0,05	0	0,3	0,2	0,05				0	0	0		0	
		VV3	0,3	0,2			0,5	0,4	0,6	0,1	0,2	0,1	0,4	0,3	0,1				0	0	0		0	
		VV4	0,4	0,3			0,6	0,5	0,7	0,3	0,6	0,2	0,5	0,4	0,5				0	0	0		0	
		VV5	0,6	0,5	0,4		0,8	0,7	0,8	0,6	0,8	0,5	0,6	0,6	0,7				0	1	1		0	
		VV6	0,9	0,8			0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,6	0,8	0,8	0,8				1	II	I-II		I-II-III	
		VV7	1				1	1	1	1	1	1	1					II	II	II		IV-V		
		MDU 1	0,2	0,05	0,01																			
		MDU 2	0,4	0,2	0,1	0,05																		
		MDU 3	0,5	0,4	0,2	0,1																		
		MDU 4	0,6	0,5	0,3	0,2																		
		PRESSIONS	PL	SC1	I-II-III																			
SC2	III-IV																							
SC3	V																							
IM	ECV1		0,1	0,05			0,05		0		0	0	0					0	0	0		I-II	III	
	ECV2		0,6	0,5	0,4	0,3	0,1		0,5		0,2	0,3	0,2					II	I	I-II		IV-V	V	
	ECV3		0,9	0,8	0,7	0,6	0,5		0,8		0,6	0,7	0,7					II	II	I-II		V		
	ECV4		1	0,9	0,8		0,8		1		0,9	1	0,8					II	II	II		V		
ES	D1		V		IV				II		I-II							II	II	II		IV-V	V	
	D2		IV-III		III-II				II-I		1							1	1	I-II		III-IV	IV	
	D3		II		II-I				0-1		0							0	0	II		II-III	III	
ACCUMULATIONS	AC	H1	0,05		0,01	0,3		0		0	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0	1	0		I-II			
		H2	0,1		0,05	0,5		0,2		0,1	0,3	0,2	0,3	0,2	0,3		II	II	I		II-III-IV			
		H3	1		0,5	0,7		0,8		0,8	0,7	0,4	0,8	0,5	0,7		II	II	II		V			
		H4	1		1		1		1	1	1	1	1	1	1		II	II	II		V			
ABLATIONS	AB	PA1	0,2	0,1	0,05		0,1	0,4	0,3	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1				I						
		PA2	1	0,8	0,6		0,4	0,5	0,4	0,5	0,3	0,4	0,6	0,3				II						
		PA3	1				0,8	0,6	0,8	0,7	0,6	0,8	0,8					II						
		PA4	1				1	1	1	1	1	1	1	1				II						

Tableau III.8 - Matrice d'endommagement structurel (DS) et corporel (DC) des éléments situés hors bâti (cf. légende tab. III.9).

<p><b>MODES ET NIVEAUX D'ENDOMMAGEMENT</b> (se reporter au tableau III.5)</p> <p>en chiffres arabes : taux d'endommagement (valeurs comprises entre 0 et 1)  en chiffres romains : intensité des dommages</p>	
<p><b>NATURE DES SOLlicitATIONS</b></p> <p>DL : déplacements à composante latérale (horizontale) dominante  DV : déplacements à composante verticale dominante  PL : poussées latérales continues  IM : effets d'impact  ES : effets de souffle  AC : accumulations  AB : ablations</p>	
<p><b>CRITERES D'INTENSITE I</b> (se reporter au tableau III.1)</p> <p>V : vitesse des déplacements (avec VL pour latéraux et VV pour verticaux)  CD : importance du champ des déformations de surface  PSR : profondeur de la surface de rupture de la masse en mouvement  DH : amplitude des déplacements verticaux instantanés  MDU : mouvement différentiel unitaire au contact de la structure exposée  ECv : énergie cinétique correspondant à un volume en mouvement donné  SC : géométrie de la surface de contact entre masse en mouvement et structure exposée  (avec SF : surface du front de la masse en mouvement, SE : surface exposée de la structure)  D : distance entre élément exposé et source de la masse génératrice de l'effet de souffle  (supposé apparaître pour EC &gt; 1 MJ et se propager au delà de 100 m)  H : hauteur des accumulations  PA : profondeur d'ablation du sol</p>	
<p><b>NATURE DES ELEMENTS EXPOSES</b></p>	
BATIS :	<p>B1 : constructions vétustes ou de qualité médiocre, sans fondations et sans liaisons structurelles, le plus souvent construites hors normes traditionnelles (granges, appentis, certaines résidences secondaires). Cette catégorie peut être étendue aux constructions du type suivant lorsque celles-ci ont fait l'objet de dégradations structurelles non consolidées.</p> <p>B2 : constructions traditionnelles, en maçonnerie, ou préfabriquées individuelles légères, sans ossature armée. Généralement des habitations ou des immeubles collectifs anciens.</p> <p>B3 : constructions de type habitat individuel de bonne qualité, réalisées en matériaux traditionnels, en béton ou en composants préfabriqués et pourvues d'une ossature armée.</p> <p>B4 : constructions de type habitat collectif d'au moins trois niveaux, de bonne qualité, réalisées en matériaux traditionnels, en béton ou en composants préfabriqués et pourvues d'une ossature armée.</p>
RESEAUX :	<p>R1 : routes de viabilité médiocre (1 voie à deux voies étroites)  R2 : routes de bonne à très bonne viabilité (2 voies larges à 4 voies)  C : conduites souterraines  L1 : lignes traditionnelles (sur poteaux simples) aériennes  L2 : lignes traditionnelles souterraines  L3 : lignes aériennes montées sur armatures renforcées (haute tension)  VF : voies ferrées traditionnelles  Ca : canaux aériens</p>
<p><b>SURFACES</b></p>	
NATURELLES :	<p>T : terrains naturels et sols associés (foncier)  CE : cours d'eau naturels  PE : plans d'eau naturels ou artificiels</p>
<p><b>SOUS-</b></p>	
ELEMENTS :	<p>OA : occupations animales sauvages (faune) ou d'élevage (cheptel vif)  OV : occupations végétales naturelles (flore) ou cultivées (cultures)  M,V : biens mobiliers et véhicules</p>
PERSONNES :	<p>Pr : personnes situées sur le réseau routier  Pvf : personnes situées sur le réseau ferroviaire  Pt : personnes à l'air libre situées sur terrains naturels</p>

Tableau III.9 - Légende de la matrice d'endommagement structurel et corporel des éléments situés hors bâti (cf. tab. III.8).

La structuration du concept de vulnérabilité telle qu'elle vient d'être menée dans ce travail prend toute sa forme et son originalité à travers l'élaboration de ces matrices. Leur remplissage repose une fois de plus sur les enseignements tirés des constats d'endommagement, mais également sur des analyses bibliographiques (**ann. I**), et des discussions avec différents experts du risque mouvements de terrain. Les valeurs de taux d'endommagement mentionnées n'en demeurent qu'indicatives et à utiliser avec précautions. Ce remplissage n'est pour l'instant que partiel mais il est censé se compléter au fur et à mesure que le niveau de connaissances tiré des analyses en retour s'enrichira.

De telles matrices pourront constituer à terme le coeur d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrain. Néanmoins, on peut d'ores et déjà en proposer trois types correspondant aux trois grandes familles de modes d'endommagement cités précédemment. Elles permettent de quantifier la vulnérabilité et sont conditionnées par les fonctions d'endommagement décrites dans le §. 2.3.2.4. du **chapitre I**.

#### *2.4.2. Matrice d'endommagement structurel*

Elle est représentative de l'interaction physique entre les phénomènes de mouvements de terrain et les biens et personnes (situées hors bâtiments) qui y sont exposés (**tab. III.8**).

Les phénomènes y sont représentés par leurs principales sollicitations et les valeurs de quelques uns de leurs critères d'intensité (*cf.* **tab. III.1** et **III.3**). Contrairement aux matrices suivantes elle est donc spécifique aux mouvements de terrain.

Les familles d'éléments exposés sélectionnées sont celles définies dans le **tableau III.5**. Cependant, des sous-types d'éléments structurels de la famille du bâti, des routes et des lignes ont également été pris en compte de manière à affiner la quantification de la vulnérabilité. Ils se distinguent par leur comportement différentiel aux sollicitations générées par les mouvements de terrain (*cf.* **tab. III.9**). Les sous-types de bâti sélectionnés sont ceux retenus officiellement par la D.R.M. (1990).

Les personnes prises en compte dans cette matrice sont celles supposées se trouver à l'extérieur des bâtiments, autrement dit celles les plus exposées directement aux phénomènes. Elles peuvent se trouver à l'air libre ou bien sur les différents réseaux (routes, voies ferrées). Même remarque pour les biens mobiles appartenant à la catégorie des sous-éléments (cheptel, mobilier, véhicules, stocks, récoltes).

Pour chaque catégorie d'élément exposé, les taux d'endommagement précisés (en chiffres arabes) renvoient directement au **tableau III.5** pour leurs correspondances en modes d'endommagement. Ces derniers peuvent être remplacés par le niveau d'intensité des dommages correspondants (en chiffres romains) quand l'interaction est plus difficilement quantifiable.

Pour chaque catégorie d'élément exposé, il existe une multitude de critères de résistance vis à vis de la sollicitation apportée. On se contente d'en exposer sommairement quelques uns propres au bâti (**tab. III.10**). De telles analyses de comportement différentiel des structures relèvent de disciplines propres à la géotechnique ou la mécanique des constructions et il va de soi qu'on ne les développera pas ici.

Types de sollicitations	Modes d'endommagement	Critères de résistance structurelle
Déplacements latéraux	Transport Déformations Affaissement	Profondeur des fondations Cohésion d'ensemble
Déplacements verticaux	Déchaussement Déformations Affaissement	Cohésion d'ensemble
Poussées latérales	Déformations Ecrasement	Hauteur des structures Profondeur des fondations Renforcements
Impacts	Déformations Ecrasement	Renforcements
Effets de souffle	Déformations Ecrasement	Hauteur des structures Renforcements
Accumulations	Comblement intérieur Ensevelissement	Etanchéité Hauteur de l'édifice
Ablations	Affouillement Affaissement	Profondeur des fondations

Tableau III.10 - Critères de résistance structurelle du bâti vis à vis des principales sollicitations mouvements de terrain.

### 2.4.3. Matrice d'endommagement corporel

Comme on vient de le voir, la quantification des préjudices corporels propres aux individus non-protégés par des structures du type bâti est traitée dans la matrice d'endommagement structurel. Par contre, les personnes occupant des bâtiments soumis à l'action de mouvements de terrain vont subir des dommages faibles tant que l'édifice qui les abrite reste stable, puis des dommages plus importants induits par cet édifice au delà d'un seuil d'endommagement donné de sa structure. Cet aspect des préjudices corporels induits par l'endommagement des structures environnantes est traité dans cette nouvelle matrice (tab. III.11).

IDCb et IDSb			INTENSITES DES DOMMAGES STRUCTURELS AU BATI (IDS)				
			I	II	III	IV	V
ELEMENTS EXPOSES DANS BATIMENTS (b)	PERSONNES	Pb	0-I-II	I-II	I-II-III	III-IV-V	IV-V
	SOUS-ELEMENTS	OAb	0	0	0	I	I
		(M.V)b	0	0	0-I	I-II	II
		(S.R)b	0	0	0	I	I
ELEMENTS EXPOSES			ID : INTENSITE D'ENDOMMAGEMENT (c.f tab. III.5)				
Pb : personnes OAb : occupation animale (cheptel vif) (M.V)b : mobilier et véhicules (S.R)b : stocks divers et récoltes engrangées							

Tableau III.11 - Matrice d'endommagement corporel (IDCb) et structurel (IDSb) des éléments situés sous bâti.

Cette matrice peut également servir à caractériser l'endommagement des sous-éléments exposés, c'est-à-dire également contenus dans les bâtiments, tels que les animaux, les mobiliers, les véhicules, les stocks et les récoltes engrangées.

L'effet potentiel des dommages structurels sur les habitants a déjà fait l'objet d'analyses particulières dans le domaine du risque sismique en tant que facteur de vulnérabilité humaine (cf. Bastet *et al.*, 1985 et D'Ercole *et al.*, 1993).

En risque mouvements de terrain, ces considérations ont un sens si on suppose que l'on a à faire à la catégorie des mouvements rapides et que les dommages inhérents sont donc à effet immédiat sur les personnes exposées, favorisant ainsi l'effet de surprise, comme dans le cas d'un séisme. On peut ainsi mettre en relation directe les dommages structurels et corporels pour les différentes catégories de bâti. L'effet ou non de désolidarisation des parties de l'édifice et notamment les effondrements de planchers (pour les habitations à plusieurs niveaux) constitue le principal critère retenu pour caractériser ce facteur de sensibilité extrinsèque des personnes (cf. §. 2.3.2.4, chap. I).

Dans toute perspective d'application, il serait judicieux d'ouvrir une telle matrice à d'autres critères représentatifs de la sensibilité cette fois-ci intrinsèque des individus (facteurs perceptifs, cognitifs, de mobilité). On pourrait tenter de les appréhender notamment par le biais de questionnaires d'enquête et de les quantifier à l'aide de quelques outils statistiques simples tels que les analyses factorielles (cf. D'Ercole, 1991 et Chardon, en préparation). Cela reviendrait, concrètement, à élargir la typologie des personnes en y intégrant des comportements potentiels plus variés vis à vis du danger. De la même manière, on pourrait également prendre en compte d'autres critères de sensibilité extrinsèque autres que les seuls facteurs de protection apportée par les structures, tels que les facteurs fonctionnels, conjoncturels et techniques.

#### 2.4.4. Matrice d'endommagement fonctionnel

Conformément à la description qui en a été faite au §. 2.3.1 et 2.3.2.4 du chapitre I, l'intensité des perturbations fonctionnelles (ou dysfonctionnements) dépend d'une série de facteurs (socio-économiques, institutionnels, humains, conjoncturels, fonctionnels et techniques) difficiles à quantifier. Certes, si la description de ces facteurs constitue une première étape vers l'évaluation, on ne peut prétendre arriver à ce jour à modéliser ces perturbations fonctionnelles de manière fiable. Pour ce qui est de l'influence du facteur fonctionnel, il existe néanmoins quelques méthodes analytiques (matrices de Leontiev) permettant de traduire les liaisons économiques entre différentes branches d'activité perturbées (Cochrane, 1974) et leurs effets à long terme (Kuribayashi *et al.*, 1982).

Cependant, ces facteurs ne sont pas forcément spécifiques à l'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrain. En effet, pour l'essentiel, ils peuvent s'appliquer à d'autres natures de phénomènes dommageables (séismes, inondations, volcans, etc.). Seuls les facteurs techniques et humains apportent vraiment leur spécificité mouvements de terrain en prenant en compte l'endommagement potentiel des biens et infrastructures diverses assurant traditionnellement cette fonction ; endommagement qui vient d'être quantifié précédemment (tab. III.8 et III.11).

La matrice d'endommagement fonctionnel proposée ici repose donc sur ces seuls facteurs techniques et humains, aussi réducteurs soient-ils. On part du principe que correspond aux différents éléments exposés (biens et personnes) définis jusqu'à présent, une série de fonctions diverses (tab. III.12). Par exemple, une activité commerciale repose sur des éléments aussi variés que les réseaux, indispensables aux échanges économiques (importations, exportations, flux de clientèle) et les moyens de production représentés par les outils de travail (mobiliers et immobiliers), les stocks et les employés.

		PRINCIPALES FONCTIONS ASSOCIEES											
		ECONOMIQUES				T-C-D	SOCIALES			CULT.	S-S-S	ESTH.	ENVI.
		COMM.	IN-AR.	TO-LO.	AGRI.		EDUC.	LOGE.	RELIG.				
GRANDES FAMILLES D'ELEMENTS EXPOSES	BATIMENTS												
	RESEAUX												
		ROUTES											
		CONDUITES											
		LIGNES											
		VOIES FERRES											
		CANAUX											
		SURFACES											
		TERRAINS											
		NATURELLES											
		COURS D'EAU											
		PLANS D'EAU											
		SOUS-ELEMENTS											
		FAUNE											
		CHEPTEL											
		FLORE											
		CULTURES											
		MOBILIERS DOMESTIQUES											
		MOBILIERS INDUSTRIELS											
		VEHICULES											
	STOCKS												
	RECOLTES												
	PERSONNES												

COMM. : commerciale  
 IN-AR. : industrielle et artisanale  
 TO-LO. : touristique et de loisirs  
 AGRI. : agricole  
 T.C.D. : de transport, de communication, de distribution  
 EDUC. : éducative

LOGE. : de logement  
 RELIG. : religieuse  
 CULT. : culturelle  
 S.S.S. : de secours, de santé, de sécurité  
 ESTH. : esthétique  
 ENVI. : environnementale

: fonction primaire  
 : fonction secondaire  
 : fonction absente ou indirecte

Tableau III.12 - Exemples de fonctions dominantes associées aux principaux éléments exposés.

Ainsi, on peut tenter de définir le niveau de perturbation potentielle d'une fonction, économique ou de toute autre nature (éducative, sociale, religieuse, culturelle, esthétique, environnementale, etc.), en fonction du niveau d'endommagement des biens et personnes qui la supportent. On obtient ainsi la matrice d'endommagement fonctionnel (tab. III.13). Par exemple, les niveaux de perturbation sur la fonction transport-communication-distribution associée à l'endommagement du réseau routier, ont été définis en références aux analyses menées dans la région du Diois, suite aux intempéries de janvier 1994 (cf. §. 3.4.3, chap. II).

#### 2.4.5. Matrices complémentaires

Compte tenu de l'importance des phénomènes hydrauliques souvent induits par les mouvements de terrain (cf. §. 3.4, chap. I), il apparaît important de pouvoir quantifier les dommages structurels et corporels spécifiques à cette autre type de phénomène. Le développement des matrices correspondantes ne rentre pas dans le cadre de ce travail, mais il peut largement s'inspirer de l'analyse en retour menée sur le site de la Josefina et qui a conduit à l'élaboration d'une matrice d'endommagement intégrant cet aspect hydraulique (§. 2.6.3, chap. II).

Les fonctions d'endommagement structurel propres à ce phénomène sont beaucoup plus faciles à caractériser que les précédentes. L'intensité de la sollicitation hydraulique y est essentiellement mesurée par des critères de vitesse d'écoulement, de hauteur d'eau et de durée de submersion, et certains auteurs (D.R.M., 1985a et Caude, 1987 et 1988) en proposent une formulation analytique relativement opérationnelle.

IDF	INTENSITÉS D'ENDOMMAGEMENT															CORPOREL										
	STRUCTUREL															DC										
	IDSB			IDSr			IDSc			IDSVf			IDSea			IDSI			IDSm,v							
	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V	
F-eco	0-I	I-II	II	III	III																					
F-log	0-I	I	II	II	II																					
F-emp																										
F-tcd						0-I	II-III	IV-V	V	III-IV	IV-V	IV-V	IV-V	IV-V	IV-V	IV-V	IV-V	IV-V	IV-V	IV-V	IV-V	IV-V	IV-V	IV-V	IV-V	IV-V
F-cst																										

<p><b>FONCTIONS</b></p> <p>F-eco : fonction économique (à associer aux éléments assurant une activité économique)</p> <p>F-emp : fonction sociale de type emploi (à associer aux bâtiments à vocation commerciale, artisanale ou industrielle)</p> <p>F-log : fonction sociale de type logement (à associer aux bâtiments de type habitation)</p> <p>F-tcd : fonction communication-transport-distributeur (à associer aux réseaux)</p> <p>F-cst : fonction esthétique (à associer aux éléments de type surfaces naturelles)</p>	<p><b>FONCTIONS</b></p> <p>ID : INTENSITÉS D'ENDOMMAGEMENT (c.f. tab. III.5 pour correspondances en modes et taux d'endommagement)</p> <p>IDSb : dommages structurels au bâti</p> <p>IDSr : dommages structurels aux routes</p> <p>IDSVf : dommages structurels aux voies ferrées</p> <p>IDSea : dommages structurels aux canaux</p> <p>IDSI : dommages structurels aux terrains</p> <p>IDSm,v : dommages structurels aux mobiliers de type outils de production et véhicules</p> <p>IDC : dommages corporels</p>
--	---

Tableau III.13 - Matrice d'endommagement fonctionnel (IDF).

### 3. Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité et du risque

#### 3.1. Présentation

Il existe un certain nombre de méthodes quantitatives ou semi-quantitatives d'évaluation de la vulnérabilité d'une communauté exposée à un ou plusieurs phénomènes naturels. Mais ces développements concernent rarement les mouvements de terrain, du moins dans leur globalité et sont surtout appliqués aux phénomènes sismiques (Zha Xiao-Gan, 1986 ; Bastet *et al.*, 1985 ; Châtelain *et al.*, 1994 ; Jaramillo & Ortega, 1993 et Durville & Méneroud, 1987), volcaniques (Suarez, 1992 et Lavigne & Thouret, 1994) ou d'inondation d'origine fluviale (Consuegra Zammit, 1992 et D.R.M., 1990) ou bien marine (Penning-Rowsell & Chatterton, 1977 et B.C.E.O.M., 1973). Certaines approches plus générales peuvent s'appliquer à plusieurs phénomènes (Bocquet & Charre, 1984 ; Chardon, 1994 et Kienholz, 1992 par exemple).

Néanmoins certains types particuliers de mouvements de terrain, ont déjà fait l'objet d'applications en matière d'évaluation de la vulnérabilité. On peut citer par exemple les travaux de Mora (1992) pour ce qui est des coulées de boue à Cartago au Costa-Rica; les travaux de la Délégation aux Risques Majeurs, du Bureau Central d'Etudes pour les Equipements d'Outre Mer et du Flood Hazard Research Centre pour ce qui est de l'érosion littorale en France et en Angleterre (*in* Simon, 1988 et D.R.M., 1991) ; les travaux de Hulsbergem & Carree (1987) pour ce qui est des affaissements de terrain en Hollande ou bien ceux de la Sageri (1990) menés sur le site de Séchilienne en France. Cependant, ces applications sont la plupart du temps spécifiques au cas étudié, et sont développées sans souci de transposition ou de reproductibilité.

La seule proposition méthodologique d'évaluation quantitative de la vulnérabilité reproductible prenant en compte l'ensemble des mouvements de terrain émane de la Délégation aux Risques Majeurs (D.R.M., 1985a et 1990). Elle a été développée dans le cadre des études préliminaires à la cartographie réglementaire des risques naturels majeurs en France. Malgré son intérêt et bien qu'introduisant la notion de matrice d'endommagement, cette méthode repose sur une échelle d'analyse globalement trop petite pour pouvoir intégrer toute la spécificité des mouvements de terrain en matière d'endommagement. Elle repose en effet sur un découpage géographique à l'échelle du plan d'occupation des sols (zones homogènes types) qui est mal adapté à la quantification de l'interaction entre phénomènes et éléments exposés tel qu'on a pu la caractériser dans le paragraphe précédent.

Aussi, propose t-on ici une démarche d'évaluation opérationnelle de la vulnérabilité inspiré de cette précédente méthode, mais qui tente de la perfectionner en introduisant les notions et résultats nouveaux présentés dans ce chapitre. Cette nouvelle approche repose sur un découpage spatial du territoire dont la résolution descend à l'échelle de l'élément exposé. Elle intègre les notions fondamentales d'éléments exposés, de zones uniformément sollicitées et de matrices d'endommagement définis précédemment.

#### 3.2. Principe de la méthode

##### 3.2.1. Préparation des données

##### 3.2.1.1. Découpage du territoire

Cette méthode privilégie l'attribution spatiale des données de base. Ceci répond à un souci de représentation cartographique des résultats et à des perspectives futures d'automatisation qui doivent se traduire notamment par une compatibilité avec des outils informatiques du type S.I.G..

Ainsi, l'unité élémentaire du découpage géographique retenu pour l'évaluation est celle de la **zone de sollicitation phénoménologique d'intensité donnée** (zone **SI**). Concrètement, cela revient à traduire les différents phénomènes de mouvements de terrain considérés, par les types de sollicitations qu'ils



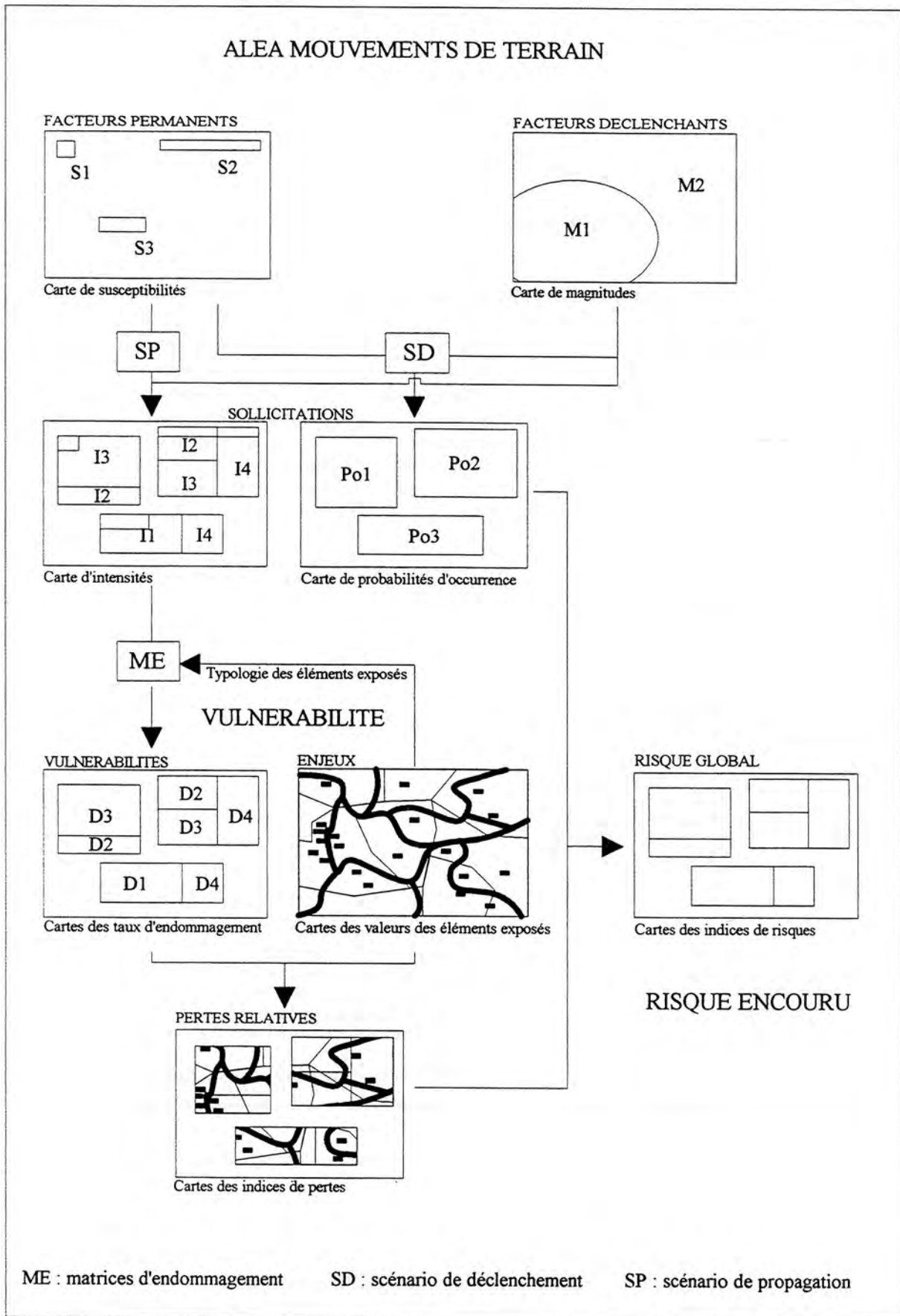


Figure III.12 - Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité et du risque : préparation des données.

sont susceptibles de générer, puis de les quantifier en terme d'intensité destructrice sur la base des critères définis précédemment (§. 2.2, chap. III). Cette étape constitue l'analyse de la composante spatiale de l'aléa mouvements de terrain à proprement parler, puisqu'elle repose sur l'analyse des facteurs dits permanents (§. 2.2.2.1, chap. I). Elle nécessite de recourir à des scénarios de propagation et d'extension des phénomènes.

3.2.1.2. Nature des attributs

Sur la base du découpage ainsi défini, on affecte à chaque zone SI trois types d'attributs (fig. III.12).

- Les premiers attributs correspondent au **taux d'endommagement** des différents types d'éléments exposés représentés sur la zone SI étudiée. D'une valeur comprise entre 0 et 1, ces taux sont directement donnés par les **matrices d'endommagement** proposées précédemment (§. 2.3.4, chap. III). On obtient ainsi un premier jeu de documents désignant les **vulnérabilités** à proprement parler, celles-ci étant donc de nature structurelle, corporelle et fonctionnelle. Ces documents techniques peuvent être destinés aux aménageurs, les renseignant ainsi sur le niveau des dommages potentiels auxquels ils s'exposent en cas d'implantations irraisonnées. Ils peuvent permettre d'aider à planifier l'aménagement du territoire et à adopter les règles de protection passives ou actives qui s'imposent pour réduire ces vulnérabilités.

ELEMENTS EXPOSES	VV	VU	VFemploi	VFlogement	VF transport-communication-distribution	VH
BATI	Prix de vente au m2 ou à l'unité	Chiffre d'affaire annuel	Nombre d'emplois	Nombre de lits	-	Nombre de personnes
RESEAU ROUTIER	Coût de construction à l'unité linéaire	Chiffre d'exploitation annuel	-	-	$VFt = \frac{1}{Nd+1} \cdot Tt$ $Tt + \sum_n \frac{Ndi \cdot Tdi}{Nd}$	-
RESEAU FERROVIAIRE						
RESEAU ELECTRIQUE						
RESEAU D'ADDITION D'EAU						
RESEAU TELEPHONIQUE						
TERRAIN AGRICOLE	Prix de vente à l'unité de surface	Prix de vente de la production à l'unité de surface/an				
PERSONNE	Prix d'une vie humaine	Valeur d'activité humaine annuelle				
STOCK, RECOLTE, VEHICULE	Prix de vente à l'unité					

Valeurs initiales unitaires :

VV: valeur vénale  
 VU : valeur d'usage  
 VF : valeur fonctionnelle  
 VH : valeur humaine

(1) t : section de réseau touché  
 d : section de réseau de déviation  
 Nd : nombre de déviations possibles  
 T : trafic journalier pour une route  
     : nombre de passagers journaliers pour une voie ferrée  
     : nombre d'abonnés pour un réseau téléphonique ou d'adduction d'eau  
     : puissance transportée pour une ligne électrique

Tableau III.14 - Types de valeurs unitaires initiales à attribuer aux différents éléments exposés.

- Les second attributs correspondent aux **enjeux**. On définit trois types d'enjeux : économiques (directs et indirects), humains et fonctionnels, suivant la nature des valeurs initiales unitaires Vi que l'on attribue aux différents éléments exposés représentés sur SI et recensés dans le **tableau III.5**. Pour une zone SI donnée, chaque type d'enjeux est donné par la somme des valeurs Vi correspondantes de ces éléments. Les enjeux économiques directs sont donnés par la somme des valeurs Vi **monétaires vénales** (valeurs marchandes), les enjeux économiques indirects par la somme des valeurs Vi **monétaires d'usage**, les enjeux humains

par la somme des valeurs **humaines** et les enjeux fonctionnels par la somme des valeurs **Vi fonctionnelles**. Le **tableau III.14** donne un aperçu des différents critères permettant de définir ces quatre types de valeurs initiales unitaires suivant la nature des éléments exposés auxquels elles s'appliquent.

Dans le cadre d'une application, ces différentes valeurs unitaires peuvent être récoltées avec plus ou moins de précision. On peut par exemple retenir des valeurs standards fournies par la bibliographie (cf. **ann. XV**) ou bien affiner celles-ci par des enquêtes de terrain. Tout dépend des objectifs recherchés.

On est amené à proposer une formulation originale d'appréciation de la valeur fonctionnelle (en l'occurrence la fonction de communication-transport-distribution) d'un réseau, quel qu'il soit (<sup>(1)</sup> **tab. III.14**). Cette valeur, exprimée de 0 à 1, s'applique à chaque section de réseau. Elle prend en compte la capacité de cette section (trafic journalier, etc.) et la possibilité ou non de la dévier en cas d'endommagement. Plus cette valeur sera proche de 1 et plus cette section de réseau sera vitale et difficilement substituable. L'importance de ces critères a pu être mise en évidence lors des investigations menées sur la région du Diois (§. 3.4.3, **chap. II**).

Pour ce qui est de la valeur vénale humaine, on retient une valeur moyenne du prix de la vie humaine correspondant au coût d'un décès donné dans le **tableau III.7**. Par contre la valeur d'usage ou d'activité annuelle d'une vie humaine, peut se chiffrer approximativement et en moyenne par 7 à 10 fois le P.I.B. par habitant et par an du pays concerné (Nations Unies, 1979).

- Les troisièmes attributs correspondent aux **probabilités d'occurrence** des sollicitations envisagées. La détermination de ces probabilités, d'une valeur comprise entre 0 et 1, nécessite de mettre en oeuvre des **scénarios et hypothèses de déclenchement** des sollicitations, prenant en compte la dimension spatiale de l'aléa (facteurs permanents) et sa dimension temporelle donnée par l'analyse de facteurs déclenchants, le plus souvent de nature sismique, hydraulique ou anthropique.

### 3.2.2. Calcul des indices de pertes et de risque

On peut exprimer le risque global encouru sur SI par un indice qui s'obtient en combinant les probabilités d'occurrence des sollicitations envisagées par des indices de pertes potentielles.

Ces indices de pertes sont au nombre de quatre et de valeur comprise entre 0 et 1. Ils correspondent à la quantification économique (coûts directs et indirects), humaine ou fonctionnelle des différents taux d'endommagement pronostiqués sur SI.

Pour une même zone SI donnée (**fig. III.13**) :

-les **pertes économiques directes** (ou pertes en capital) se calculent en multipliant les valeurs monétaires vénales par les taux d'endommagement structurel. On peut y ajouter le coût des préjudices corporels en multipliant les valeurs vénales correspondantes (prix de la vie humaine) par les taux de préjudices corporels.

-les **pertes économiques indirectes** (ou pertes en revenu) se calculent en multipliant les valeurs monétaires d'usage par les taux de dysfonctionnement économique. De la même façon que pour les pertes directes, les résultats peuvent aussi être exprimés en valeur absolue sous forme de coûts.

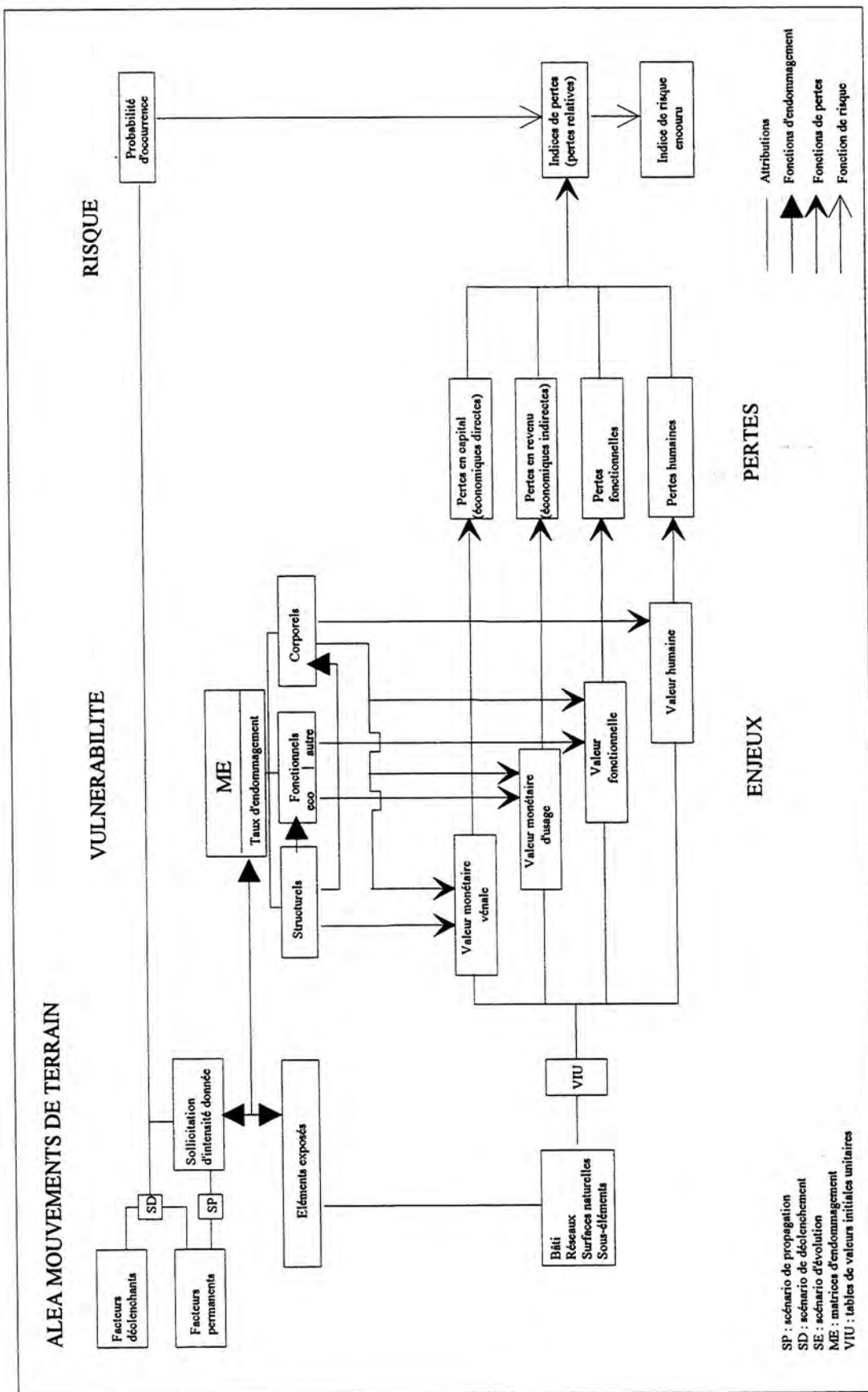


Figure III.13 - Méthodologie d'évaluation du risque et de la vulnérabilité : principe de calcul des indices de pertes et de risque.

-les **pertes fonctionnelles** diverses s'obtiennent en multipliant les valeurs fonctionnelles par les taux d'endommagement fonctionnel autres qu'économiques.

-les **pertes humaines** se calculent en multipliant les valeurs humaines (des effectifs) par les taux de préjudices corporel.

Chaque type de perte est obtenu en multipliant les taux d'endommagement D des différents éléments exposés de SI par les valeurs initiales unitaires  $V_i$  qui leurs correspondent. L'indice IP correspondant est ensuite obtenu en divisant la somme de ces produits par la valeur globale des enjeux représentés sur la zone SI. On obtient ainsi une valeur comprise entre 0 et 1. Soit :

$$IP = \frac{\sum_i D_i * V_i}{\sum_j V_j}$$

Les quatre indices obtenus permettent de comparer ces pertes entre elles pour différents scénarios. Ces indices peuvent être corrélés graphiquement pour former l'aire de gravité de la zone exposée (cf. **fig. I.7**). On peut également les représenter cartographiquement. On obtient alors une carte des pertes relatives qui prend une valeur d'outil d'aide à la perception du risque, permettant de sensibiliser décideurs et populations.

L'indice de risque global encouru IR, exprimé entre 0 et 1 s'appliquant à une zone SI donnée, s'obtient ensuite en multipliant la moyenne de ces indices de pertes par la probabilité d'occurrence de la sollicitation envisagée.

### 3.3. Applications fictives

#### 3.3.1. Présentation

Les applications qui suivent tentent d'illustrer les concepts et étapes méthodologiques développées précédemment. **Ces applications demeurent fictives**, bien que reposant sur des données réalistes. Leur intérêt est surtout méthodologique et les résultats n'ont aucune valeur opérationnelle compte tenu des développements complémentaires qu'il resterait à faire pour les rendre fiables, notamment sur le plan de l'évaluation de l'intensité des phénomènes.

La première application permet de perfectionner l'évaluation du processus d'impact lié à des chutes de blocs sur une commune de Savoie (France). La seconde met en oeuvre un calcul de pertes potentielles correspondant à deux scénarios de glissements de terrain sur un secteur de la région du Trièves en Isère (France).

#### 3.3.2. Perfectionnement de l'évaluation du processus d'impact : exemple de la commune d'Aigueblanche en Savoie (France)

##### 3.3.2.1. Présentation de l'étude

La Commune d'Aigueblanche, située dans le département de la Savoie (France), est périodiquement soumise à des chutes de blocs (événements de 1937 et 1977 entre autres) (Asté & Barfety, 1978). Aussi, a-t-il été décidé, dans le cadre d'une analyse en retour de P.E.R. (Asté *et al.*, 1993), d'y affiner la caractérisation de l'aléa chute de blocs à travers son potentiel d'endommagement, autrement dit son intensité.

Pour mener à bien cette analyse, on a utilisé un logiciel de "trajectographie" (GENCONE du B.R.G.M.) couplé à un système d'information géographique (ILWIS de I.T.C.).

### 3.3.2.2. Principe de l'évaluation

On a sélectionné assez arbitrairement des zones de départ potentiel de blocs sur les falaises surmontant la commune. Puis, à l'aide de GENCONE, on a dessiné l'enveloppe conique des trajectoires possibles pour un bloc qui se détacherait de l'escarpement. Une telle trajectoire se développe en effet sous une ligne d'énergie liant le point de départ et le point d'arrivée du bloc. Ce cône-enveloppe intercepte la topographie définie par un MNT suivant une ligne gauche qui peut être considérée comme la limite d'extension des trajectoires de blocs en provenance d'un point donné.

Toutes les trajectoires, observées ou calculées, se composent de deux parties principales :

- une partie amont où le bloc se déplace en général par rebonds successifs, avec, entre les rebonds, des hauteurs de vol variables. Dans cette partie, on peut théoriquement calculer les caractéristiques dynamiques du mouvement du bloc et ainsi déterminer en tout point son énergie cinétique, sa vitesse de rotation et sa vitesse de translation. Cela suffit à déterminer l'énergie dissipée en cas d'impact sur un élément.
- une partie aval où le bloc se déplace par roulement, glissement ou rebonds mais de faible hauteur. Là encore on peut déterminer les caractéristiques d'un impact. On peut même dimensionner un obstacle susceptible d'arrêter la course du bloc.

En dessous du cône-enveloppe précédemment évoqué, on peut définir un cône intermédiaire dont la génératrice relie le point de départ du bloc au point au delà duquel le bloc ne dépasse plus une hauteur de vol modeste (par exemple deux mètres), ce qui rend possible une parade par interception. En considérant cette zone intermédiaire, et de la même façon que ci-dessus, on peut déterminer une limite d'extension de la zone où le bloc n'est pas interceptable.

En répétant le traitement pour plusieurs zones de départ, on peut tracer l'enveloppe des deux limites ainsi considérées. La visualisation et l'édition de ces zones s'effectuent grâce à ILWIS par traitement graphique des résultats de GENCONE. On obtient deux types de zones (**fig. III.14**), chacune caractérisant un mode de propagation différent (zone des blocs "rebondissants" et zones des blocs "roulants").

Sur le plan du potentiel d'endommagement, les blocs rebondissants auront un pouvoir destructeur considérable, en terme d'énergie d'impact, beaucoup plus élevé que celui des blocs roulants. De plus, il y a moyen, sur la base d'hypothèses simples, d'affiner davantage la cartographie du potentiel d'endommagement des blocs roulants. Pour ce, on considère le rôle d'écran produit par les habitations comprises dans la zone des blocs roulants. Ce rôle étant supposé anéanti dans la zone des blocs "rebondissants" vu leur pouvoir destructeur.

On fait donc l'hypothèse que les seuls obstacles véritablement efficaces contre les blocs roulants sont, de par leurs dimensions et leur nature, les bâtiments. De plus, on suppose que le plus gros des blocs, en l'absence d'obstacle, se propagerait au mieux jusqu'au lit de la rivière (ce qui correspond aux observations de terrain) et qu'au pire il s'arrêterait après avoir rencontré et endommagé au moins trois bâtiments. On introduit donc un gradient de potentiel d'endommagement, défini par une, deux et trois rangées de bâtiments. Pour mettre en pratique ces règles, on a considéré des propagations suivant des profils parallèles conformes aux observations faites lors de l'événement de 1977, en identifiant la position du premier, puis du deuxième bâtiment sur chacun de ces profils. La **figure III.15** montre les enveloppes des points de rencontre avec le premier (bleu clair) et le second bâtiment (bleu foncé).

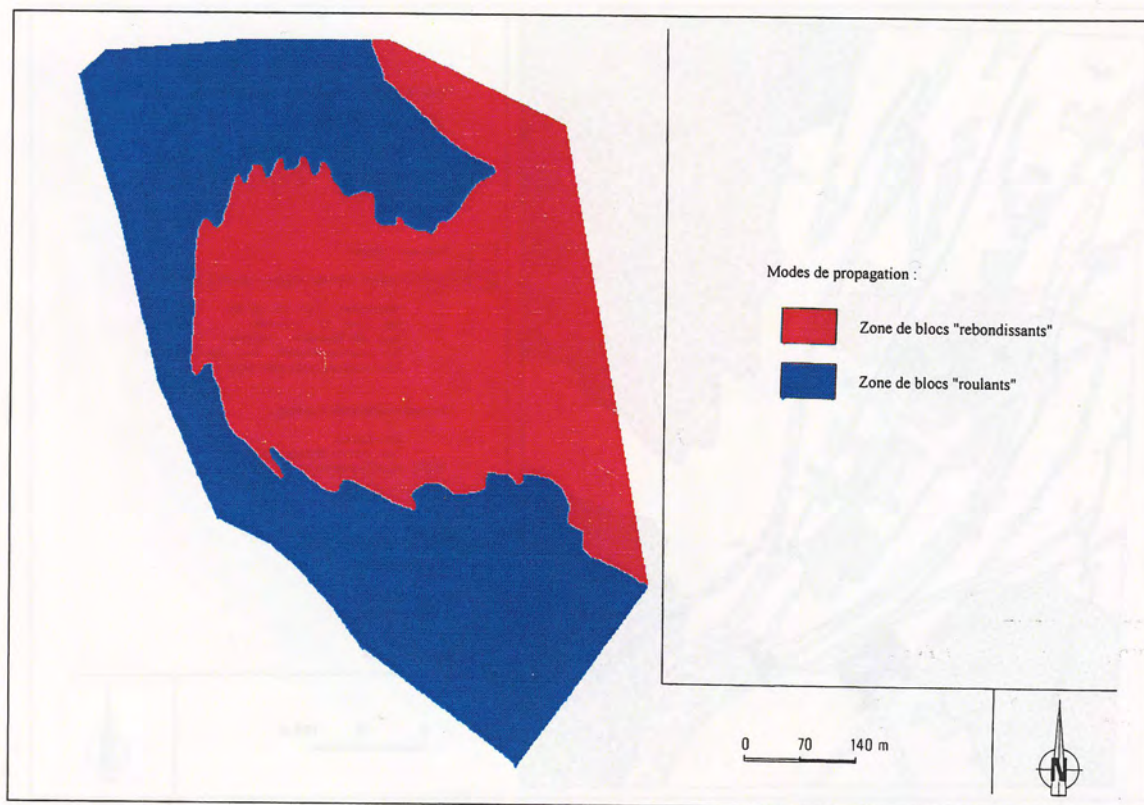


Figure III.14 - Commune d'Aigueblanche : zones de blocs "rebondissants" et "roulants".

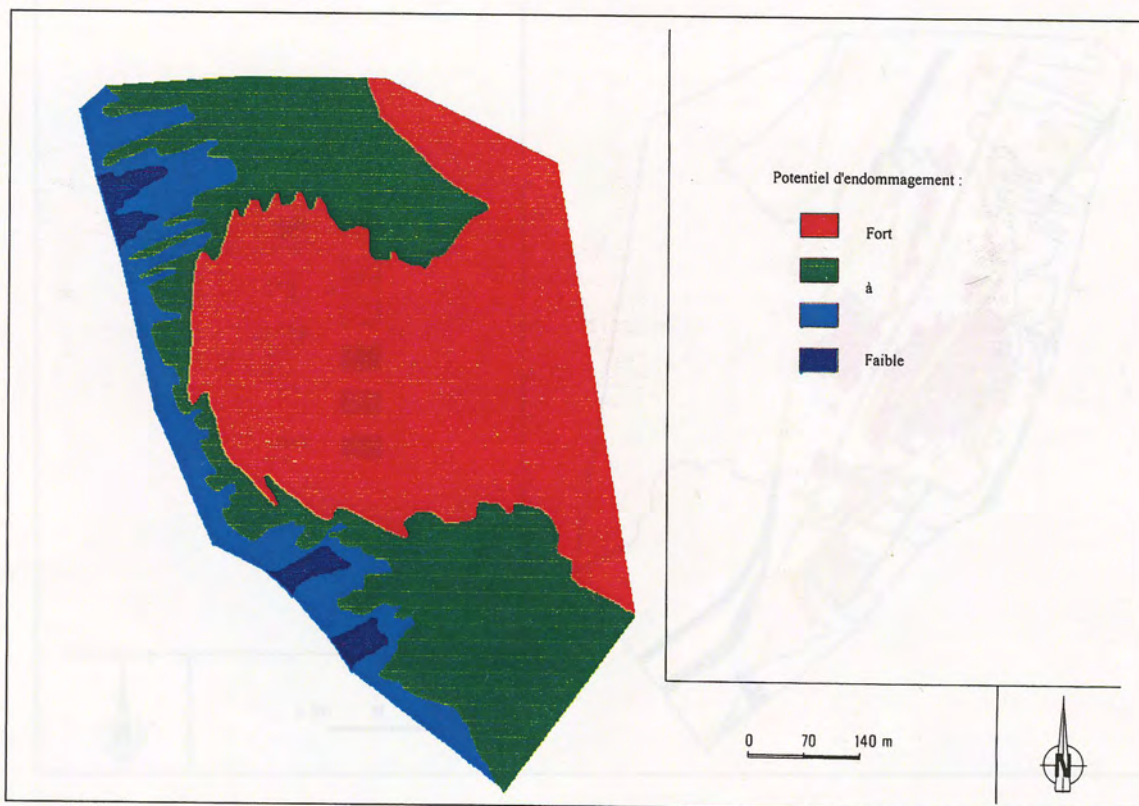


Figure III.15 - Commune d'Aigueblanche : cartographie du potentiel d'endommagement des blocs.

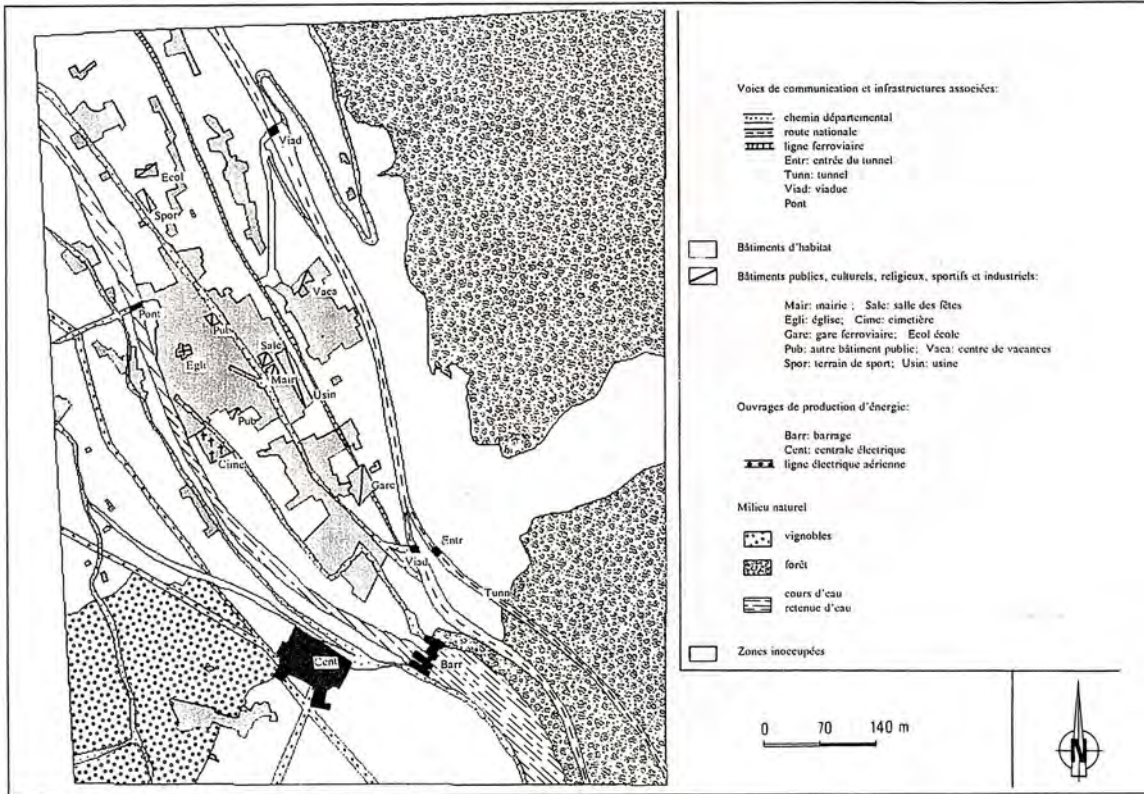


Figure III.16 - Commune d'Aigueblanche : éléments structurels exposés aux chutes de blocs.

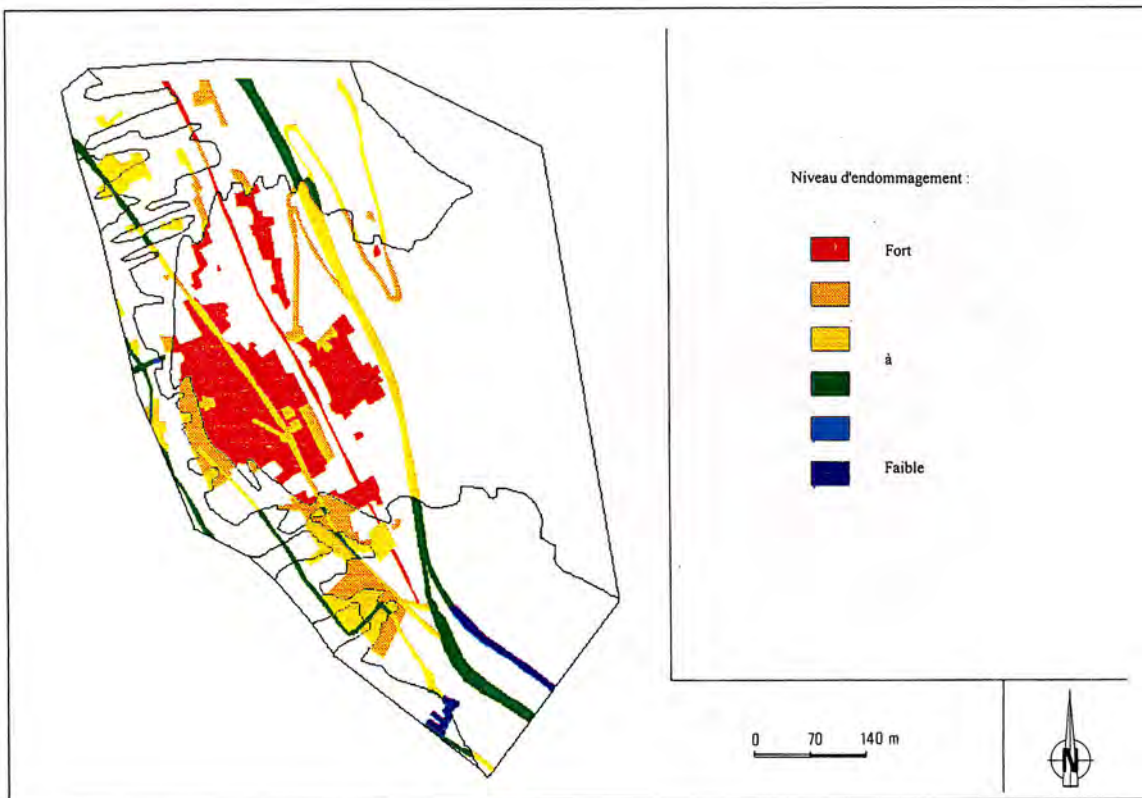


Figure III.17 - Commune d'Aigueblanche : niveau d'endommagement virtuel des différents éléments structurels exposés aux chutes de blocs.



Ces hypothèses pourraient être affinées en considérant les caractéristiques propres de chaque bloc, de chaque bâtiment et en connaissant mieux les lois qui régissent leurs interactions. On touche sur ce point à toute la difficulté de mise en pratique de notre connaissance, encore partielle, de la vulnérabilité structurelle vis à vis de processus d'impact.

Enfin, en combinant de manière automatique, grâce au S.I.G. ILWIS, ces enveloppes de différentiel de potentiel d'endommagement des blocs avec les principaux éléments structurels de la zone exposée (**fig. III.16**), on peut obtenir une image des différents niveaux d'endommagement virtuel de ces éléments (**fig. III.17**). Cela nécessite au préalable de faire des hypothèses sur la capacité de résistance des structures aux différentes énergies d'impact, autrement dit de bâtir une matrice d'endommagement spécifique. Mais de telles applications finales ont pour intérêt surtout de pouvoir comparer les résultats obtenus pour différents scénarios de propagation et d'apprécier ainsi l'opportunité de certaines mesures de protection en voyant si ces niveaux d'endommagement varient de manière significative ou non d'un scénario à l'autre.

### 3.3.3. Simulation de pertes liées à des glissements potentiels sur la région du Trièves en Isère (France)

#### 3.3.3.1. Présentation de l'étude

Le Trièves, région naturelle rurale située au sud du département de l'Isère (France) est affecté de nombreux glissements (*cf. ann. XVI*) dont l'origine s'explique par la présence prépondérante de dépôts quaternaires argileux (Besson, 198). Aussi, ce secteur a-t-il fait l'objet d'une analyse récente de l'aléa mouvements de terrain dans le cadre du projet RIVET (C.C.E., 1993). C'est sur la base de cette analyse qu'on a tenté de mener une évaluation des pertes potentielles qui seraient liées à l'activation de glissements suivant deux scénarios fictifs. L'évaluation en question demeure approximative, compte tenu des hypothèses avancées et de l'échelle d'analyse retenue (1/50 000<sup>e</sup>). Elle porte sur 9 communes représentant la partie nord du Trièves (**fig. III.18**) : Miribel-Lanchâtre, Avignonet, Saint-Guillaume, Saint-Paul-lès-Monestier, Sinard, Monestier-de-Clermont, Treffort, Roissard et Saint-Michel-lès-Portes. Son intérêt est surtout d'illustrer les étapes méthodologiques définies dans le §. 3.2 du **chapitre III**.

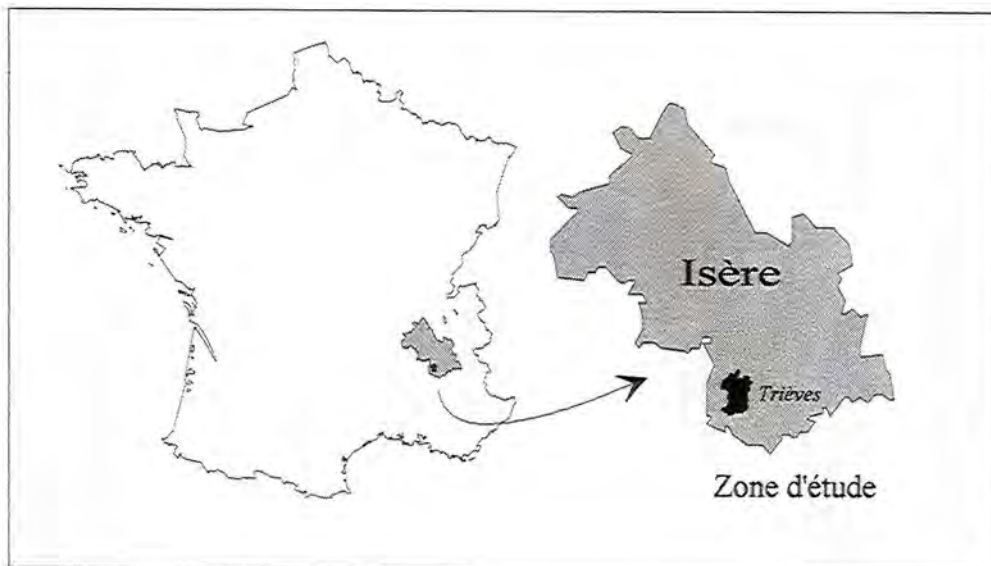


Figure III.18 - Situation de la zone d'étude du Trièves.

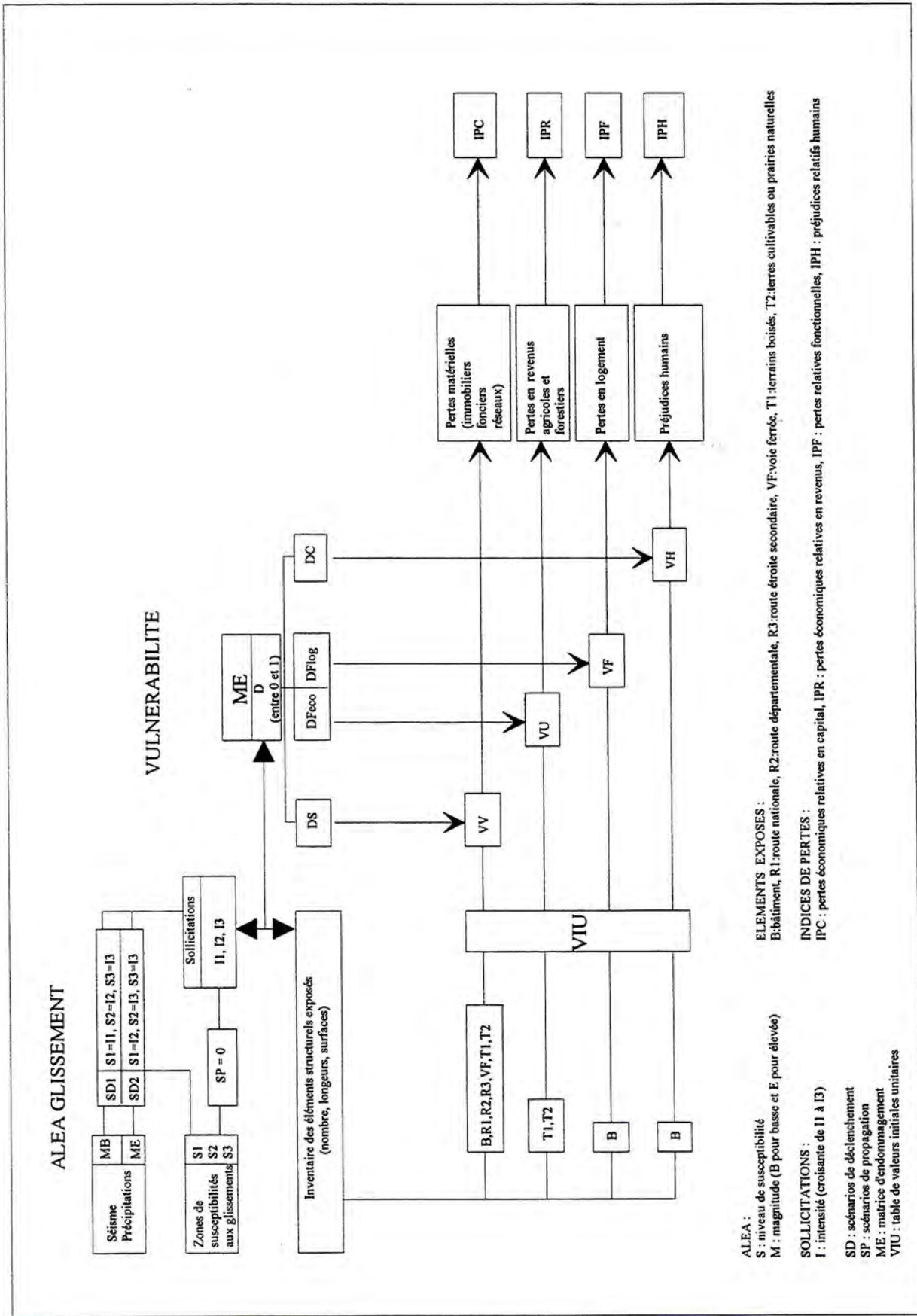


Figure III.19 - Simulation Trièves : étapes méthodologiques.

### 3.3.3.2. Scénarios adoptés

On a repris le zonage de l'aléa mouvements de terrain (dimension spatiale) établie par le BRGM à partir d'un certain nombre de facteurs permanents sur la région concernée (carte de susceptibilité aux glissements, approche par reconnaissance de forme, *in* C.C.E., 1993 partie IV). On a fait correspondre de manière assez arbitraire à chaque classe de susceptibilité existante supérieure à 0, une classe d'intensité du phénomène (de 1 à 3). On a négligé l'hypothèse de propagations éventuelles des glissements et donc mis en correspondance directe les zones de sollicitations d'intensité donnée (SI) avec les zones de susceptibilité (**ann. XVII.1**).

La traduction de l'aléa glissement en terme d'intensité destructrice est ici relativement simpliste. Néanmoins, il semble logique de penser qu'en cas de phénomène déclenchant (secousse sismique ou précipitations intenses) un terrain de susceptibilité donnée aux mouvements peut provoquer une sollicitation d'intensité proportionnelle à cette susceptibilité, bien que cette intensité soit aussi fonction de la magnitude du facteur déclenchant. En présence de glissements, cette intensité pourrait être mesurée par des vitesses de déplacements latéraux ou des allures de champs de déformations.

On a adopté pour l'application deux scénarios de déclenchement des glissements. Selon le premier scénario, à chaque classe de susceptibilité S correspond une classe d'intensité I différente (soit S1=I1, S2=I2 et S3=I3). Selon le deuxième scénario qui peut être obtenu par une magnitude de facteur déclenchant plus élevée, on fait l'hypothèse que S1=I2 et que S2, S3=I3.

### 3.3.3.3. Estimation des pertes

Sur la base du découpage ainsi défini et conformément aux étapes méthodologiques du §.3.2. du **chapitre III** (**fig. III.19**), on a affecté à chaque zone SI des taux d'endommagement arbitraires correspondant à sept catégories d'éléments exposés (**tab. III.15**) : habitations, routes, voies ferrées, terrains, habitants, fonction logement (associée aux habitations) et fonction économique agricole (associée aux terres agricoles).

I	TAUX D'ENDOMMAGEMENT						
	DS				DC	DF	
	B	R	VF	T	Pb	LOG	ECO-t
I1	0,1	0,1	0,3	0,1	0,001	0	0
I2	0,5	0,4	0,6	0,5	0,001	0,5	0
I3	0,9	1	1	1	1	1	1

INTENSITE I DES GLISSEMENTS (croissante de I1 à I3)

ELEMENTS EXPOSES :

B : bâtiments du type habitation  
R : routes  
VF : voie ferrée  
T : terrains  
Pb : personnes se trouvant dans les habitations  
Log : fonction sociale logement (associée aux habitations)  
ECO-t : fonction économique agricole (associée aux terres agricoles)

Tableau III.15 - Simulation Trièves : matrice d'endommagement retenue.

Pour ce qui est des enjeux représentés sur chaque zone SI, ils ont été recensés soit à partir de cartes topographiques au 1/50 000<sup>e</sup> pour les éléments structurels (**ann. XVII.2**), soit estimés à partir de données statistiques pour les personnes (I.N.S.E.E., 1988b). Les valeurs initiales unitaires retenues correspondent à des moyennes régionales ou nationales (**tab. III.16**).

		ELEMENTS EXPOSES						
		Bâtiment (B)	Route (R)			Voie ferrée (VF)	Terrains	
			Nationale (R1)	Départem. (R2)	Secondaire (R3)		boisés (T1)	labourables ou prairies (T2)
VALEURS UNITAIRES	VV	<i>Prix de vente à l'unité</i>	<i>Coût de construction au km</i>			<i>Prix de vente à l'hectare</i>		
		473 KF	9 MF	3,3 MF	1,7 MF	15 MF	7 KF    20 KF	
	VU						<i>Prix de vente de la production à l'hectare/an</i>	
							0,5 KF*	10 KF**
	VH	<i>Nombre de personnes par bâtiment</i>						
	3							
VFlog	<i>Nombre d'habitants par bâtiment</i>							
	3							

VV : valeur vénale ou marchande	* pour un rendement moyen annuel de 2 m <sup>3</sup> / hectare et un prix de vente moyen une fois débité de 250 F/m <sup>3</sup>
VU : valeur d'usage	
VH : valeur humaine	
VFlog : valeur fonctionnelle logement	** pour un rendement moyen de 11 T/ha et un prix de vente moyen de 1 000 F/T (fourrage de première coupe)

Tableau III.16 - Simulation Trièves : table de valeurs initiales unitaires retenues.

Pour chaque scénario (1 et 2), l'estimation des pertes potentielles (économiques, humaines et fonctionnelles) s'est faite conformément au principe général exposé au §. 2.2.2 du **chapitre III** à partir de la matrice d'endommagement et de la table de valeurs initiales unitaires. Les résultats ont été exprimés en valeur absolue (**ann. XVII.3**, **fig. III.20** et **tab. III.17**) et en valeur relative sous forme d'indices de pertes pour chaque commune. Le détail des pertes par commune et par type d'élément exposé figure en **annexe XVII.4**.

Une représentation de ces indices de pertes globales sous forme de surfaces de gravité pour chaque commune est présentée en **figure III.21**.

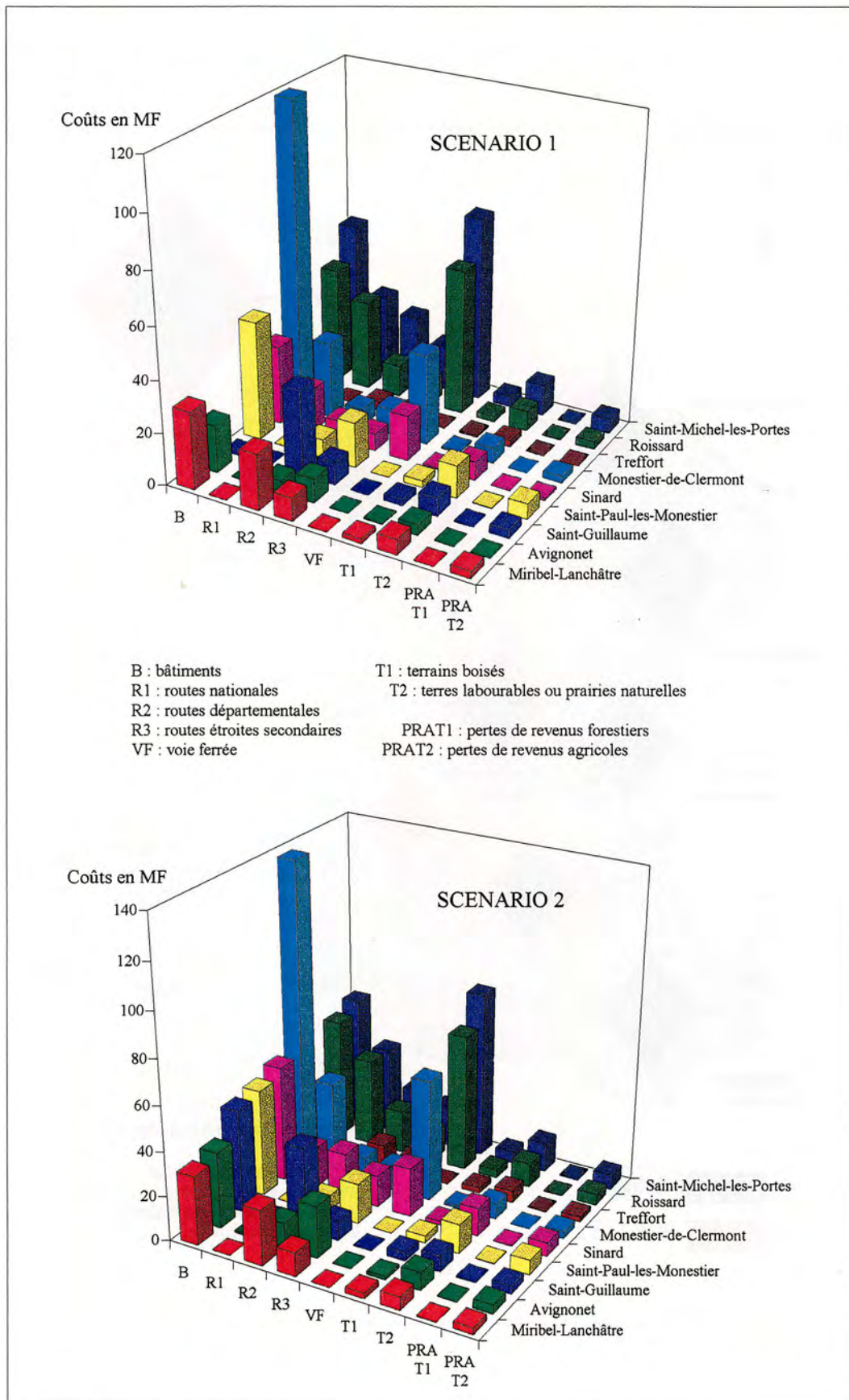


Figure III.20 - Simulation Trièves : détail des pertes économiques par commune en millions de francs.

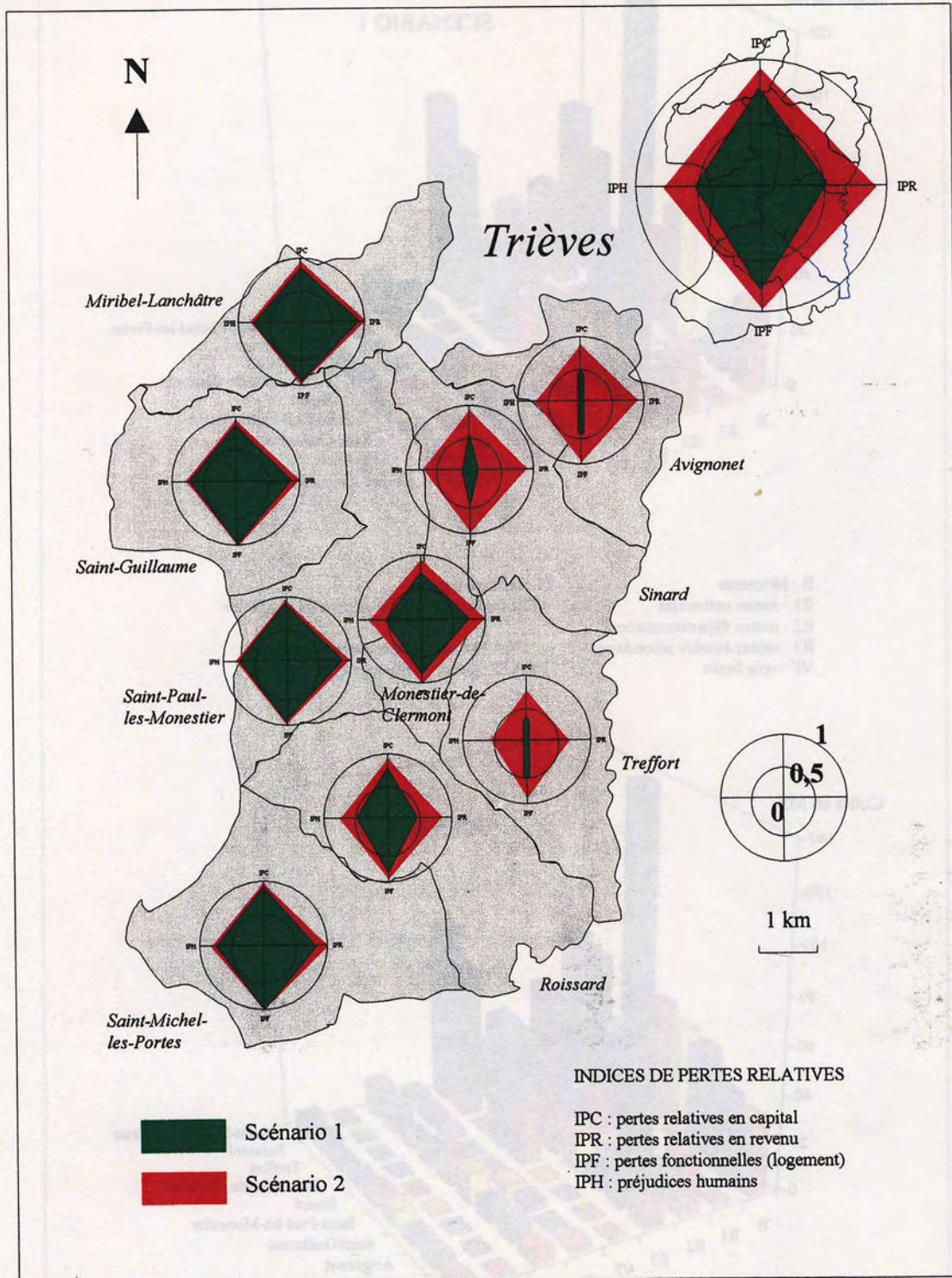


Figure III.21 - Simulation Trièves : surfaces de gravité des pertes par commune (indices de pertes).

COMMUNES	PERTES ECONOMIQUES (en millions de francs)				PERTES FONCTIONNELLES (en nombre de logements)				PREJUDICES HUMAINS (en nombre de personnes)			
	Pertes en capital		Pertes en revenus		Logements perdus temporairement		Logements perdus définitivement		Préjudice moral ou gêne		Blessés graves ou tués	
	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
Miribel-Lanchâtre	67,9	74,9	2,85	3,09	6	0	67	73	18	0	201	219
Avignonet	36,2	78,3	0	3,82	75	9	0	75	252	27	0	225
Saint-Guillaume	95,2	102,8	3,37	3,86	5	1	102	107	18	3	306	321
Saint-Paul-les-Monestier	85,4	89,2	6,04	6,7	9	1	103	112	30	3	309	336
Sinard	86,8	140,2	0,92	6,04	102	11	14	116	339	33	42	348
Monestier-de-Clermont	207,7	263,9	2,63	3,48	96	0	228	324	288	0	684	972
Treffort	17,8	44,6	0	2,13	36	21	0	36	171	63	0	108
Roissard	167,2	201,5	2,87	5,08	39	12	82	121	153	36	246	363
Saint-Michel-les-Portes	221,1	230,9	5,62	6,86	6	0	132	138	18	0	396	414
<b>TOTAL TRIEVES</b>	<b>985,3</b>	<b>1226,3</b>	<b>24,3</b>	<b>41,1</b>	<b>374</b>	<b>55</b>	<b>728</b>	<b>1102</b>	<b>1287</b>	<b>165</b>	<b>2184</b>	<b>3306</b>

Tableau III.17 - Simulation Trièves : récapitulatif des pertes suivant les deux scénarios S1 et S2.

#### 4. Conclusion du troisième chapitre

Cette tentative de quantification globale de la vulnérabilité aux mouvements de terrain s'articule autour de matrices d'endommagement dont le remplissage repose en grande partie sur le retour d'expérience. Les notions de sollicitation, d'intensité destructrice, de modes et de taux d'endommagement nécessaires à leur conception ont pu être développées également à la faveur de ce retour d'expérience et ce malgré les difficultés propres aux mouvements de terrain : à savoir la complexité, la dispersion et la diversité des phénomènes mis en jeu et surtout l'absence cruciale de données statistiques relatives à leurs dommages.

Actuellement, cette structuration du concept de vulnérabilité appliqué aux mouvements de terrains ne peut être valorisée qu'en généralisant les analyses en retour de catastrophes et perfectionner ainsi progressivement les matrices d'endommagement. Par ailleurs il reste à fournir un gros effort sur le plan de la prévision spatiale et temporelle de l'intensité destructrice des phénomènes impliqués. Cette prévision reste tributaire prioritairement de la capacité à modéliser l'évolution de ces phénomènes complexes sur un territoire donné.

Ce n'est que sous ces conditions que l'on parviendra peut-être un jour à mener des applications vraiment opérationnelles de la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité et du risque proposée dans ce chapitre.

Notons que cette méthodologie qui repose sur un découpage spatial, peut-être largement assistée par ordinateur. En effet, à chaque zone sollicitée correspond une série d'attributs qui peuvent tout à faire l'objet d'un S.I.G.. La représentation cartographique des résultats en sera alors d'autant plus facilitée.

## CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce travail on espère avoir pu éclairer le concept de vulnérabilité et son application au cas spécifique des phénomènes de mouvements de terrain considérés dans leur ensemble. Le concept lui-même n'avait jamais été structuré de la sorte en perspective d'applications potentielles et les rares réflexions méthodologiques existantes jusqu'à présent portaient seulement sur quelques phénomènes isolés.

Cette tentative d'élaboration des premiers fondements d'une méthodologie d'évaluation quantitative de la vulnérabilité a nécessité l'introduction de notions nouvelles souvent définies par analogie à la terminologie parasismique.

On a pu voir, contrairement à d'autres phénomènes naturels, que les mouvements de terrain apparaissent comme des phénomènes complexes, variés, dispersés et faiblement récurrents, ce qui complique la prévision de leurs effets dommageables et par voie de conséquence leur perception.

Aussi, cette théorie de la vulnérabilité reste-t-elle perfectible et critiquable comme toute proposition nouvelle et ses applications méthodologiques demeurent au stade expérimental.

De nombreuses incertitudes subsistent encore et il apparaît aujourd'hui fondamental, pour arriver à des progrès significatifs en matière de pronostics de vulnérabilité aux mouvements de terrain, tout comme on l'a fait pour les séismes, de généraliser les analyses en retour de catastrophes, à des pas de temps et à des échelles d'observation différents, autrement dit de se constituer une véritable mémoire des catastrophes.

Ce retour d'expérience existe certes déjà, mais il porte le plus souvent sur la seule analyse des phénomènes et plus rarement sur leurs effets. Les principales bases de données mouvements de terrain existantes en témoignent, que ce soit par exemple l'Inventaire National des Versants Instables ou le "World Landslide Inventory".

La qualification des dommages, la compréhension de leur apparition et de l'enchaînement de leurs répercussions apparaissent comme des étapes fondamentales permettant d'apprécier le rôle et le poids respectifs des différents facteurs de vulnérabilité menant à une situation de crise par exemple. L'analyse de ces facteurs de vulnérabilité (fig. I.6) doit être poursuivie et structurée davantage encore que ce qu'on a pu le faire sur le Diois ou l'Equateur. Il faut donc décortiquer de nouvelles catastrophes suivant un protocole synthétique désormais bien défini comportant 5 étapes principales :

- ① - Dresser des typologies des modes et niveaux des trois grandes catégories de dommages rencontrés : structurels, corporels et fonctionnels suivant les familles d'éléments affectés (biens, personnes et fonctions ou activités) ; avec de préférence des pas d'observation différés dans le temps pour la troisième catégorie.
- ② - Quantifier chacun de ces modes et niveaux par un taux d'endommagement calculé sur des échelles de valeur le plus souvent économiques.



- ③ - Analyser pour chaque niveau et mode de dommage retenu les différents facteurs de vulnérabilité (13 au total selon la figure I.6) qui ont pu contribuer à son apparition.
- ④ - Dresser des typologies de ces facteurs en les quantifiant dans la mesure du possible.
- ⑤ - Etablir les matrices d'endommagement des différents éléments affectés sur le principe des correspondances en terme de taux d'endommagement entre ces différents facteurs.

On doit obtenir à l'issue de ce protocole d'analyse une connaissance approfondie, structurée et quantifiée de la vulnérabilité de la communauté sinistrée.

Ces différentes étapes ont été plus ou moins réalisées dans le cadre de ce présent travail. Les étapes 3 et 4 demeurent les moins détaillées puisque seul le facteur "intensité du phénomène" a vraiment fait l'objet d'une analyse véritablement poussée. Mais ce choix est justifié par le sujet même de la thèse puisque c'est bien à travers l'évaluation de ce facteur que ressort surtout la spécificité des mouvements de terrain vis à vis d'une appréciation de la vulnérabilité et donc l'originalité de ce travail.

Les autres facteurs ont déjà été étudiés par d'autres auteurs, mais rares sont ceux, hormis les facteurs perceptifs et cognitifs propres à la vulnérabilité humaine, qui ont fait l'objet de tentatives de quantification.

En définitive, l'analyse de ces différents facteurs de vulnérabilité nécessite une connaissance approfondie dans des domaines aussi divers que la géologie, la géotechnique, la mécanique des structures, l'histoire, la sociologie, la psychologie ou l'économie, pour ne citer que les principaux. Le géographe à lui-seul ne peut relever le défi de cette analyse même si sa culture le prédestine à en assurer l'articulation. Ce nouveau thème de recherche qu'est la vulnérabilité impose donc une approche pluridisciplinaire des problèmes. En le structurant de la manière dont on l'a fait ici, on pense pouvoir y associer les représentants de ces autres disciplines.

En terme de perspectives d'application, les matrices d'endommagement perfectionnées à l'issue de ces analyses en retour, constitueront les pièces maîtresses de futurs scénarios de risques encourus. Le but est d'arriver à élaborer sur des zones exposées à des phénomènes pressentis des éventails de ces scénarios assortis d'images virtuelles et chiffrées des pertes potentielles. Compte tenu du mode de découpage spatial retenu, la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité et du risque développée dans ce travail reste compatible avec les potentialités de stockage, de couplage, de traitement et de représentation de l'information offertes par les systèmes d'information géographiques. Autrement dit, les matrices d'endommagement et les S.I.G. peuvent devenir deux outils complémentaires d'aide à la perception du risque et d'évaluation consensuelle de son niveau d'acceptabilité.

# *ANNEXES*



NATURE ET ORIGINE DES PHÉNOMÈNES	DATE ET LOCALISATION	SOURCES	CARACTÉRISTIQUES DES PHÉNOMÈNES (principaux et induits)	CONSEQUENCES DIRECTES	CONSEQUENCES INDIRECTES
Eboulement d'extension catastrophique Glissement plan	Préhistoire  Avalanche lake Mac Kenzie Mountains (Canada)	COUREL 1980 Eisbacher 1978	-volume : 350 à 500 hm <sup>3</sup> -surface : 750 ha -sur plan incliné de 31° -épandage de blocs sur 3 km de long -une partie de la masse éboulée a effectué un parcours ascendant de 500 m sur le flanc opposé de la vallée inclinée de 45°		
Glissement de terrain rotationnel sur cône-delta sous-marin généré par séisme	373 avant J.C  Côte Péloponnésienne du Golfe de Corinthe Sud Est d'Aegion Cités Grecques d'Héliké et de Voura (Grèce)	FLAGEOLLET 1989	- <i>"Une des plus grande catastrophe de l'Antiquité"</i> .	-engloutissement des cités d'Héliké et de Voura	
Glissement	1391  Mt Pertusio Vallée de Varaita Région Piémont (Italie)	REGIONE PIEMONTE 1990	-> obstruction de rivière et formation d'un lac de retenue		
Glissement plan lié à une discontinuité structurale et évoluant en écroulement rocheux	1442  Le Claps Luc en Diois Drôme (France)	FLAGEOLLET 1989  FROMENT 1988	-glissement au dépens d'une barre de calcaire du Jurassique supérieur, très redressé entre deux niveaux de calcaires marneux -volume : 2 hm <sup>3</sup>  -> barrage de la vallée de la Drôme par les blocs sur plus de 900 m et inondation des terres en amont		
Glissement généré par séisme et précipitations	1584  Torrent d'Yvorne (Suisse)	CROZIER 1986 Alexander 1983		-120 personnes tuées	
Glissement de terrain	04/09/1618  Plurs im Bergell (Suisse)	CROZIER 1986 Waltham 1978		-2 430 personnes tuées	
Glissement de terrain	1648  Göteborg (Suède)	MUNCHENER RUCK 1988		-85 morts	
Glissement généré par séisme	1725  Huaraz (Pérou)	CROZIER 1986 Zapata Luyo 1977		-1 500 personnes tuées	
Glissement de terrain	06/1765  Montepiano/Chieti (Italie)	MUNCHENER RUCK 1988		-600 morts	
Glissements de terrain générés par séisme	10/10/1786  Province de Sichuan-Kangding-Louding (Chine)	FLAGEOLLET 1989	- <i>"un grand tremblement de terre a détourné la rivière Dadu, provoquant un flot brutal, mais il a surtout déclenché des glissements dévastateurs sur 1 400 km. Ces glissements par tremblements de terre sont principalement localisés sur les plateaux de loess et les régions de collines"</i> .	-100 000 personnes tuées (approximatif) seulement du fait des glissements	
Eboulement généré par érosion de pied de pente	11/1806  Rossberg (Suisse)	CROZIER 1986 Waltham 1978		-457 personnes tuées	

Glissement de roches dures déclenché par de fortes précipitations	01/11/1829 Montagne d'Oule Sud-est de la Motte-Chalancou Drôme (France)	HUMBERT 1981 De Gasparin 1830	- <i>"Le mouvement progressif était lent et ne causait pas d'abord de bouleversement, tout avançait en masse et sans secousses ; l'éboulement ne parvint au bord de la rivière que le lendemain et ce ne fut que le mardi (2 jours après) qu'il encombra le lit. Mais dès qu'il eut rencontré un obstacle vers le bas, aussitôt les couches supérieures, continuant à pousser, il y eut un bouleversement complet"</i> .  ->formation d'un barrage sur près de 140 m de long qui retint durant un mois les eaux de l'Oule à un niveau assez élevé.  -->la débâcle qui en résultat abaissa le niveau à 3-4 m seulement de profondeur.		
Glissement de terrain marneux	31/05/1856 Bezaudun-sur-Bine Drôme (France)	HUMBERT 1981 L'illustration 1856	-vaste mouvement de fond qui a duré une nuit	-dévastation de 30 hectares de terres -destruction du village de Bezaudun	
Glissement	09/1857 Montemurro/Basilicate (Italie)	MUNCHENER RUCK 1988		-5 000 morts	
Glissement	26/11/1875 Grand Sable Cirque de Salazie Ile de la Réunion (France)	D.R.M. 1988	-volume : 18 hm <sup>3</sup>  ->obstruction partielle de la Ravine des Fleurs Janes et création d'un lac naturel.	-65 personnes tuées -destruction du hameau du Grand Sable	
Glissement	1881 Elm (Suisse)	CROZIER 1986 Waltham 1978		-115 personnes tuées	
Glissement généré par érosion et liquéfaction	1893 Verdal Valley (Norvège)	CROZIER 1986 Waltham 1978		-111 personnes tuées	
Glissement généré par exploitation minière	1903 Turtle Mountain (Canada)	CROZIER 1985 Waltham 1978		-76 personnes tuées	
Glissement généré par séisme	1920 Kansu (Chine)	CROZIER 1986 Waltham 1978		-10 000 personnes tuées	
Glissement lié à une discontinuité préexistante entre sol et substrat et par de fortes précipitations	1926 Ctimerice N.E. de Prague Bohême (Tchécoslovaquie)	FLAGEOLLET 1989		-destruction de deux immeubles	
Glissement évoluant en coulée sous l'action de fortes précipitations	3h le 25/11/1926 Roquebillière Alpes Maritimes (France)	FLAGEOLLET 1989  BENEVENT <i>et al.</i> 1927  MENEROUD 1976	- <i>"une énorme loupe de glissement décolle du sommet de la colline près du cimetière, descend la pente en 2 à 3 mn"</i>  -volume : plusieurs millions de m <sup>3</sup> -dénivelé : 400m -largeur : 800 m -précipitations 7 fois supérieures à la normale pour les mois d'octobre et novembre 1926 dans la région de St Martin de Vésubie.  -> "cependant la coulée ne suit pas immédiatement. Cf. inventaire "écoulements"  --> retenue du cours de la Vésubie par un barrage de 10 m de haut et formation d'un lac. Le barrage céda progressivement une heure plus tard sans entraîner de nouveaux dommages.	-19 personnes tuées -destruction : *de 20 maisons *des lacets de la route *d'une partie de la Mairie *d'une partie de la ligne de tramway *un pan de forêt entraîné dans la Vésubie *disparition de terrains cultivés	-isolement des villages de St Martin et Venanson
Glissement	13/11/1930 Fourvière Lyon Rhône (France)	D.R.M. 1988		-40 personnes tuées	

Glissement lié à une discontinuité préexistante entre sol et substrat	1931 Nord du village du Chatelard Massif des Bauges Savoie (France)	FLAGEOLLET 1989	-dans dépôts morainiques -volume : 6 hm <sup>3</sup>  ->transformation du glissement en coulée au contact de l'eau du torrent	-le hameau des Michauds "entraîné".	
Glissement	08/05/1932  Court d'Herbouville Lyon Rhône (France)	D.R.M. 1988		-30 personnes tuées	
Glissement marneux	03/01/1936  La Bâtie-des-Fonds Drôme (France)	MEJEAN 1936 HUMBERT 1981	-glissement lent qui ne stabilisa qu'au mois d'avril	-bouleversement de 200 hectares de champ et de bois -destruction d'un pont et de 1500 m de route -destruction d'un quinzaine de maisons	
Glissement	Hiver 1939  Cerredolo Région Emilia-Romagna (Italie)	REGIONE EMILIA ROMAGNA 1994		-destruction d'au moins 4 maisons et endommagement de plusieurs autres	
Glissement généré par lac sous-glaciaire	1941  Quebrada de Cojup (Pérou)	CROZIER 1986 Zapata Luyo 1977		-5 000 personnes tuées	
Glissement de terrain provoqué notamment par la disparition de tout le système de drainage du versant (occupation Allemande et bombardements)	Depuis 1944  Sainte Adresse Seine Maritime (France)	LEDOUX 1989	1944-1948: -développement d'un vaste glissement de terrain sur une superficie de 12 hectares.	-destruction d'une quinzaine de villas  -depuis les désordres se perpétuent avec une intensité faible mais régulière	-empêchent toutes nouvelles installations immobilières.
Glissement généré par des précipitations cycloniques	1945  Kure (Japon)	CROZIER 1986 Coates 1977		-1 154 personnes tuées	
Glissement multiples générés par séisme	1949  Monts Tien-Shan Tadzhikistan (U.R.S.S.)	COMITTEE ON GROUND FAILURES HAZARDS 1985 Wesson & Wesson 1975 Jaroff 1977		- ensevelissement de trois centres urbains - 12 000 à 20 000 morts	
Glissement	1951  Antrona Vallée d'Ossola Région Piémont (Italie)	REGIONE PIEMONTE 1990	-> obstruction de rivière et formation d'un lac de retenue		
Glissement	24/04/1952  Menton Alpes Maritimes (France)	D.R.M. 1988		-11 personnes tuées	
Glissement généré par activité volcanique	1953  Tangiwai (Nouvelle Zélande)	CROZIER 1986 Waltham 1978		-154 personnes tuées	
Glissement	1955  Moulin Ravier Ugine Vallée de l'Arly Savoie (France)	D.R.M. 1988	-volume : 17 hm <sup>3</sup>  ->obstruction du torrent	-destruction d'un pont et d'un barrage  -inondation d'une route nationale (R.N. 21).	
Glissement généré par fortes précipitations	1956  Santos (Brésil)	CROZIER 1986 Waltham 1978		-100 personnes tuées	
Glissement généré par des précipitations cycloniques	1958  Sud-ouest de Tokyo (Japon)	CROZIER 1986 Kawaguchi <i>et al</i> 1959		-1 100 personnes tuées	
Glissement de terrain	1972  Virginie occidentale (U.S.A.)	MUNCHENER RUCK 1988		-400 morts	
Glissement de terrain déclenché par séisme (magnitude 7.1)	08/1959  Madison Canyon Montana (U.S.A.)	FLAGEOLLET 1989  COUREL 1980 Hadley 1959  TRUNK <i>et al</i> 1986	-volume : 21,4 hm <sup>3</sup> -distance : 1,6 km -vitesse : 50m/s  ->Obstruction d'une vallée	-26 personnes tuées	

Glissement de terrain lié à de fortes précipitations	23/04/1960 Lupazzo Région Emilia-Romagna Cerredolo (Italie)	REGIONE EMILIA-ROMAGNA 1994	-13 hm <sup>3</sup> -plus de 130 mm de précipitations du 16 au 20/04/1960  -> obstruction de la rivière Secchia et formation d'un retenue couvrant 200 ha		
Glissement généré par séisme	1960 Région de Rupanco (Chine)	CROZIER 1986 So 1971		-210 personnes tuées	
Glissement dans retenue d'un barrage hydroélectrique induit par remplissage	10/1963 Vajont Friul (Italie)	CROZIER 1986 Waltham 1978  COUREL 1980 Muller 1968 Abele 1974 Chowdury 1978  GOUT 1994	Glissement: -volume : 250 hm <sup>3</sup> -surface : 1 900 ha -1,7 km de long  -> vague déferlante de 300 m de haut qui submerge l'aval malgré la résistance du barrage	-plusieurs villages détruits -2 117 personnes tuées dans le bourg de Longarone	
Glissement de terrain	Depuis 1965 Saint Jean de la Motte Sarthe (France)	LEDOUX 1989	1965: -déplacements verticaux et horizontaux continus  1968: -aggravation des déplacements    1988: -nouvelle évolution du glissement	-fissures sur l'église -affaissement du C.D. 54.  -drains obstrués  1985: -effondrement du mur de soutènement de la C.D. 54	
Glissement généré par fortes précipitations	1966 Hong Kong Is (Hong Kong)	CROZIER 1986 So 1971		-64 personnes tuées	
Glissement	1966 Aberfan Pays de Galles (Grande Bretagne)	CROZIER 1986 Waltham 1978		-144 personnes tuées	
Glissement généré par fortes précipitations	1966 Rio de Janeiro (Brésil)	CROZIER 1986 De Meis & Da Silva 1968		-279 personnes tuées	
Glissement-coulée déclenché par de fortes précipitations	21/10/1966 Terril d'Aberfan (Pays de Galles)	FLAGEOLLET 1989 Duffaut 1982  HUTCHINSON 1986	-volume: 80 000 m <sup>3</sup> -longueur: 800 m -épaisseur max: 10 m -largeur: 50 m environ -vitesse : 8-11 m/s  - <i>"Moins de deux heures après la réactivation d'un glissement, le flowslide a commencé dans la partie raide au centre du pied du terril (25 %), démarrant lentement et accélérant en incorporant le matériau saturé qui est déjà sur le versant (issu des phénomènes antérieurs). Suivant ce matériau semi-fluide, et peut être transporté par lui, le gros du matériau à la teneur en eau un peu plus faible glisse vers le bas, enlevant du même coup la couverture meuble, libérant l'eau du grès fissuré ... d'où une coulée prolongeant la partie centrale du flowslide jusque dans le village en y creusant un profond canal, creusé par la boue et non par l'eau. ...L'eau a contribué au phénomène par érosion à la base, pression à l'intérieur, possibilité de liquéfaction et dilution en coulée de boue. Les pluies n'avaient pas été spécialement importantes, mais ces terrils, édifiés avec leur pente de dépôt naturel, ont un coefficient de sécurité très faible".</i>	-144 personnes tuées -destruction de plusieurs maisons	
Glissement généré par fortes précipitations	1967 Rio de Janeiro (Brésil)	CROZIER 1986 Jones 1973		-1 700 personnes tuées	

Glissement-coulées déclenché par des conditions météorologiques exceptionnelles	0h30 le 16/04/1970 Sanatorium du roc des Fiz Plateau d'Assy Haute Savoie (France)	D.R.M. 1988 DEBELMAS 1990 JAIL <i>et al.</i> 1971	-loupe terminale représente un volume de 30 à 50 000 m <sup>3</sup> (pour une estimation de 2,5 à 3m d'épaisseur moyenne du cône) -zone affectée s'étale sur 400 m de dénivellation	- 71 personnes tuées	
Glissement-coulée	04/05/1972 Saint Jean Vianney Québec (Canada)	FLAGEOLLET 1989	-liquéfaction de 6,9 hm <sup>3</sup> d'argiles (illites, chlorites, vermiculites) -recul de l'escarpement amont à la vitesse de 3 km/h		
Glissement généré par fortes précipitations	18/06/1972 Kwun Tong (Hong Kong)	CROZIER 1986 Waltham 1978		-80 personnes tuées	
Glissement généré par fortes précipitations	1972 Kamijima (Japon)	CROZIER 1986 Waltham 1978		-112 personnes tuées	
Glissement généré par de fortes accumulations neigeuses et augmentation de la pression de l'eau	25/04/1974 Mayunmarca Rio Mantaro (Pérou)	CROZIER 1986 Lee et Duncan 1975 SOUSSA & VOIGHT 1991	-vitesse : 23 m/s -distance : 4 150 m	-450 personnes tuées	
Glissement de terrain au dessus d'un lac de retenue	1975 Extrémité NE du plateau Tibétain Est de la province de Gansu (Chine)	FLAGEOLLET 1989		-50 personnes tuées -destruction de: *3 000 maisons *15 000 hectares de terres cultivées	
Glissement généré par séisme	1976 Ville de Guatemala (Guatemala)	CROZIER 1986 Harp <i>et al.</i> 1981		-240 personnes tuées	
Glissement généré par fortes précipitations de mousson	1976 Pahrikhet (Népal)	CROZIER 1986 Waltham 1978		-150 personnes tuées	
Glissement	1977 Menton (France)	CHAMPETIER de RIBES 1987		-destruction d'un immeuble	
Glissement	31/07/1977 Court d'Herbouville Lyon Rhône (France)	D.R.M. 1988		-3 personnes tuées	
Glissement de terrain	30/11/1977 Göteborg (Suède)	MUNCHENER RUCK 1988		-8 morts	
Glissement	19/03/1978 Vallée de Piota Province de Alessandria (Italie)	REGIONE PIEMONTE 1990	-> obstruction du torrent de Piota et formation d'un lac de retenue		
Glissement composite déclenché par de fortes précipitations et par actions humaines	08/08/1979 Abbotsford Est Région de Dunedin (Nouvelle Zélande)	FLAGEOLLET 1989 Coombs 1981 CROZIER 1986	-volume de la masse glissée: 5,4 hm <sup>3</sup> sur surface de rupture plane -déplacement horizontal: environ 50 m -zone de déplacements verticaux en amont (graben)  déclenchement du phénomène: *précipitations importantes à partir du 24 Juillet *infiltrations dues aux fuites de la conduite d'eau installée depuis 1951 à 250 m en amont de la couronne du glissement *diminution de la résistance en butée occasionnée par les extractions de sable dans la carrière ouverte à la base Est du versant (300 000 m <sup>3</sup> entre 1964 et 1969 pour la construction de l'autoroute)	-69 maisons furent détruites ou durent être déplacées, la plupart situées sur la zone de graben située en amont de la zone glissée  <i>coût pour l'état: 250 000 \$US</i>	
Glissement	1980 Grand Ilet Cirque de Salazie Ile de la Réunion (France)	D.R.M. 1988		-10 personnes tuées	
Glissement généré par fortes précipitations	1980 Gyansu, Uttar, Pradesh (Inde)	CROZIER 1985 undro 1980-83		-150 personnes tuées	



Glissement généré par fortes précipitations	1980 Est de Jakarta (Indonésie)	CROZIER 1985 undro 1980-83		-100 personnes tuées	
Glissement généré par fortes précipitations	1981 Mt Semeru	CROZIER 1985 undro 1980-83		-500 personnes tuées	
Glissement généré par fortes précipitations	1981 Province d'Albay (Philippines)	CROZIER 1986 undro 1980-83		-140 personnes tuées	
Glissement actif	Depuis 03/1982 torrent de la Valette Vallée de l'Ubaye Alpes-de-Haute-Provence (France)	COMBES 1990 GOUT 1994	-volume : 6 hm <sup>3</sup> -vitesses : 40 cm/jour en période de pluie -surface de glissement passée de 26 ha en 1983 à 57 ha en 1987	-menace pour 400 personnes. un ensemble d'habitations (170 logements), de 5 commerces, d'un centre aéré, d'une gendarmerie, d'un abattoir... que l'on a laissé s'implanter sur l'ancien cône de déjection du torrent drainant le glissement -travaux de protection	-installation d'un système de télésurveillance avec plan d'évacuation et plaquette d'information des populations
Glissement	1982 Yanacocha (Pérou)	CROZIER 1986 undro 1980-83		-70 personnes tuées	
Glissement généré par fortes précipitations	1982 Nord de Sumatra (Indonésie)	CROZIER 1986 undro 1980-83		-50 personnes tuées	
Glissement	1982 Eaux-Bonnes Pyrénées Atlantiques	D.R.M. 1988	-volume >5 hm <sup>3</sup>	-coupure de la route de la station de Gourette	
Glissement	1982 Villerville Calvados (France)	D.R.M. 1988	-volume : 1 à 5 hm <sup>3</sup>	-destruction d'une trentaine d'habitations -menace de coupure d'une route	
Glissement généré par fortes précipitations	1983 Yacitan et Cashipampa (Pérou)	CROZIER 1986 undro 1980-83		-233 personnes tuées -300 personnes disparues	
Glissement généré par crue printanière	1983 Mt Sale Dongxiang (Chine)	CROZIER 1986 undro 1980-83		-277 personnes tuées	
Glissement généré par fortes précipitations	1983 Bogota (Colombie)	CROZIER 1986 undro 1980-83		-150 personnes tuées	
Glissement de terrain	01/05/1983 Gare SNCF de Bourgoin Jaillieu Isère (France)	LEDOUX 1989		-déraillement du turbo train Grenoble-Lyon: *une personne tuée *2 personnes gravement blessées *8 personnes légèrement blessées *20 personnes très légèrement blessées ou contusionnées.	
Glissement	10/08/1983 Rue des Fourleries Chateaudun Eure et Loir (France)	D.R.M. 1988		-3 personnes tuées	
Glissement généré par précipitations de mousson	1983 Sikkim	CROZIER 1986 undro 1980-83		-67 personnes tuées	
Glissement généré par fortes précipitations	1983 Ouest (Népal)	CROZIER 1986 undro 1980-83		-186 personnes tuées	
Glissement	12/1985 Pellautier Hautes Alpes (France)	LEDOUX 1989		-effondrement d'une bergerie: -une personne tuée -120 moutons tués	
Glissement déclenché par séisme	17 h le 26/07/1985 Jisukiyama (Japon)	SASSA 1988 ASTE 1991	-volume : 5 hm <sup>3</sup> -vitesse : 10 cm/s -distance parcourue : 700 m -rupture brutale	-29 victimes -4 blessés -50 maisons totalement détruites, et 14 partiellement.	

Glissement	3h30 le 26/07/1986 Senise Région de Basilicata (Italie)	ALEXANDER 1991	-glissement d'environ 960 000 m <sup>3</sup> de sables argileux sur une surface argileuse située à 15 m de profondeur	-8 personnes tuées -3 personnes blessées -9 bâtiments effondrés  <i>coût des dégâts: 2,5 M\$ US</i>	-158 personnes évacuées  -allocation du gouvernement central de 160 M\$, soit 65 fois la valeur des dommages à la commune sinistrée.
Glissement	17/04/1987 Huahine Tahiti Polynésie Française (France)	D.R.M. 1988		-10 personnes tuées	
Glissement et barrage induit	7h27 le 28/07/1987 Rivière Adda Vallée de Pola Valtellina Alpes (Italie)	ALEXANDER 1991 Alexander 1988 Botta 1987	-glissement de 33 à 44 hm <sup>3</sup> de roches et de sédiments depuis le Mont Zandila. -durée du déplacement : 31 secondes -vitesse maximum : 250 km/h (70 m/s)  ->formation d'une digue naturelle de 2800 m de long et de 40 à 70 m de haut et création d'une retenue de 16 à 17 hm <sup>3</sup> par blocage du cours de la rivière	-53 personnes tuées -110 personnes blessées  -oblitération immédiate de deux villages  <i>dégâts évalués à 3 000 M \$ US</i>	-évacuation de 25 000 personnes réparties sur 40 municipalités (environ 52 % de leur population totale)  - consolidation définitive du barrage après creusement de deux tunnels hydrauliques
Glissement	14h40 le 27/07/1987 Quartier de Villatina Medellin (Colombie)	VELASQUEZ 1994	-volume : 31 000 à 34 000 m <sup>3</sup>	-500 personnes tuées (251 habitants/ha) -150 personnes blessées -80 maisons détruites (60 % en briques et 40 % en matériaux de récupérations) (47 maisons/ha). -canal d'adduction d'eau coupé	-1 300 personnes affectées indirectement
Glissement	09/1987 R.N.204 entre Foutan et Saint Dalmas Alpes Maritimes (France)	LEDOUX 1989		-la plate-forme de la route est en partie emportée ou défoncée et la route coupée.	-trois villages sont isolés (soit environ 2 600 habitants) -aucune déviation locale n'est possible, ni sur le site, ni autour. La liaison Tende-Nice ne peut être assurée que par l'Italie, soit par le col de la Lombardie, soit par l'autoroute de Savone, ce qui représente un détour considérable. La S.N.C.F. met en place une navette ferroviaire pour évacuer de nombreux touristes et des wagons plate-forme pour le transport des voitures
Glissement-coulées	04/1988 Commune du Planay Savoie (France)	PLOTTO <i>et al.</i> 1990	-glissement actif avec phase paroxysmale en 1988 -longueur de la zone active: 850 m -largeur: 30 m en amont et 100 m en aval -1 partie en coulée rapide: 8 m d'épaisseur et vitesses de 5 à 20 m/an -1 partie en glissement actif (aval): 14 m d'épaisseur et vitesses de 3 m/an -vitesse maximale enregistrée en avril 1988: 1,5 m/jour	-menace de coupure du cours du torrent du Doron de Bozel et de la R.D. 915, seule route d'accès à la station olympique de Pralognan  <i>-coût des études de protection: 200 000 F</i> <i>-coût des travaux de protection (détournement, drainage, captage, stabilisation, remblai): 2 900 000 F</i>	-mise en place d'un plan d'alerte par la Protection Civile
Glissement de versant	02/01/1990 Rivière Pisque Guayllabamba (Equateur)	ASANZA <i>et al.</i> 1991	-volume : 3,6 hm <sup>3</sup>  -> obstruction de la rivière Pisque par un barrage de 1 hm <sup>3</sup> , 450 m de long, 60 m de large, 58 m de haut.  Formation d'une retenue de 2,5 hm <sup>3</sup> , 45 m de profondeur, 2,6 km de long.  -> rupture de la retenue le 26/01/1990 (brèche de 50 m de large et 30 m de profondeur) et vidange du lac de 60 % entre 10h00 et 13h30, avec un débit de pointe de 700 m <sup>3</sup> /s. Energie correspondante à ce pic évaluée à 6,6x10 <sup>9</sup> Joules.	-évacuation des populations situées en aval  -destruction de terrasses cultivées, de deux maisons, et d'un petit pont.  <i>Pertes estimées à 1 million de dollars U.S.</i>	
Glissement plan lié à de fortes précipitations	04/05/1991 Mongia Commune de Scagnello Province de Cuneo (Italie)	LUINO <i>et al.</i> 1992	-volume : 35 000 à 50 000 m <sup>3</sup>	-déformation d'une chaussée de route provinciale	-interruption du trafic routier

Glissement de terrain	22/09/1993 Voie ferrée Sarras Ardèche (France)		-faible volume déversé sur voie ferrée	-obstruction de la voie ferrée: -1 personne tuée par déraillement d'un train de marchandise (conducteur)	
Glissement de versant rocheux	21h le 29/03/1993 La Josefina Vallée de Paute Province d'Azuay (Equateur)	LEONE 1994	-volume : 28 hm <sup>3</sup> -deux phases -durée de quelques secondes  -> obstruction des rivières Paute et Jadan au niveau de leur confluence par un barrage de 90 m de haut, 500 m de large et 1 100 m de long. Formation d'une retenue de 180 hm <sup>3</sup> .  --> 33 jours après, rupture du barrage et vidange de 150 hm <sup>3</sup> d'eau dévastant 60 km de vallée aval. Débit de pointe de 10 000 m <sup>3</sup> /s et volume solide évacué de 13 hm <sup>3</sup>	-71 disparus, destruction d'haciendas.  -inondation de 600 hectares avec villas, usine thermoélectrique, terminal pétrolier, route panaméricaine, terres agricoles...  -destruction de ponts, terres agricoles, routes, habitations. Inondation de la ville de Paute. Comblement partiel de la retenue hydroélectrique de Paute (70 % de la production électrique nationale).  <i>Pertes directes totales: 147 millions de dollars, soit 1,24 % du PNB de l'Equateur en 1992).</i>	-évacuation de 14 000 personnes en aval.
Glissement de terrain minier	13h30, le 9/05/1993 Mines d'or de Zambija Province de Zamora-Chinchiipe (Equateur)	Journaux équatoriens "El Pais" et "Ecuador"	-glissement dans mines d'or exploitées de manière très empiriques	- 350 victimes - 2,5 millions de dollars de pertes directes selon les premières estimations.	
Glissements de terrain liés à de fortes précipitations	06 et 07/01/1994 Région du Diois Drôme (France)	LEONE			
Glissement de versant rocheux réactivé par de fortes précipitations	07/01/1994 Hameaux de Ravel-et-Ferriers Boulc Drôme (France)	LEONE	Réactivation d'un paléoglissement sous-marin	-destruction de la route départementale	-enclavement de la commune de Boulc par destruction de cette voie d'accès principale
Glissement de terrain lié à de fortes précipitations	07/01/1994 Beaurière Région du Diois Drôme (France)	LEONE	- volume : 250 000 m <sup>3</sup>	-menace de la ligne de chemins de fer Paris-Briançon (jusqu'à 30 trains/jour à cette période de l'année)  <i>600 000 francs de travaux de drainage et de surveillance</i>	-ralentissement des trains sur la portion concernée à 20 km/h puis 30 km/h. -relance le débat sur le maintien ou non de cette ligne déjà fortement déficitaire -débat juridique pour savoir à qui incombe la responsabilité de cet incident: aux propriétaires des terrains privés, à l'ONF ou à la commune de Beaurière ?
Glissements de terrain liés à de fortes précipitations	07/01/1994 La Bâtie-des-Fonds Région du Diois Drôme (France)	LEONE 1994	-nombreux glissements-coulées de débris	-nombreuses coupures de la route départementale et des réseaux de téléphone et d'électricité	-isolement partiel du village de la Bâtie-des-Fonds -nécessité d'acheminer un groupe électrogène

<p>Glissement de terrain lié à de fortes précipitations</p>	<p>1h15 le 08/01/1994 Combe des Parajons La Salle-en-Beaumont Isère (France)</p>	<p>VILLAIN 1994</p>	<p>-volume : 1,3 hm<sup>3</sup> -surface : 7 ha -longueur : 450 m -largeur : 200 m -8 à 12 m d'épaisseur moyenne -durée du phénomène: 15 mn environ -les gens ont ressenti un effet de souffle  -précipitations enregistrées entre les 5 et 7/01/1994: *167 mm à Corps (fréquence 10 ans) *274 mm à Pellafof-Sautet (fréquence 1 000 ans)  -&gt; obstruction du ruisseau de la Salle et formation d'un lac de retenue de 15 000 à 20 000 m<sup>3</sup></p>	<p>-4 personnes tuées surprises dans leur sommeil -destruction de 6 habitations (coupées de leurs fondations qui sont restées en place (effet de souffle)): phénomène assez violent. -une église partiellement détruite qui sera rasée -cimetière endommagé -R.N. 85 ensevelie sous 20 m de matériaux sur 110 m de long (revêtement préservé) -Réseaux d'alimentation coupés  -inondation de 4 habitations  <i>Coût des études techniques, des travaux de drainage et des secours s'élèvent à 32 millions de francs. Reste travaux de rétablissement du ruisseau estimés à 10 millions de francs et ceux du rétablissement définitifs de la R.N. 85</i></p>	<p>-déviation provisoire de la R.N.85 opérationnelle 20 jours après la catastrophe</p>
<p>Glissement de terrain généré par précipitations et fontes de neiges</p>	<p>Depuis 03/1994 Chlowena 15 km de Fribourg (Suisse)</p>	<p>BONNARD 1994</p>	<p>-dans Flyschs argileux des préalpes -150 m de déplacements horizontaux en 6 mois de mesures -vitesse du front du glissement : 10 m/jour</p>	<p>-destruction presque totale d'un lotissement: les maisons se déplacent et semblent flotter sur le glissement: au début août, des chalets avaient parcouru 60 m de distance sans encaisser aucune déformation apparente (structure homogène)  -&gt;menace d'obstruction d'un cours d'eau en pied du glissement qui peut débiter jusqu'à 100 m<sup>3</sup>/s</p>	<p>-problèmes juridiques car le site avait été interdit à la construction bien auparavant. La compagnie d'assurance a alors fait jouer une clause restrictive mais qui a du être levée sous la pression politique (conseil d'état). Les victimes ont pu ainsi être indemnisées mais les propriétaires essaient en vain de revendre leur terrains à l'état car ils ne peuvent plus en jouir du fait de l'obligation d'évacuation.</p>

NATURE ET ORIGINE DES PHÉNOMÈNES	DATE ET LOCALISATION	SOURCES	CARACTÉRISTIQUES DES PHÉNOMÈNES (principaux et induits)	CONSEQUENCES DIRECTES	CONSEQUENCES INDIRECTES
"Lahar" généré par de fortes précipitations	79 A.D. Mt Vésuve Cité d'Herculaneum (Empire Romain)	NEALL 1976 Bullard 1962	-10 km de distance parcourue depuis le Vésuve -20 m d'épaisseur de cendres, de laves et de pierres ponces contenant des dépôts de lahar	-ensevelissement des villes romaines d'Herculaneum et de Pompei	
Coulée de boue générée par des pluies torrentielles	1449 Torrent du St Antoine Modane Savoie (France)	Ville de Modane, bulletin municipal 1988	-accumulations importantes.	<i>"Cette année là une grande quantité d'alluvions fut déposée par le torrent à telle enseigne que les habitants ne savaient plus reconnaître leurs propriétés".</i>	
"Lahar" généré par la vidange d'un lac de cratère volcanique	09/1541 Mt Agua Cité de Ciudad Vieja (première capitale du Guatemala) (Guatemala)	NEALL 1976 Cotton 1964 Kalijarvi 1962 Meyer-Abich 1956		-1 300 personnes tuées dont Gobernadora Donna Beatrix, première femme à la tête d'un gouvernement sur le continent Américain	
"Lahar" généré par de fortes précipitations	1631 Mt Vésuve (Italie)	NEALL 1976 Perret 1924		-dévastation de nombreuses villes et villages	
Coulée de boue générée par des pluies torrentielles	1773 Torrent du St Antoine Modane Savoie (France)	Ville de Modane, bulletin municipal 1988	-poussées latérales	<i>"Cette année là le pont de la grande route est emporté".</i>	
"Lahar" généré par la rupture d'un barrage naturel formé par une nuée ardente	05/08/1783 Mt Asama Rivière Agatuma-gawa (Ceinture Pacifique)	NEALL 1976 Aramaki 1956	-formation d'une coulée boueuse chaude dévalant 80 km	-1300 personnes tuées	
"Lahar" généré par une explosion phréatique	nuit du 21/05/1792 Pic Muyuyama Est du Mt Unzendake Péninsule de Shimabara (Japon)	NEALL 1976	-vitesses très modérées	-9 745 personnes tuées -une personne transportée avec son habitation sur près d'1 km pendant une période de 3 heures 1/2	
Coulée de boue générée par des pluies torrentielles	1808 Torrent du St Antoine Modane Savoie (France)	Ville de Modane, bulletin municipal 1988	- "grosse crue"	-bâtiments endommagés.	
Coulée de boue générée par des pluies torrentielles	entre 1811 et 1866 Torrent du St Antoine Modane Savoie (France)	Ville de Modane, bulletin municipal 1988	-des débordements sont constatés.	-des coupures de la route Royale	
"Lahar" généré par la vidange d'un lac de cratère volcanique	1822 Mt Galounggong (Indonésie)	NEALL 1976 Escher 1925 Lyell 1827	-durée: 4 h -volume : 100 hm <sup>3</sup> de boue et de pierres -24 km de distance parcourue	-4 000 personnes tuées -enfouissement d'habitations et de plantations	
"Lahar"	7 h du matin, le 19/02/1845 Mt Nevado del Ruiz Rio-Lagunilla Cité d'Ambalema (Colombie)	VIE LE SAGE 1989 Acosta 1846	<i>"...on entendit un grand bruit souterrain sur les bords de la Madelaine, depuis la ville d'Ambalema jusqu'au village de Mendez, c'est à dire entre deux points éloignés de plus de 4 myriamètres. Ce bruit subit fut suivi, dans une étendue moins considérable, d'une secousse de tremblement de terre. Ensuite il descendit du Nevado de Ruiz par le Rio-Lagunilla, qui a ses sources près du groupe volcanique de Ruiz, un immense flot de boue épaisse ... En arrivant dans la plaine avec impétuosité, le courant de boue se divisa en deux bras: le plus considérable suivit le cours du Rio-Lagunilla, se dirigeant ainsi vers la Madelaine; l'autre après avoir franchi une arête assez élevée, s'écarta en suivant une direction formant un angle presque droit vers le Nord, et parcourut la vallée de Santo-Domingo, bouleversant et entraînant des forêts entières, qui allèrent se précipiter vers la rivière de Sabandija, qui se trouva ainsi arrêtée par un immense barrage. Le danger d'une inondation des terres en aval devenait imminent.</i>	-environ 1 000 personnes tuées <i>"...un immense flot de boue épaisse qui, remplissant rapidement le lit de cette rivière, couvrit ou entraîna les arbres et les maisons, ensevelissant les hommes et les animaux. Toute la population de la partie supérieure et plus étroite de la vallée du Lagunilla périt. Dans la partie inférieure, plusieurs personnes se sauvèrent en fuyant latéralement vers les hauteurs; d'autres moins heureux, restèrent isolés sur les sommets de monticules où il fut impossible de les secourir assez à temps pour les arracher à la mort. On évalue à environ mille personnes le nombre des victimes; la plupart étaient des planteurs employés dans la grande culture de tabac d'Ambalema ..."</i>	

			<p>Heureusement une pluie abondante, qui survint dans la nuit, donna aux eaux assez d'impulsion pour se frayer un passage au travers de cet amas d'arbres brisés, de sables, de roches et de boue fétide, mêlée d'énormes blocs de glace qui étaient descendus de la cordillère en telle abondance, qu'après plusieurs jours ils n'étaient pas encore entièrement fondus, malgré la température élevée (28 à 29°) de ces lieux. Or cette masse de glace venait d'une hauteur de 4 800 m, limite inférieure des neiges perpétuelles sous cette latitude (4° 50'). C'est la première fois, de mémoire d'homme, que les habitants des bords embrasés de la Madelaine avaient vu de près de l'eau solidifiée par le froid ... Et ce fut un spectacle étonnant que de voir les eaux tièdes de la Madelaine charrier des glaçons."</p>		
Lave torrentielle	07/1862  Saint Jean de Maurienne Savoie (France)	D.R.M. 1988		-75 personnes tuées	
Laves torrentielles	23/06/1874  Verdun Ariège (France)	D.R.M. 1988		-71 personnes tuées	
Coulée de boue générée par des pluies torrentielles	1877  Torrent du St Antoine Modane Savoie (France)	Ville de Modane, bulletin municipal 1988	<p>"importante crue" -accumulations -poussées latérales</p>	-de nombreux terrains engravés  -destruction du pont de la voie impériale du Mont Cenis et renversement des culées du pont du chemin de fer.	
"Lahar" généré par une explosion phréatique	1888  Pic de Kobandai Mt Bandai-san (Japon)	NEALL 1976 Kuno 1962 Cotton 1944	-volume : 0.25 km <sup>3</sup>	-460 personnes tuées	
Lave torrentielle générée par la vidange d'une poche d'eau sous-glaciaire	1h25, le 12/07/1892  Massif du Mont Blanc Glacier de Tête-Rousse Village de Bionnay et établissement thermal de St Gervais (73) (France)	MORET 1992 Guichonnet 1992 Durier 1892 Le Progrès illustré 1892 L'illustration 1892 L'indicateur de la Savoie 1892 L'Allobroge 1892 Le Journal illustré 1892  SAURET Vallot et al. 1892	<p>-volume : 800 000 m<sup>3</sup> -vitesse moyenne : 7m/s (25 km/h) -35 mn pour parcourir 14 km -présence de blocs de 200 m<sup>3</sup> -vague déferlante de 30 m de haut.</p> <p>"...coulée d'eau, de boue et de débris divers...déluge d'eau et de glace aux tons laiteux. En quelques minutes, une masse liquide, estimée à 200 000 m<sup>3</sup>, s'est vidangée dans le vertigineux couloir Bossonney, dont la pente oscille entre 59 et 78 %, arrachant les anciennes moraines du Désert de Pierre Ronde, et soulevant dans sa violence des blocs de plusieurs tonnes...Les flots en furie atteignent très vite la zone des alpages du Plan de l'Arve vers 1750 m d'altitude, où ils décapent la couche végétale et arrachent les arbres. Autant de débris qui forment une lave torrentielle à la puissance dévastatrice décuplée. Une fois engagée dans les gorges de Bionmassay, l'onde de crue avance de manière saccadée: à chaque coude du relief des barrages momentanés se constituent, emportés à leur tour sous les coups de boutoir des eaux qui arrivent en amont..."</p> <p>"un survivant raconte qu'il a été réveillé par un sifflement et un bruit étrange et assourdissant...comme un coup de tonnerre accompagné d'une intense trépidation."</p>	<p>-175 personnes tuées</p> <p>"...dans la zone entre Tête-Rousse et le vallon de Bionmassay, le mélange d'eau, de rocs et d'arbres ne détruit que les paysages et la nature des sols. En aval, les flots vont devenir plus meurtriers. Première victime le meunier de Monneray: son moulin est emporté tel un fêtu de paille. Plus bas, le village de Bionnay, installé au confluent des vallées de Bionmassay et du Bonnant, va être frappé de plein fouet: les mouvements d'embâcle et de débâcle des eaux libèrent une lame de 29 m de haut qui détruit onze maisons et tue 33 personnes dans leur sommeil. Le bilan humain aurait pu être beaucoup plus lourd si, à cette période de l'année, une partie des habitants n'avait rejoint les chalets d'alpages.</p> <p>Dans sa furie, la coulée vient frôler la petite chapelle de Bionnay, mais épargne l'école, protégée par un rideau d'arbres. Dense et visqueuse, cette "mer de boue" s'étale ensuite sur plus de 300 m de large et semble hésiter dans son cheminement, dessinant un immense lac dans la plaine.</p>	

				<p>Après avoir sauté la cascade de Crépin - 60 m de haut - la déferlante vient percuter le complexe thermal bâti le long du Bonnant. En moins de 5 mn, 6 bâtiments sur 8 s'écroulent comme des châteaux de cartes, écrasés par des blocs de 200 m<sup>3</sup>, tout le reste étant recouvert, jusqu'au 2<sup>e</sup> étage, par un déluge de boue. A nouveau plus fluide, la coulée passe ensuite par-dessus le pont du Fayet et s'épanche sur 75 hectares dans la plaine que rejoint l'Arve. Au passage, 8 maisons ont été détruites et douze personnes ont été ensevelies.</p> <p>-Au niveau des bains: "Le choc a été foudroyant. La bâtisse centrale, où loge le personnel administratif, a avancé d'une dizaine de mètres avant de se disloquer. Même chose pour le "bâtiment du torrent" qui héberge les gens de service, et pour une partie plus récente qui abrite des curistes. Tous les occupants, sans exception, ont péri noyés ou écrasés sous les décombres. Seule la section en aval du nouveau bâtiment a résisté aux coups de béliers. Des scènes d'horreur se sont déroulées dans ce vaisseau en perdition: des gens jaillissent de leur chambre et courent en hurlant dans les couloirs extérieurs envahis par les eaux. Avec pour unique recours de chercher refuge, quand ils le peuvent, sur les terrasses et les toits, d'où ils voient les flots glisser le long de la façade. Certains curistes, terrorisés, sauteront depuis les fenêtres et disparaîtront, happés par le courant."</p> <p>Plus de 1,5 MFF de dégâts. Soit plus de 18 MFF actuels</p>	
"Lahar" généré par la vidange d'un lac de cratère volcanique	1919 Mt Kelut à l'est de Java (Indonésie)	NEALL 1976 Hadikusumo 1965 Zen 1964 et 1965 Escher 1922	-volume d'eau libérée : 38 hm <sup>3</sup> -volume des dépôts : 40 à 100 hm <sup>3</sup> -vitesses : 64 km/h -38 km de distance parcourue depuis la source -25 m de hauteur de boue à Blitar (situé à 24 km de la source) -durée: 45 mn	-5 110 personnes tuées -104 villages détruits totalement ou partiellement -131 km <sup>2</sup> recouverts	
Coulée de débris	1921 Alma-Ata (République Kazakh)	COMITTEE ON GROUND FAILURES HAZARDS 1985 Yesenov & Degovets 1982		- 500 morts	
Coulée consécutive à glissement	29/11/1926 Roquebillière Alpes Maritimes (France)	FLAGEOLLET 1989 BENEVENT <i>et al.</i> 1927 MENEROUD 1976	-coulée survenant 4 jours après le glissement -durée:3 jours -vitesse: 5 m/24 h	-ensevelissement de 10 maisons et du reste de la Mairie	
"Lahar" généré par des mélanges de neige et de glace accompagnant une éruption volcanique	1926 Mt Tohaki-dake Cité de Kami-Hurano (Japon)	NEALL 1976 Kuno 1962 Murai 1960	-vitesse : 180 km/h	-144 personnes tuées (noyades) -29 km <sup>2</sup> inondés	
Coulée boueuse	1931 Chatelard en Bauges Savoie (France)	D.R.M. 1988	-volume : 6 hm <sup>3</sup>	-destruction de plusieurs hameaux	
Coulée de débris générée par pluies torrentielles	07/1938 Kobe (Japon)	COMITTEE ON GROUND FAILURES HAZARDS 1985 Nakano <i>et al.</i> 1974		- 450 à 600 victimes - destruction de plus de 100 000 maisons	

Coulée de débris ("aluvion") générée par la vidange d'un lac morainique	1941 Huaraz Cordillère Blanche (Pérou)	SAURET 1987 Lliboutry <i>et al.</i> 1977		-5 000 personnes tuées -destruction en partie de la ville d'Huaraz	
Coulée boueuse	1943 Bellevaux Haute Savoie (France)	D.R.M. 1988	-volume : 2 hm <sup>3</sup> ->barrage de la vallée et création d'un lac naturel de 1 hm <sup>3</sup>		
Coulée de débris	13/12/1947 Huaraz Cordillère blanche (Pérou)	USSELMANN 1994		-6 000 morts -destruction de toute la partie basse de la ville de Huaraz	
Coulées de débris de volume exceptionnel	18/01/1951 La Guaira Graben de Caracas (Venezuela)	SAURET 1987 Singer 1977	-volume : 15 hm <sup>3</sup> en une seule journée	-modification de la ligne de rivage -dévastation du port de La Guaira	
"Lahar" généré par la vidange d'un lac de cratère volcanique	24/12/1953 Mt Ruapehu Cité de Tangiwai (Caraïbes)	NEALL 1976 Healy 1954 O'Shea 1954	-340 000 m <sup>3</sup> d'eau libérée empruntant un canal de 32 m de large et de 6.7 m de profondeur -vitesse : 16 km/h à Tangiwai: -6m d'épaisseur -850 m <sup>3</sup> /s de débit maximum -densité du flux: 1.4 kg/m <sup>3</sup>	-transport sur 140 m de blocs en béton de 5 tonnes en provenance d'un pont de chemin de fer -transport sur 64 m d'un pilier de 125 tonnes se retrouvant avec un centre de gravité 2m plus haut qu'à l'origine -transport sur 2,4 km de 3 wagons d'un train ayant plongé dans le torrent	
Coulée de débris générée par avalanche glaciaire	1962 Mont Huascaran Ranrahirca (Pérou)	SAURET 1987 Dollfus <i>et al.</i> 1962	-transport de blocs de plus de 3 000 m <sup>3</sup>	-4 000 personnes tuées -destruction du village de Ranrahirca	
Coulée de boue générée par de fortes précipitations	09/1963 Mt Agung Bali (Indonésie)	NEALL 1976 Zen & Hadikisumo 1964		-200 personnes tuées -dévastation de riches terres agricoles par des graviers grossiers	
Coulée de boue générée par de fortes précipitations	09/12/1963 Mt Irazu Rio Reventado Cité de Cartago (Costa Rica)	MORA 1991  NEALL 1976 Waldron 1967 Ulate & Corrales 1966	-débit: 407 m <sup>3</sup> /s -12 m de hauteur	-20 personnes tuées -dévastation de 3km <sup>2</sup> adjacents à Cartago -destruction de 300 habitations  <i>Dégâts estimés à 3,5 MS US</i>	
"Lahar" généré par des mélanges de neige et de glace accompagnant une éruption volcanique	1964 Villarica (Chili)	NEALL 1976 Katsui 1967		-25 personnes tuées	
Lave torrentielle	1965 Pontamafrey Savoie (France)	SAURET 1987 Goguel 1968 Azimi <i>et al</i> 1974	-volume : 3 hm <sup>3</sup> -présence de blocs de 10 m <sup>3</sup>  -> obstruction partielle de la vallée de l'Arc	-coupures de la route nationale R.N.6 et de la voie ferrée.	-perturbations des trafics internationaux France-Italie, ferroviaires et routiers, durant deux semaines
Coulée de débris d'extension catastrophique générée par éroulement de roches et de glace provoqué par séisme de magnitude 7.7	31/05/1970 Nevados de Huascaran Yungay (Pérou)	CROZIER 1986 Zapata Luyo 1977  FLAGEOLLET 1989 Plafker & Erickson 1978  COUREL 1980  USSELMANN 1994	- <i>"Le point de départ du phénomène se situe au pic de Huascaran (6654 m), où la granodiorite est coiffée par un ice cap de plus de 30 m d'épaisseur) et où le 31 Mai, les secousses d'un séisme de 7,7 de Magnitude (8,6 sur l'échelle de Richter), qui ont duré environ 45 secondes ont déclenché l'effondrement de la face Nord fissurée par un système de joints parallèles et la chute verticale, sur 900 m de 50 à 100 hm<sup>3</sup> de roches et de glace. Cet effondrement, accompagné d'un nuage de neige et de poussière noire à la base du pic, a été entendu loin, comme le bruit d'une explosion. Les rochers et débris de glace sont tombés sur un glacier (glacier 511) en pente très raide, sur lequel ils ont glissé sur une distance de 2,4 km et où ils ont été incorporés à un volume important de neige qui a fourni la plus grande partie de l'eau pour la boue et les débris déposés plus bas; l'avalanche s'est produite à la fin de la saison humide quand l'accumulation de neige sur le glacier était à son maximum annuel (environ 28 m d'épaisseur à 5 800 m, plus le névé, entre neige et glace, soit un volume énorme équivalent en eau de 6 hm<sup>3</sup>).</i>	-23 000 personnes tuées, ensevelies sous 10 m de boue.	



			<p><i>La partie moyenne du trajet comporte une zone topographiquement accidentée dans laquelle le déplacement des débris s'est fait par glissements, sauts, bonds, où les talus et les crêtes ont été rabotés ou sillonnés, puis une vallée resserrée, en dessous de la confluence Shacsha-Incayoc, dans laquelle les débris ont fusionné en une masse unique, une avalanche de débris d'environ 80 m d'épaisseur, rapide (aux environs de 300 km/h). Les zones contiguës à cette partie moyenne du trajet ont été éclaboussées par la boue et frappées par des projectiles rocheux lancés loin de l'avalanche; la portée maximum des blocs a été jusqu'à 4 km. Blocs et boue ont été accompagnés d'un puissant déplacement d'air, des gens ont été projetés à terre et griffés par la boue. Atteignant l'interfluve proéminent qui sépare la vallée de Yungay et celle du Shacsha, l'avalanche s'est partagée en deux branches.</i></p> <p><i>Le lobe d'avalanche de Yungay, était très épais et large de plus de 500 m et arriva à environ 270 km/h dans le Rio Santa. Cette avalanche s'est faite en deux vagues successives dont la deuxième, au dire des survivants, était haute comme dix étages, et était assez fluide pour couler encore pendant 3 ou 4 jours. La masse principale a constitué le lobe de Ranrahirca, étalé sur une région déjà dévastée en 1962, encore peu réoccupée. Le Rio Santa, complètement barré pendant une demi-heure par les deux avalanches, a charrié des débris pendant 9 jours."</i></p> <p>-des blocs de 7 000 tonnes transportés -volume total : entre 50 et 100 hm<sup>3</sup> -vitesses : 120 à 360 km/h suivant les secteurs -extension totale : 15 km -largeur variant de 800 m au sommet à 4 000 m à la base -surface couverte : 22,5 km<sup>2</sup></p>	-ensevelissement de 3 villages puis de la ville de Yungay sous au moins 10 m de débris	
"Lahar" généré par des mélanges de neige et de glace accompagnant une éruption volcanique	1971 Villarica (Chili)	NEALL 1976 Gonzales-Ferran 1973		-15 personnes tuées	
"Lahar" généré par des mélanges de neige et de glace accompagnant une éruption volcanique	1971 Mt Hudson (Chili)	NEALL 1976 Tobar 1973		-3 personnes tuées	
"Lahar" généré par la vidange d'une cavité intraglacière de sommet de cratère volcanique	24/04/1975 Mt Ruapehu (Caraïbes)	NEALL 1976 Nairn 1975	-1,5 hm <sup>3</sup> d'eau libérée	-destruction d'adductions d'eau, de remontées mécaniques -inondation d'un tunnel hydroélectrique en construction	
Coulées de boue générées par éruption volcanique	05/1980 Mont St Helens Etat de Washington (U.S.A)	CROZIER 1986 SOUSA & VOIGHT 1991	-volume : 2,8 km <sup>3</sup> -vitesse : 50 à 70 m/s et 70-80 m/s (max) -distance : 25 km	-endommagement ou destruction de: *200 bâtiments *44 ponts *3 campings -ensevelissement de: *27 km de voies ferroviaires *200 km de routes	
Lave torrentielle	31/03/1981 Torrent de la Ravoire Bourg St Maurice Savoie (France)	FLAGEOLLET 1989	-volume:100 000 m <sup>3</sup> en 24 h sur un total de 300 000 m <sup>3</sup> déversés en 14 jours	-dégâts considérables: *barrages affouillés *routes coupées *ligne de chemin de fer ensevelie *un pont SNCF emporté *plusieurs routes et chemins coupés  50 MFF de dégâts au total	-remise en question du développement de la station touristique des Arcs

Coulée de débris générée par de fortes précipitations	09/07/1981 Torrent du Verdarel Saint-Chaffrey Station de ski de Serre-Chevalier Hautes-Alpes (France)	COLAS 1987	-volume: 10 à 15 000 m <sup>3</sup> -débit: 30 m <sup>3</sup> /s -présence de nombreux gros blocs charriés	-endommagement de plusieurs bâtiments -destruction du pont de la R.N. 91	
Avalanche de débris	04/01/1982 Oddstad boulevard Pacifica Sud de San Francisco Californie (U.S.A)	FLAGEOLLET Schhemon <i>et al</i> 1986	-volume: 3000 m <sup>3</sup> -vitesse: 40 km/h	-2 personnes tuées (enfants) -destruction de deux maisons	
Avalanche de débris déclenchée par séisme de magnitude 6,8	1984 Ontake (Japon)	SASSA 1988 SOUSA & VOIGHT 1991	-volume : 34-37 hm <sup>3</sup> -vitesse : 20-26 m/s et 36 m/s (max) -distance : 11,6 km		
Coulée de boue	07/1985 Thesero (Italie)	GOUD 1994		-264 morts	
"Lahar" généré par la fonte des glaces sommitales consécutive à une reprise de l'activité volcanique	13/11/1985 Mt Nevado del Ruiz Rio-Lagunilla Cité d'Armero (Colombie)	VIE LE SAGE 1989		-environ 25 000 personnes tuées	
Coulée de boue générée par des pluies torrentielles	11h45 le 27/08/1987 Torrent du St Antoine Modane Savoie (France)	Ville de Modane, bulletin municipal 1988  LEDOUX 1989	<i>"le torrent charrie d'énormes quantités de pierres et des blocs de rochers de plusieurs tonnes"</i> <i>"formation d'un bouchon sous le pont de la route N.6 et une énorme vague déferle par la rue Gambetta et la R.N."</i>  -le phénomène est rapide: *à 11h45, le torrent déborde. *à 12h15, le débit du torrent décline. *à 12h30 tout est "consommé", néanmoins le débit reste élevé et hors de son lit, complètement rehaussé, il entraîne encore des alluvions dans plusieurs directions.	<i>**le garage de la RDTS résiste mais la boue l'envahit entièrement en pénétrant par toutes les fenêtres et interstices, les cars y sont soulevés comme des fétus de paille tandis que les véhicules garés à l'extérieur sont broyés"</i> <i>**sur la rive droite, un coup de boutoir gigantesque transperce la menuiserie Cometto et Rizotti"</i> <i>**le pont des "Tufs" récemment consolidé, situé plus en amont, est pulvérisé"</i> <i>*ensevelissement des trottoirs et jardins</i>  Bilan des habitations privées et des bâtiments industriels et commerciaux endommagés: *1 bâtiment industriel détruit entièrement. *1 atelier garage commercial détruit entièrement. *1 atelier industriel partiellement détruit. **1 bâtiment industriel partiellement détruit. *1 bâtiment commercial endommagé gravement. *1 garage entièrement détruit. *10 entrepôts et ateliers endommagés. *7 rez-de-chaussée et caves inondés. *75 garages et caves touchés.  <i>-coûts directs des dommages aux bâtiments:</i> <i>-particuliers: 11248 KFF</i> <i>-entreprises: 24948 KFF</i> <i>-artisans: 2231 KFF</i> <i>-commerçants: 750 KFF</i> <i>-divers: 1675 KFF</i> <i>total: 40 988 KFF</i> <i>-coûts des déblaiements et de nettoyage (voirie, propriétés privées et lit du torrent): 4900 KFF.</i> <i>-coûts estimés par la commune pour sa voirie, ses ponts et ses réseaux: 2900 KFF.</i>	-la R.N. a du être déviée pendant plusieurs jours (gêne surtout importante pour les poids lourds)
Coulées de boue générées par séisme	06/06/1994 Toez, Irlanda Provinces du Cauca et du Huila (Colombie)	Journal "Le Monde", Mercredi 8 Juin 1994.	Trois secousses telluriques se sont succédées à trois minutes d'intervalle générant des glissements et des coulées de boue	-215 morts et 500 disparus -2 000 personnes restées sans abri. -plusieurs maisons, ponts et routes détruits par la boue	

NATURE ET ORIGINE DES PHÉNOMÈNES	DATE ET LOCALISATION	SOURCES	CARACTÉRISTIQUES DES PHÉNOMÈNES (principaux et induits)	CONSEQUENCES DIRECTES	CONSEQUENCES INDIRECTES
Eboulement d'extension catastrophique Coulée de débris	Préhistorique Rockslide Pass Mac Kenzie Mountains (Canada)	COUREL 1980 Eisbacher 1978	-volume : 450 hm <sup>3</sup> -surface : 1290 ha -sur plan incliné de 13° -coulée de débris de 4,5 km de long sur un substratum incliné de 3° dans le sens du déplacement		
Eboulement catastrophique d'extension	Préhistorique Flims Grisons (Suisse)	COUREL 1980 Heim 1932	-volume : 12 000 hm <sup>3</sup> -surface : 5 200 ha -distance : 14 km		
Eboulement catastrophique d'extension	Préhistorique Langtang Himal (Népal)	COUREL 1980 Masch & Preuss 1974	-volume : 3 000 hm <sup>3</sup> -surface : 3 000 ha		
Eboulement catastrophique d'extension	Préhistorique Kofels Tyrol (Autriche)	COUREL 1980 Abele 1974 Erismann 1979	-volume : 2 100 hm <sup>3</sup> -surface : 1 200 ha -distance : 6 km		
Eboulement catastrophique d'extension	Préhistorique Engelberg	COUREL 1980 Arbenz 1913 Heim 1932	-volume : 2 000 à 3 000 hm <sup>3</sup> -surface : 900 ha		
Eboulement catastrophique d'extension	Préhistorique Siders	COUREL 1980 Heim 1932	-volume : 1000 à 2000 hm <sup>3</sup> -surface : 2 800 ha -distance : 17-18 km		
Eboulement catastrophique d'extension	Préhistorique Tamins Grisons (Suisse)	COUREL 1980 Pavoni 1968 Scheller 1968	-volume : 1300-1500 hm <sup>3</sup> -surface : 1 500 ha -distance : 5,8 km		
Eboulement catastrophique d'extension	Préhistorique Downie Slide (Canada)	COUREL 1980 Piteau <i>et al</i> 1978	-volume : 1 000 hm <sup>3</sup> -surface : 900 ha -distance : 3,7 km		
Eboulement catastrophique d'extension	Préhistorique Fernpass Tyrol (Autriche)	COUREL 1980 Heim 1932 Abele 1974	-volume : 1 000 hm <sup>3</sup> -surface : 1 450 ha -distance : 10-15 km		
Eboulement catastrophique d'extension	Préhistorique Kandertal	COUREL 1980 Turnau 1906	-volume : 900-850 hm <sup>3</sup> -surface : 680 ha -distance : 12,5 km		
Eboulement catastrophique d'extension	Préhistorique Glarnisch Berne (Suisse)	COUREL 1980 Heim 1932	-volume : 800 hm <sup>3</sup> -distance : 5 km		
Eboulement catastrophique d'extension	Préhistorique Chironico Tessin (Suisse)	COUREL 1980 Schardt 1910	-volume : 600 hm <sup>3</sup> -surface : 300 ha -distance : 6 km		
Eboulement catastrophique d'extension	Préhistorique Kerns Obwald (Suisse)	COUREL 1980 Heim 1932 Abele 1974	-volume : 600 hm <sup>3</sup> -surface : 800 ha -distance : 4 km		
Eboulement catastrophique d'extension	Préhistorique Parpan Grisons (Suisse)	COUREL 1980 Abele 1974 Heim 1932	-volume : 400-100 hm <sup>3</sup> -surface : 800 ha -distance : 5 km		
Eboulement catastrophique d'extension	Préhistorique Black Hawk Californie (USA)	COUREL 1980 Johnson 1978	-volume : 400-300 hm <sup>3</sup> -surface : 1 400 ha -distance : 7 km		
Eboulement catastrophique d'extension	Préhistorique Sylver Reef	COUREL 1980 Schreve 1968	-volume : 220 hm <sup>3</sup>		
Eboulement catastrophique d'extension	Préhistorique Bormio (Italie)	COUREL 1980 Heim 1932	-volume : 180 hm <sup>3</sup> -surface : 400 ha -distance : 3,5 km		
Eboulement catastrophique d'extension	Préhistorique Nafels Canton de Glaris (Suisse)	COUREL 1980 Oberholze 1900	-volume : 160-120 hm <sup>3</sup> -surface : 290 ha -distance : 6 km		

Eboulement catastrophique	d'extension	Préhistorique Poschiavo	COUREL 1980 Heim 1932 Abele 1974	-volume : 150 hm <sup>3</sup> -surface : 100 ha -distance : 3,8 km		
Eboulement catastrophique	d'extension	Préhistorique Cima di Saoseo Grisons (Suisse)	COUREL 1980 Heim 1932	-volume : 150-80 hm <sup>3</sup> -distance : 5,5 km		
Eboulement catastrophique	d'extension	Préhistorique U. turn Slide Mac Kenzie Mountains (Canada)	COUREL 1980 Eisbacher 1978	-volume : 65 hm <sup>3</sup> -surface : 451 ha -distance : 6 km		
Eboulement catastrophique	d'extension	Préhistorique Nozzle Slide Mac Kenzie Mountains (Canada)	COUREL 1980 Eisbacher 1978	-volume : 50 hm <sup>3</sup> -surface : 399 ha -distance : 6,9 km		
Eboulement catastrophique	d'extension	Préhistorique Dam Slide Mac Kenzie Mountains (Canada)	COUREL 1980 Eisbacher 1978	-volume : 45 hm <sup>3</sup> -distance : 1,2 km		
Eboulement catastrophique	d'extension	Préhistorique Voralpsee	COUREL 1980 Heim 1932 Abele 1974	-volume : 30-40 hm <sup>3</sup> -surface : 85 ha		
Eboulement catastrophique	d'extension	Préhistorique Triple Slide Mac Kenzie Mountains (Canada)	COUREL 1980 Eisbacher 1978	-volume : 35 hm <sup>3</sup> -surface : 300 ha -distance : 3,3 km		
Eboulement catastrophique	d'extension	Préhistorique Twin Slide (Canada)	COUREL, 1980 Eisbacher, 1978	-volume : 20 hm <sup>3</sup> -surface : 178 ha -distance : 4,7 km		
Eboulement catastrophique	d'extension	Préhistorique Damocles Slide (Canada)	COUREL, 1980 Eisbacher, 1978	-volume : 20 hm <sup>3</sup> -surface : 100 ha -distance : 3,2 km		
Eboulement catastrophique	d'extension	Préhistorique Schaky Slide Mac Kenzie Mountains (Canada)	COUREL, 1980 Eisbacher, 1978	-volume : 10 hm <sup>3</sup> -distance : 2,2 km		
Eboulement catastrophique	d'extension	Préhistorique Saidmarrech (Iran)	COUREL 1980 Harrison & Falcon 1938	-volume : 20 000 hm <sup>3</sup> -surface : 16 500 ha -distance : 18-19 km		
Eboulement catastrophique	d'extension	-5 à -10 000 ans La Madeleine Lanslebourg Savoie (France)	D.R.M. 1988 COUREL 1980	-volume : 200 à 250 hm <sup>3</sup> -surface : 230 ha -distance : 4 km ->obstruction de la vallée de l'Arc		
Ecroulement d'extension catastrophique	rocheux	1248 Mont Granier Savoie (France)	D.R.M. 1988 PACHOUD 1990  FLAGEOLLET 1989	-volume compris entre 300 et 500 hm <sup>3</sup> -surface couverte de 23 km <sup>2</sup> -épaisseur des accumulations variable: atteint plusieurs dizaines de m à l'amont, dans les essarts, beaucoup plus faible à l'aval. -effet de souffle probablement énorme -extension de 7 km dont 3 km en plaine  - "Avant d'être disloqués, les blocs du Mont Granier ont peut être d'abord glissé sur un joint de stratification, incliné seulement de 12°, dans le Valanginien argilo-calcaire, grâce à un phénomène de vaporisation. Mais ce qui semble devoir expliquer, en contrebas, la distance franchie et l'avancée dans la plaine, c'est probablement une lubrification de l'ensemble par l'eau des pluies, les blocs écroulés s'étant mélangés aux marnes valanginiennes, et c'est ce mélange de blocs calcaires et de boue argileuse qui s'est déplacé très vite. Il n'y a pas cependant de preuve qu'un séisme aurait pu entretenir le mouvement. "	-2000 à 5000 personnes tuées -destruction de 5 villages dont celui de Myans -ensevelissement de 16 hameaux et du village de Saint-André	
Eboulement déclenché par séisme		0/1348 Villach (Autriche)	MUNCHENER RUCK 1988		-5 000 morts	

Eboulement	1499 Lambach/Oberland bernois (Suisse)	MUNCHENER RUCK 1988		-399 morts	
Eboulement	Septembre 1515 Biasca (Suisse)	MUNCHENER RUCK 1988		-600 morts	
Glissement de terrain	03/1584 La tour d'Aj Village d'Yvorne (Suisse)	FLAGEOLLET 1989		-328 personnes tuées -destruction du village d'Yvorne	
Ecrolement	06/02/1644 Tondon Alpes Maritimes (France)	D.R.M. 1988		-140 personnes tuées	
Eboulement	07/1669 Salzbourg (Autriche)	MUNCHENER RUCK 1988		-300 morts	
Eboulement catastrophique	d'extension 1683 Disentis Grisons (Suisse)	COUREL 1980 Heim 1932	-volume : 10-20 hm <sup>3</sup> -surface : 800 ha -distance : 2 km		
Eboulement catastrophique	d'extension 1714 et 1749 Diablerets	COUREL 1980 Heim 1932 Abele 1974	-volume : 50 hm <sup>3</sup> -distance : 2,2 km		
Eboulement	1751 Dérochoir Assy Savoie (France)	D.R.M. 1988	-volume : 20 hm <sup>3</sup> ->obstruction de la vallée de l'Arve		
Eboulement catastrophique	d'extension 1806 Goldeau (Suisse)	COUREL 1980 Heim 1932 De Saussure 1806	-volume : 30-40 hm <sup>3</sup> -surface : 300-400 ha -distance : 3 km dont 1,5 km pour la coulée		
Eboulement	1814 Antelao/Dolomites (Italie)	MUNCHENER RUCK 1988		-260 morts	
Eboulement catastrophique	d'extension 1875 Le Gros Morne	COUREL 1980	-volume : 18 hm <sup>3</sup> -surface : 22 ha -distance : 2 km		
Ecrolement d'extension catastrophique consecutif à une extraction de matériaux en pied de falaise	1881 Elm Canton de Glaris (Suisse)	FLAGEOLLET 1989 Heim 1932 COUREL 1980	-volume : 10 hm <sup>3</sup>  - <i>"Le mouvement initial fut le glissement d'une masse rocheuse sur une surface de rupture indépendante de la stratification, inclinée à 41° vers la vallée, mais la masse se disloqua en atteignant le plancher de la carrière; les blocs effectuèrent alors un saut horizontal de plusieurs centaines de m et, atteignant le fond de la vallée, se réunirent en un gigantesque "écoulement" de blocs, qui s'est étendu sur 1,5 km de long et 400 à 500 m de large..."</i> - <i>"des témoins ont parlé d'un écoulement de blocs, sur 1,5 km, en moins d'une minute, soit une vitesse moyenne de 180 km/h.</i> - <i>"la morphologie ressemble à celle d'une coulée de lave, ou d'une moraine, avec des ondulations transverses et des convexités, des rides de bourrage, tournées vers l'aval, des limites nettes. L'explication la plus vraisemblable est celle d'un écoulement turbulent de blocs dans une phase fluide composée d'air, de débris et de poussière".</i>	-115 personnes tuées -destruction de Untertal et d'une partie de Elm -une canalisation d'eau située à 1 m de profondeur est arrachée et déplacée de 1 km. -des maisons ont été cisailées au niveau de la jonction fondations-superstructures et déplacées vers l'aval. -un témoin se trouvant en bordure de la coulée de blocs a été enseveli jusqu'au cou sans dommages corporels, ce qui suggère une très faible vitesse d'impact (Courel, 1980).	
Eboulement catastrophique	d'extension 1903 Frank Alberta (Canada)	COUREL 1980 Cruden & Krahn 1978	-volume : 30 hm <sup>3</sup> -surface : 270 ha -distance : 4 km		
Eboulement catastrophique	d'extension 02/1911 Pamir	COUREL 1980 Harrison & Falcon 1938	-volume : 2 000 hm <sup>3</sup> -surface : 1 035 ha -distance : 6,7 km		

Eboulement	1919 Montagnieu Ain (France)	LEDOUX 1989	-impacts et accumulations	-destruction d'une partie du village (maisons d'habitation, réseau d'eau potable, école, ainsi qu'une partie de la production viticole).	-à l'époque le village n'a reçu aucune aide de l'État et les conséquences économiques de cet événement ont fait prendre un retard important au développement de la commune.
Eboulement d'extension catastrophique	23/06/1925 Lower Gros Ventre Wyoming (U.S.A.)	ALDEN 1928 VOIGHT 1978	-volume : 40 hm <sup>3</sup> -distance : 3,5 km -distance parcourue : 1 à 2 km -vitesse : 180 km/h (reconstituée) -durée : une minute environ	-> formation d'un barrage sur la rivière Gros Ventre, avec formation d'un lac de retenue de 5 km.  --> rupture partielle du barrage deux ans plus tard (18/05/1927) avec écoulement brutal de 60 millions de m <sup>3</sup> d'eau dans la vallée : destruction d'un village et mort de 6 personnes en aval.	
Eboulement et raz de marée	1936 Nordfjord (Norvège)	MUNCHENER RUCK 1988		-73 morts	
Eroulement d'une masse rocheuse dans une baie engendrant une vague destructrice	1958 Baie Lituya Alaska (U.S.A.)	FLAGEOLLET 1989	-> vague destructrice:	-2 personnes tuées -destruction de la forêt le long du rivage -retournement de bateaux de pêche	
Eboulement d'extension catastrophique	1963 Little Tahoma Peak (USA)	COUREL 1980 Fahnestock 1978	-volume : 11 hm <sup>3</sup> -surface : 500 ha		
Eboulement d'extension catastrophique	1964 Sherman Glacier (USA)	COUREL 1980 Mac Savaney 1978	-volume : 10 hm <sup>3</sup> -distance : 2,2 km		
Chutes de blocs	1964-65 Plan du Var Alpes Maritimes (France)	LEDOUX 1989	-impacts de blocs	-rupture du canal de la Vésubie faisant des victimes.	
Eboulement d'extension catastrophique	1965 Hope Col. Brit. (Canada)	COUREL 1980 Mathews & Mc Taggart 1978 Bruce & Cruden 1977	-volume : 47 hm <sup>3</sup> -surface : 265 ha -distance : 2,8 km		
Eroulement de falaise fragilisée par les aménagements humains (création de terrasses à flanc de coteau, dégagement du pied de la falaise pour la construction d'habitations troglodytes ou non)	1971 Rue des Roches Auvers sur Oise Val-d'Oise (France)	LEDOUX 1989	-impacts (éboulement depuis falaise calcaire de 20 m de haut).	-une personne tuée -destruction d'une habitation modeste où se trouvait l'unique occupante tuée.	-cet événement ne donne lieu à aucune indemnisation. La mairie émet des avis d'expulsion à quatre habitations voisines de l'accident, se dégageant ainsi toute responsabilité. Les habitants ne déménagent pas et n'entreprennent pas de protection.
Eboulement d'extension catastrophique	04/1974 Mayunmarca	COUREL 1980 Kojan & Hutchinson 1978	-volume : 1 000 hm <sup>3</sup> -distance : 8,25 km		
Chutes de blocs	1977 Aigueblanche Savoie (France)	D.R.M. 1988		-1 personne tuée	
Eroulement rocheux	22/03/1977 Versant méridional du Mont Piezza Valbiore Val Masino (Valtellina) Province de Sondrio (Italie)	DUTTO 1992		-destruction par ensevelissement d'une vingtaine de maisons du village de Valbiore	
Eroulement de falaise fragilisée par les aménagements humains (création de terrasses à flanc de coteau, dégagement du pied de la falaise pour la construction d'habitations troglodytes ou non)	1980 Auvers sur Oise Val-d'Oise (France)	LEDOUX 1989	- volume : 1400 m <sup>3</sup> .	-deux habitations sont en partie détruites, sans accident de personnes. L'une est rasée, l'autre reconstruite.  <i>coûts de 450 KFF qui seront supportés en totalité par les propriétaires.</i>	-forte émotion chez les riverains qui se mobilisent et créent l'association "S.O.S Falaise".

Ecroulement de falaise littorale	Depuis de nombreuses décennies et 1980 Ault Somme (France)	LEDOUX 1989	-déplacements verticaux instantanés -vitesse : recul moyen de la falaise de 70 cm/an  1980: -nouvel écroulement	-destruction de nombreuses habitations  -le route parallèle au rivage reliant l'agglomération principale à son annexe d'Ornival se retrouve à seulement 4 m de la crête de la falaise ainsi que son cortège de réseaux (assainissement, conduites électriques).	-un arrêté de prise en charge est pris et plusieurs maisons sont abandonnées et détruites (surtout des résidences secondaires).
Ecroulements de falaise	1983 Village d'Asques Gironde (France)	LEDOUX 1989	-impacts et accumulations: (éboulement d'une partie de la falaise calcaire dominant le village).	-dégâts minimes dans des jardins privés  <i>le total des dépenses s'élève à 388 KFF, soit 38 % du budget de fonctionnement de 1987 ou 100 % des impôts locaux de la même année.</i>	-l'évènement mobilise la commune qui prend un arrêté général de police interdisant l'accès aux zones les plus dangereuses.
Chutes de blocs depuis une falaise fragilisée par des habitats troglodytes et des caves aménagées.	02/1986 Cadenet Vaucluse (France)	LEDOUX 1989	-impact d'un bloc de 5 tonnes sur la chaussée depuis un escarpement rocheux (sables gréseux et molasses) de 40 à 60 m de haut dominant la ville.	-destruction d'une voiture.	-la prise d'un arrêté municipal permet l'évacuation d'une habitation (habitants relégués par la commune), l'interdiction d'accès à plusieurs garages mitoyens et à la circulation dans la rue, jusqu'à réalisation de "travaux de mise en sécurité absolue".
Chute de bloc	04/1986 Route (C.D. 902) reliant Bourg St Maurice à Val d'Isère Savoie (France)	D.R.M. 1988 MALATRAIT & MESSIN 1988	-impact d'un bloc de 60 tonnes	-une voiture écrasée -4 personnes tuées	
Chute de bloc	02/1989 Route du Col-du-Rousset Diois Drôme (France)	Dauphiné Libéré	- impact d'un bloc de 150 kg (80 cm * 45 cm)	- 2 enfants passagers d'un car tués	
Ecroulement de glacier	22h45 le 06/07/1989 Glacier supérieur de Coolidge Paroi nord du Mont Viso Alpes occidentales (Italie)	DUTTO 1991	-volume : 200 000 m <sup>3</sup> -masse cunéiforme large de 150 m, longue de 120 lm et haute de 35 m maximum. -masse éboulée (départ à 3195 m) remonte de 50 m de dénivellation le versant opposé.	-comblement d'un lac d'altitude (2261 m) -le sentier très fréquenté en été permettant de relier le Pian del Re au refuge Quintino Sella est emporté sur 600 m de long	
Ecroulement rocheux déclenché par séisme	3h30 le 24/11/1991 Versant méridional du Mont Piezza Valbiore Val Masino (Valtellina) Province de Sondrio (Italie)	DUTTO 1992	-volume : 60 000 m <sup>3</sup>  -> obstruction du torrent Bisolo par un barrage de 25 m de hauteur et formation d'une retenue	-ensevelissement du petit hameau de Valbiore	

Ecoulement	18 et 19/04 et 09/05/1991  Randa Vallée de Mattertal Valais (Suisse)	GOUT 1994  NOVERRAZ & BONNARD 1991	Eboulement en 3 phases:  1ère phase: 18/04/1991 à 6h00 -volume : 6 à 7 hm <sup>3</sup> (blocs de 2 000 m <sup>3</sup> )  2nd phase: 19/04/1994 -nouvel éboulement de 100 000 m <sup>3</sup>  -> obstruction de la rivière et formation d'un lac de retenue  3ième phase: 10/05/1994 au soir -éboulement de 16 hm <sup>3</sup>  -->accroissement du lac	-village de Randa ne subit que des dégâts matériels : destruction de 7 chalets (granges à foin) ainsi que la ligne électrique du chemin de fer couchée par le souffle de l'écroulement. La voie ferrée, frôlée par l'écroulement n'est que déformée, la route reste intacte. -mort d'une trentaine de moutons et de 7 chevaux -une épaisse poussière blanche siliceuse recouvre toute la région  -destruction de 26 nouvelles maisons, dont plusieurs résidences secondaires. La voie ferrée est recouverte sur 800 m et la route partiellement sur 200 m.  -inondation de la centrale d'épuration des eaux usées de Randa et d'un tronçon de ligne de chemin de fer. Le 17/06, suite à de grosses pluies d'orage, le niveau du lac monte brutalement noyant une trentaine de maisons de Randa, dont la gare, submergeant et mettant hors service les pompes fixes installées par l'armée.	-voie ferrée rétablie rapidement       -Les travaux de reconstruction de la route et de la voie ferrée (accès à Zermatt), selon des tracés plus éloignés du cône d'écroulement, débutent aussitôt et la nouvelle route est construite sur 1 km en 15 jours.  -un pont routier flottant de plus de 500 m de long, préventivement installé par l'armée entre alors en fonction -creusement d'un tunnel hydraulique de 6,5 m de diamètre et de 3,6 km de long pour évacuer les eaux de la Vispa.
------------	---	---	---	---	---



NATURE ET ORIGINE DES PHÉNOMÈNES	DATE ET LOCALISATION	SOURCES	CARACTÉRISTIQUES DES PHÉNOMÈNES (principaux et induits)	CONSEQUENCES DIRECTES	CONSEQUENCES INDIRECTES
Tassement lié à des sols compressibles	Depuis 1173 Tour de Pise Pise (Italie)	FLAGEOLLET 1989	-tassements différentiels dès la construction du 1er étage: *2 mm/an vers 1690 *1 mm/an entre 1800 et 1900 *moins de 1 mm/an depuis -le tassement différentiel se produit dans les couches sous-jacentes faites de sables argileux surmontant des argiles.	-inclinaison du bâtiment : haut de 54,10 m, l'écart à la verticale est de 5 m 58 au sommet. -des tassements de ce genre, moins accusés, affectent aussi d'autres bâtiments de Pise à proximité de la tour	
Affaissement lié à l'extraction de sel par dissolution en profondeur	Depuis 1900 Lünebourg Basse Saxe	FLAGEOLLET 1989	-amplitude des déplacements verticaux atteint aujourd'hui 2m	-dégâts occasionnés aux immeubles considérables au point que de 1949 à 1973, 169 immeubles ont dû être démolis.	
Affaissement consécutif au pompage des eaux souterraines et inondations induites	Depuis 1900 Houston Galveston Texas (U.S.A.)	FLAGEOLLET 1989	-déplacements verticaux de plus de 2m de plusieurs secteurs sur la côte -cuvette d'affaissement de plus de 60 km de diamètre  -> augmentation des risques d'inondation des terres basses et des risques d'inondation par les vagues de tempêtes soulevées par les hurricanes:	-Galveston 1900: inondations par vagues de tempêtes: 6 000 personnes tuées	
Affaissement lié à une baisse de la surface piézométrique	Depuis 1900 Santa Clara Valley Santa Clara County California (U.S.A.)	FOWLER 1981	-déplacements verticaux très graduels de: *1,2 m entre 1912 et 1932. *0,3 m à 2,4 m (San Jose) entre 1934 et 1967.  -surface concernée estimée à 62 000 ha.  ->venues d'eaux salées  ->zones dépressives demeurent inondées	-dommages structuraux aux bâtiments  -puits d'eau compressés et tordus surtout entre 60 et 100 m de profondeur à cause de l'hétérogénéité du champ des contraintes (la base des puits repose sur une formation stable, tandis que les formations supérieures sédimentaires s'affaissent). -les puits peuvent également saillir en surface -250 puits affectés entre 1960 et 1965 (coût: 2 M\$)  -diminution de la capacité hydraulique des conduites et des égouts (réseau sanitaire)  ->routes et voies ferrées proches de la baie soumises aux flux d'eaux salées et douces qui entraînent des interruptions du trafic et une dégradation des revêtements  -destruction des digues par les flots coût: 113 M\$  -zone dépressives demeurent inondées  coût total direct en \$ 1979 sur l'ensemble de la zone subsidée: 131 M\$	-nécessite l'élargissement des conduites, la mise en place de réseaux parallèles ou de stations de pompage (coût: 1M\$)  -interruptions du trafic et dégradation des revêtements  -installation de stations de pompage et surcreusement des canaux d'évacuation  -perte de la vue sur la baie: préjudice esthétique considéré comme le principal désagrément de la subsidence. Inchiffrable monétairement.
Affaissement par surexploitation d'aquifère	Entre 1930 et 1960 Mexico (Mexique)	GOUT 1994	-Affaissement du sol citadin de 6 mètres		
Affaissement du au dégel du sous-sol	Entre 1948 et 1950 Région minière de Vorkouta (U.R.S.S.)	FLAGEOLLET 1989	-fonte du permafrost à de grandes profondeurs	-environ 130 des 165 bâtiments et immeubles étaient déformés, certains totalement détruits.	
Effondrement	1961 Clamart Hauts de Seine (France)	D.R.M. 1988		-21 personnes tuées	
Affaissement consécutif aux pompes pétrolières	1963 Barrage de Baldwin Hills Californie (U.S.A.)	FLAGEOLLET 1989	-déplacements verticaux	-déformations et rupture du barrage	

Affaissement lié à une exploitation minière	1973 Min de Farmington Comté de Marion Virginie (U.S.A)	FLAGEOLLET 1989	-déplacements verticaux	-endommagement en 7 mois, de 43 immeubles, des églises, une école, une cinquantaine de conduites d'eau, etc.	
Affaissement consécutif au pompage des eaux souterraines et inondations induites	Depuis ... 1975 et 1978. Bangkok (Thaïlande)	FLAGEOLLET 1989 Natalaya & Premchit 1981	-pompage de plus de 10 hm <sup>3</sup> d'eau chaque jour à partir de 11 000 puits: il en résulte une baisse des niveaux piézométriques et une augmentation des contraintes effectives, qui se traduisent par une compression des couches argileuses, et cette compression se répercute en surface, sur une vaste étendue dans la mesure où sous Bangkok, les aquifères sont interconnectés naturellement à partir de 200 m:  -En, 1980 l'affaissement était estimé à 50 cm dans le centre de Bangkok, et dans le secteur oriental de l'agglomération les déplacements verticaux atteignaient plus de 10 cm/an.	-la base de certains édifices profondément ancrés et, de ce fait, non touchés, se tient au dessus du niveau des rues ou des terrains avoisinants; comme le pompage entraîne un appel d'eau à l'aplomb des puits profonds, beaucoup de ceux ci sont épargnés par l'affaissement et leur margelle fait saillie et semble monter au dessus du sol.  -des quartiers entiers ont été inondés plusieurs semaines en 1975 et 1978, l'inondation interrompant le trafic, endommageant immeubles et rues.	-risques sanitaires -pertes économiques importantes.
Effondrement dans des matériaux sablonneux correspondant à une zone de remblaiement d'un ancien frontis vieux d'un quinzaine d'années (carrière souterraine de craie).	Entre 1978 et 1986 Saint Saulves Nord (France)	LEDOUX 1989	1978-1982: -4 déplacements verticaux instantanés (effondrements) de 20 m  Juin 1983: -déplacement vertical instantané de 20 m sur une surface de 70 m <sup>2</sup>	-effondrement de terrains en culture  -20 maisons et la route départementale sont menacées par des galeries de carrières souterraines découvertes autour de l'effondrement.	De Juillet à 85 à Janvier 1986: -confortement des maisons menacées par comblement des carrières (commune), le coût du relogement étant trop élevé (10 MFF) pour la commune. -confortement du C.D. (Département). -total des dépenses pris en charge par la commune: 2663 KFF.
Effondrement de cavité naturelle	20 h le 08/05/1981 Park Winter Orlando (U.S.A)		-100 m de diamètre -24 m de profondeur -durée:24 h	-engloutissement de: *1 maison *1 usine *2 rues *6 voitures -trafic interrompu pendant 1 mois	
Affaissement lié à des exploitations de sel triasique (par forages de dissolution)	Depuis 1982 Saint Nicolas Meurthe et Moselle (France)	LEDOUX 1989	-déplacements verticaux continus de 50 cm/an -volume mobilisé de 100 m <sup>3</sup> /jour.	-25 pavillons actuellement touchés sur les 200 exposés à long terme. -le centre sportif a du être démonté pour être installé à un autre endroit. <i>dégâts de 22 à 25 MFF (source Mairie et F.N.P.R.N.)</i>  -dégradation de la voirie, des égouts, des conduites de gaz et d'adduction d'eau.	-14 pavillons ne sont plus approvisionnés en gaz de ville à cause des risques induits par la détérioration des conduites.
Effondrement généralisé d'exploitation minière	1982 Ouest de Monrovia (Libéria)	CROZIER 1986 undro 1980-83		-200 personnes tuées	
Effondrement de cavités karstiques	1985 Vailhauquès (Hérault) (France)	LEDOUX 1989		-fissures sur dix maisons	-une maison est évacuée
Affaissement	02/1988 R.N. 112 Hérault (France)	LEDOUX 1989		-affaissement d'une chaussée <i>travaux de réfection s'élevant à 3 600 KFF</i>	

Fauchage de versant actif	Depuis 1975 La Clapière St Etienne-de-Tinée Alpes- Maritimes (France)	GOUT 1994 SOUSA & VOIGHT 1992	-50 hm <sup>3</sup> -100 ha -dénivelé de 600 m -pic de vitesse du mouvement en 1987 avec des valeurs de 10 cm/j -vitesse moyenne : 3m /an  ->menace d'obstruction de la vallée de la Tinée en aval de Saint-Etienne et de formation d'une retenue de 10 à 40 m de haut en 24 ou 36 heures suivant les hypothèses et notamment si le débit de la Tinée a un débit moyen. Ce délai se réduit à moins de 12 heures en période de forte crue probable à l'automne, compte tenu des conditions météo propres aux régions méditerranéennes.  Un effet de souffle entraînant des vitesses de 200 km/h est aussi à prévoir.	-menace pour les habitants de St Etienne de Tinée qui seraient submergés	-Surveillance active du site assurée par le ministère de l'équipement (CETE Nice); 6 millions de francs pour les investissements (équipement), 2.2 pour l'exploitation (au début) et 1.5 pour la maintenance.  -déviation de la route sur la rive opposée au glissement en 1985  -construction d'un tunnel hydraulique préventif de 2 800 m de long achevé en 1992.  -le propriétaire d'une scierie a pu être indemnisé à titre préventif au titre de la loi catastrophes naturelles: une première.
Tassement de versant actif	Depuis Les ruines de Séchilienne Isère (France)	J.P.GOUT 1994	- supérieur à 50 hm <sup>3</sup> -phénomène de tassement provoqué par une décompression du massif liée à la fonte des glaciers vers -10 000 ans -mécanisme de rupture intense et continu (contrôlé par la masse) qui n'affecte pas la base du versant. Vecteurs des déplacements très peu inclinés -mécanismes prévus: déformation à dominante verticale (affaissement), puis dilatation vers l'aval et légère rotation de l'ensemble.  ->menace d'obstruction de la vallée de la Romanche en aval de Séchilienne: un volume de 10 hm <sup>3</sup> serait suffisant. Selon l'hypothèse d'éboulement retenue, qui varie selon le volume et la localisation de la zone de rupture on s'attend à la formation d'un barrage de 35 m ou 45 m de haut. Selon cette cote et le débit de la Romanche (100 m <sup>3</sup> /s en crue annuelle, 400 m <sup>3</sup> /s en crue centennale), le délai de remplissage serait 26 à 55 h pour la crue annuelle et de 6 à 13 h pour la crue centennale.  En cas de rupture de la retenue, l'onde de crue atteindrait le péage de Vizille en moins de 5 mn (10 m d'eau), Vizille en 20 mn (3 à 8 m d'eau), Jarrie en 30 mn. Pont de Claix en 45 mn et le pont de Catane à Grenoble en 1h30, où l'écoulement se ferait à pleins bords entre les digues du Drac...	-menace directe pour les 300 habitants de l'île Falcon et leurs biens (95 villas): situation à l'origine de la proposition de loi de Michel Barnier sur l'indemnisation des victimes avant catastrophe -menace pour la route nationale 91  -menace de submersion pour la ville de Séchilienne en particulier  -menace directe pour les installations chimiques et Grenoble	-Installations de surveillance du site assurée par le ministère de l'équipement (CETE Lyon) s'élevant à 1,5 millions de francs.  -déviation de la R.N. 91(20 000 véhicules/j) unique accès aux stations de ski de l'Alpes-d'Huez et des Deux-Alpes qui avec un chiffre annuel de 2 milliards de francs représentent la moitié du chiffre d'affaire touristique du département de l'Isère.  -des travaux de construction de 2 tunnels, routier et hydraulique, s'imposent. Leur coût est estimé à 500 millions de francs
Effondrement de galerie souterraine	11/02/1991 Massif de l'Hautil Yvelines Chanteloup-les-Vignes (France)	THORIN 1994	-effondrement d'une cavité souterraine correspondant à une ancienne exploitation de gypse	-une personne tuée -250 propriétés bâties réparties sur 670 hectares sont menacées	

## **ANNEXE II**

### ***Catastrophe de la Josefina : illustration des phénomènes***

***ANNEXE II.1 - vues multitemporelles du secteur de la Josefina***

***ANNEXE II.2 - vues aériennes de la vallée du rio Paute au niveau de la ville de Paute avant et après la crue de rupture***

***ANNEXE II.3 - suivi photographique en temps réel du principal glissement induit par la vidange de la retenue***

***ANNEXE II.4 - chronologie de l'enchaînement des phénomènes***

***ANNEXE II.5 - synoptique des différentes phases phénoménologiques***



Cliché F. Leone

Photo 1 : vue terrestre depuis l'ouest au 10/10/1993.

**Légende:**

- : Délimitation de la zone de glissement
- A → : Direction principale de la 1ère phase de glissement
- B → : Direction principale de la 2nd phase de glissement
- : Trace du niveau maximum atteint par les retenues d'eau avant la rupture du barrage naturel

1 : Surface de rupture du glissement

2 : Zone d'accumulation de pied du glissement avant (a) et après (b) rupture du barrage naturel

3 : Retenu du rio Jadan avant (a) et après (b) rupture du barrage naturel

4 : Retenu du rio Paute avant (a) et après (b) rupture du barrage naturel

5 : Zone d'érosion et de comblement alluvionnaire provoquée par la rupture du barrage naturel

M : Zones d'extractions minières et de carrières

Q : Profonds talwegs probablement d'origine structurale précédant le versant de la colline Parquioma



Photo 2 : vue aérienne au 28/08/1980. Echelle 1/54 000e  
Source IGM Ecuador.



Photo 3 : vue aérienne au 02/04/1993. Echelle 1/30 000e  
Source IGM Ecuador.



Photo 4 : vue aérienne au 04/05/1993. Echelle 1/45 000e  
Source IGM Ecuador.

**Vallée de Paute au niveau de la ville de Paute avant et après la crue de rupture**  
(d'après photographies aériennes IGM Ecuador)



Situation au 02/04/1993



Situation au 04/05/1993

Lieu : versant opposé à celui du glissement principal : versant Cerro Chocar's  
Volume estimé: 1 million de m<sup>3</sup>  
Durée: quelques secondes



Début avril 1993



01/05/1993/temps T+4

Cliché E. Aguilera



01/05/1993/temps T0

Cliché E. Aguilera



01/05/1993/temps T+3

Cliché E. Aguilera



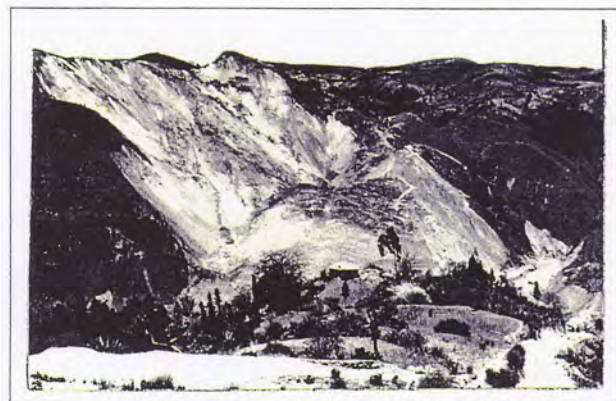
01/05/1993/temps T+1

Cliché E. Aguilera



01/05/1993/temps T+2

Cliché E. Aguilera



Cliché F.Leone

Le 29/03/1993 vers 21 h

Glissement principal au lieu dit "La Josefina" en 2 phases séparées de quelques minutes.

Volume total estimé à 28 millions de m<sup>3</sup>

Phénomène principal



Réunion des deux lacs le 17/04/1993

Embâcle totale des rivières Paute et Jadan à leur point de confluence par la formation d'une digue de 100 m de haut et formation progressive d'un lac de 200 millions de m<sup>3</sup> couvrant 800 hectares

Phénomène induit N°1



Cliché E. Aguilera

Le 01/05/1993 avec débit de pointe atteint vers 7h45. Durée : 6 heures.

Rupture de la retenue et libération d'une onde de crue correspondant à la vidange de 170 millions de m<sup>3</sup> et se propageant sur les 60 km de vallée aval avec un débit de pointe d'environ 10 000 m<sup>3</sup>/s. Volume solide transporté et déposé estimé à 13 millions de m<sup>3</sup>.

Phénomène induit N°2

**Phénomène induit N°3**

Vidange en partie du lac et formation d'une multitude de glissements induits en amont de la retenue par la décompression hydraulique des versants.



Cliché F.Leone

**Phénomène induit N°4**

Apparition de glissements induits en aval de la retenue par l'affouillement en pied de versant provoqué par la crue



Cliché F.Leone



# CATASTROPHE DE LA JOSEFINA

Province d'Azuay - ECUADOR - Mars, Avril, Mai 1993

Cartographie et illustration des différentes phases de sollicitations phénoménologiques responsables de dommages

D'après  
-missions photographiques aériennes de l'Instituto Geografico Militar (IGM) des 02/04/1993 et 04/05/1993  
-cartes topographiques au 1/50 000 de l'IGM  
-reconnaitances de terrain



Mission BRGM-CIFEG Octobre 1993  
© Frédéric LEONE

Plan de situation de la zone d'étude  
Source: IGM- QUITO-Ecuador



Zone de crue à très forte énergie (décharge solide et érosion maximum)

Vallée de Paute

Zone d'étalement de la crue

Vue aérien 04/05/1993  
Source: IG

VUE PANORAMA

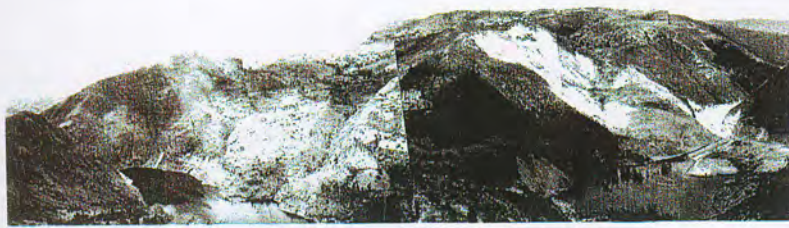


Photo N°1  
Vue panoramique du glissement de la Josefina et du lac résiduel du rio Paute  
10/93

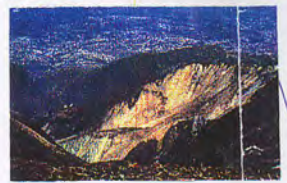


Photo N°2  
Glissement principal de la Josefina depuis l'Ouest  
10/93



Photo N°3  
Glissement principal de la Josefina vu depuis l'Est  
10/93



Photo N°7  
Vue rapprochée de glissement induit  
10/93



Photo N°8  
Glissements induits le long de la route Panaméricaine  
10/93

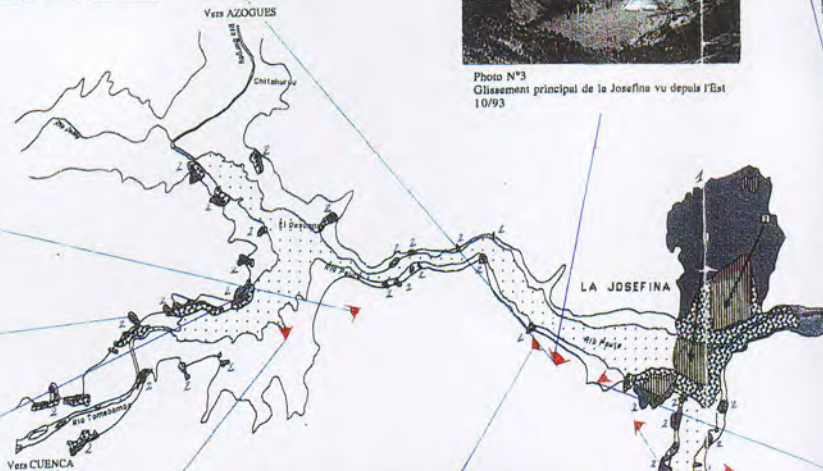


Photo N°10  
Vue de la retenue avant rupture du barrage  
04/93



Photo N°11  
Niveau maximum atteint par la retenue du rio Paute  
fin 04/93



Photo N°9  
Vue rapprochée de glissement induit  
10/93

Les différentes phases phénoménologiques de la catastrophe

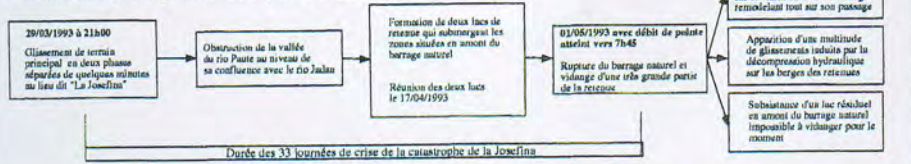
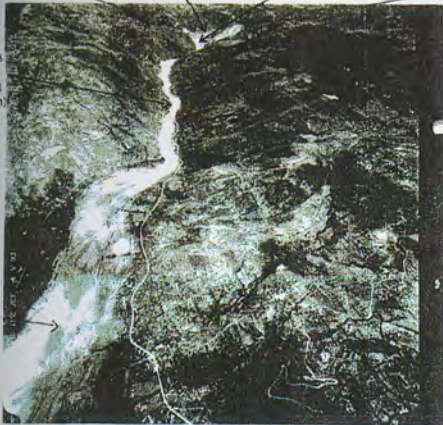


Photo N°12  
Glissement induit  
10/93

Photo Réu 174

Photo N°1  
Glissement  
10/93

Lac résiduel Rio Judan    Lac résiduel Rio Paute    Trince du barrage naturel    Surface de rupture du glissement de la Josefina



Zone de crue à très forte énergie, décharge solide et érosion maximum

Vallée de Paute

Zone d'étalement de la crue

Vue aérienne en perspective de la vallée de Paute après rupture du barrage naturel  
04/05/1993  
Source: Instituto Geografico Militar - Quito - Ecuador.

**VUE PANORAMIQUE DE LA VALLEE SINISTREE DE RIO PAUTE**

Vers Barrage hydroélectrique de PAUTE

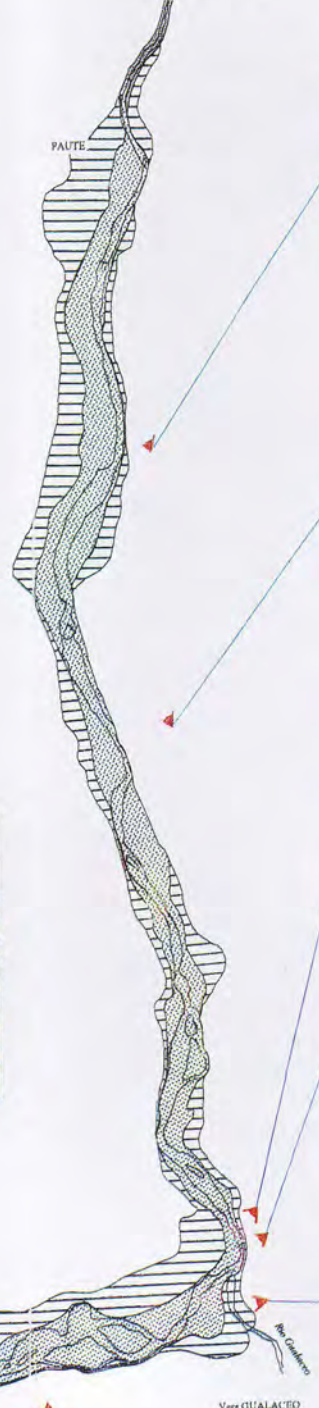


Photo N°22  
Vallée du Paute après la rupture  
10/93



Photo N°21  
Vallée du Paute au moment de la rupture du barrage  
10/93



Photo N°20  
Vallée du Paute au moment de la rupture du barrage  
10/93



Photo N°19  
Vallée du Paute après la rupture  
10/93



Photo N°18  
Effet d'érosion des berges lors de la rupture du barrage  
10/93



Photo N°4  
Effet d'érosion de pied de versant lors de la rupture du barrage  
10/93



Photo N°5  
Coupe des matériaux déposés pendant la rupture du barrage  
10/93



Photo N°6  
Glissement induit  
10/93



Photo N°13  
Réunion des deux lacs rio Paute et rio Judan  
17/04/93



Photo N°15  
La vallée du Paute au moment de la rupture du barrage  
01/05/93



Photo N°16  
La vallée du Paute après la rupture du barrage  
10/93



Photo N°17  
Vue panoramique de la Vallée du Paute après rupture  
10/93



Photo N°14  
Glissements induits  
10/93

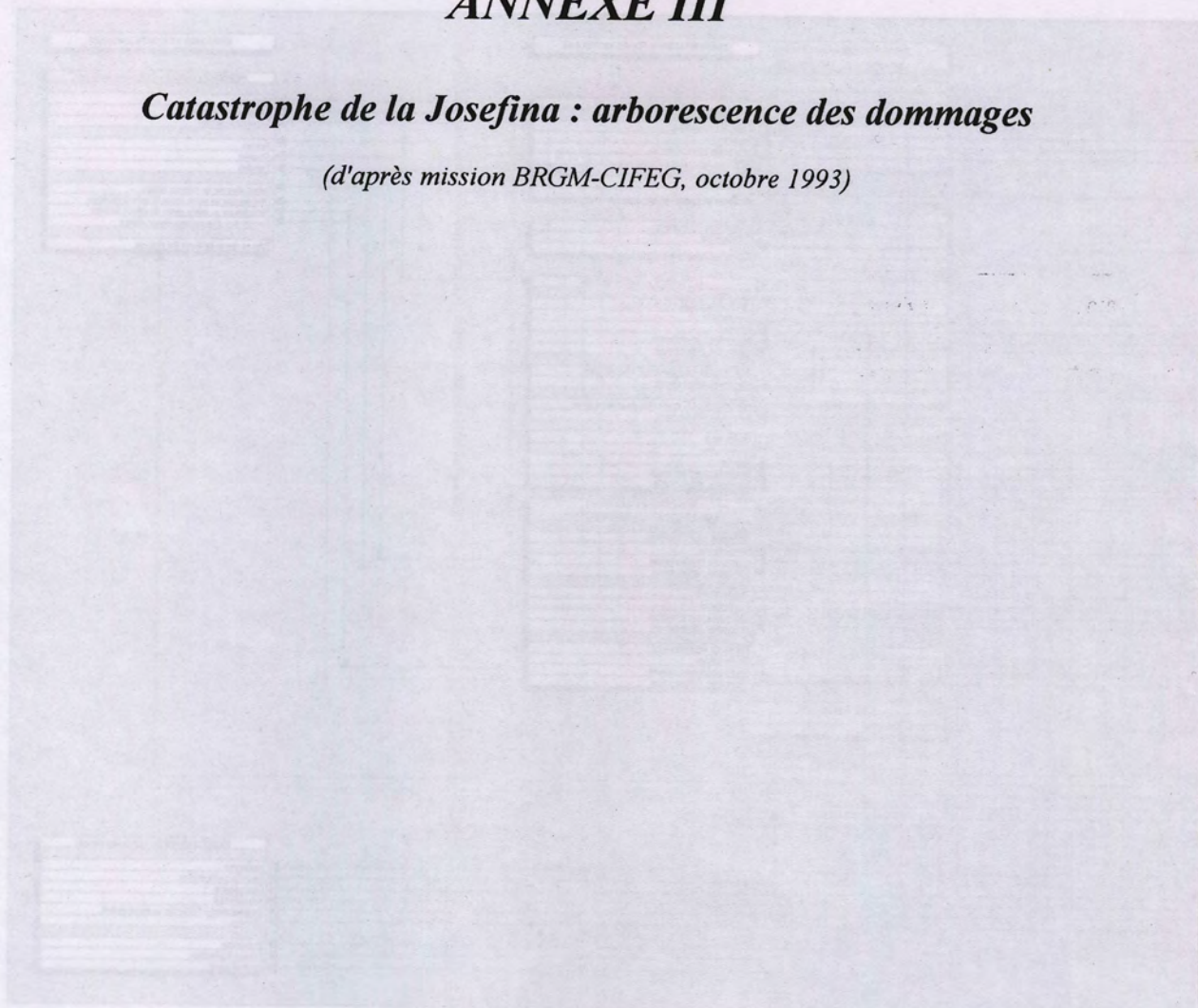
Principaux phénomènes dommageables	Typologie des différentes sollicitations associées (en terme d'endommagement)	Phases du glissement principal
<b>Glissements de terrain</b> 1: Principal (La Josefina) 2: Induits par la vidange de la retenue en amont de la Josefina 3: Induits par la vidange de la retenue en aval de la Josefina	Zones de déplacements instantanés à dominance verticale et à champ des déformations hydrologiques Zones de déplacements instantanés à dominance verticale et à champ des déformations hydrologiques Zones d'accrétion et de pentes induites de pied de glissement	1ère phase 2ème phase
<b>Actions hydrauliques liées à l'obstruction de la vallée par le glissement principal (embâcle)</b>	Zones de submersion hydraulique statique temporaire Zones de submersion hydraulique statique définitive	
<b>Actions hydrauliques liées à la rupture du barrage naturel et à la vidange de la retenue (débaîce)</b>	Zones de submersion hydraulique dynamique de très forte intensité Zones de submersion hydraulique dynamique de moyenne intensité Zones de submersion hydraulique dynamique de faible intensité	



## **ANNEXE III**

### ***Catastrophe de la Josefina : arborescence des dommages***

*(d'après mission BRGM-CIFEG, octobre 1993)*







## *ANNEXE IV*

### *Catastrophe de la Josefina : illustration des dommages*

*ANNEXE IV.1 - carte de situation des photographies des dommages*

-

*ANNEXE IV.2 - dommages aux bâti*

-

*ANNEXE IV.3 - dommages aux infrastructures de communication*


-


*ANNEXE IV.4 - dommages aux surfaces naturelles*


# ANNEXE IV.1

Légende :

N° : localisation et numérotation de la photo correspondante

 : secteur affecté par la retenue d'eau (inondation en amont du glissement)

 : secteur affecté par le glissement de la Josefina

 : secteur affecté par la crue avale consécutive à la rupture du barrage naturel

D'après fonds topographiques IGM Ecuador au 1/50 000e

N



500 m







### Illustration des dommages aux bâtiments

(clichés F. Leone, octobre 1993)



Photo 1 : villa inondée, redécouverte lors de la descente des eaux du lac : la toiture a résisté à l'immersion.

Photo 2 : villa inondée, redécouverte lors de la descente des eaux du lac.

Photo 3 : centrale thermo-électrique de "El Descanso" redécouverte lors de la descente des eaux du lac : source de pollution du lac par hydrocarbures.

Photo 4 : villa redécouverte par la descente des eaux : la trace du niveau maximum atteint par les eaux est encore visible sur la végétation.

Photo 5 : maison en pisé dont la toiture n'a pas résisté à l'immersion temporaire.

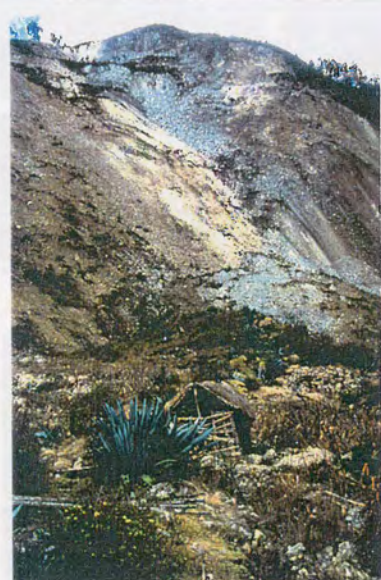
Photo 6 : maison dont les fondations ont été affouillées par la crue. Son état d'équilibre précaire semble la condamner à terme.

### Illustration des dommages aux bâtiments

(clichés F. Leone, octobre 1993)

7

8



9

10

11

Photo 7 : villa menacée par un des glissements induits par la vidange du lac.

Photo 8 : quartier rasé de moitié par la crue.

Photo 9 : maison en terre conservée en surface du glissement principal, malgré un déplacement vertical de plusieurs dizaines de mètres.

Photo 10 : haciendas dont la toiture n'a pas résisté à la crue.

Photo 11 : église dont le bâtiment principal a été emporté par la crue.

## Illustration des dommages aux infrastructures de communication

(clichés F. Leone, octobre 1993)

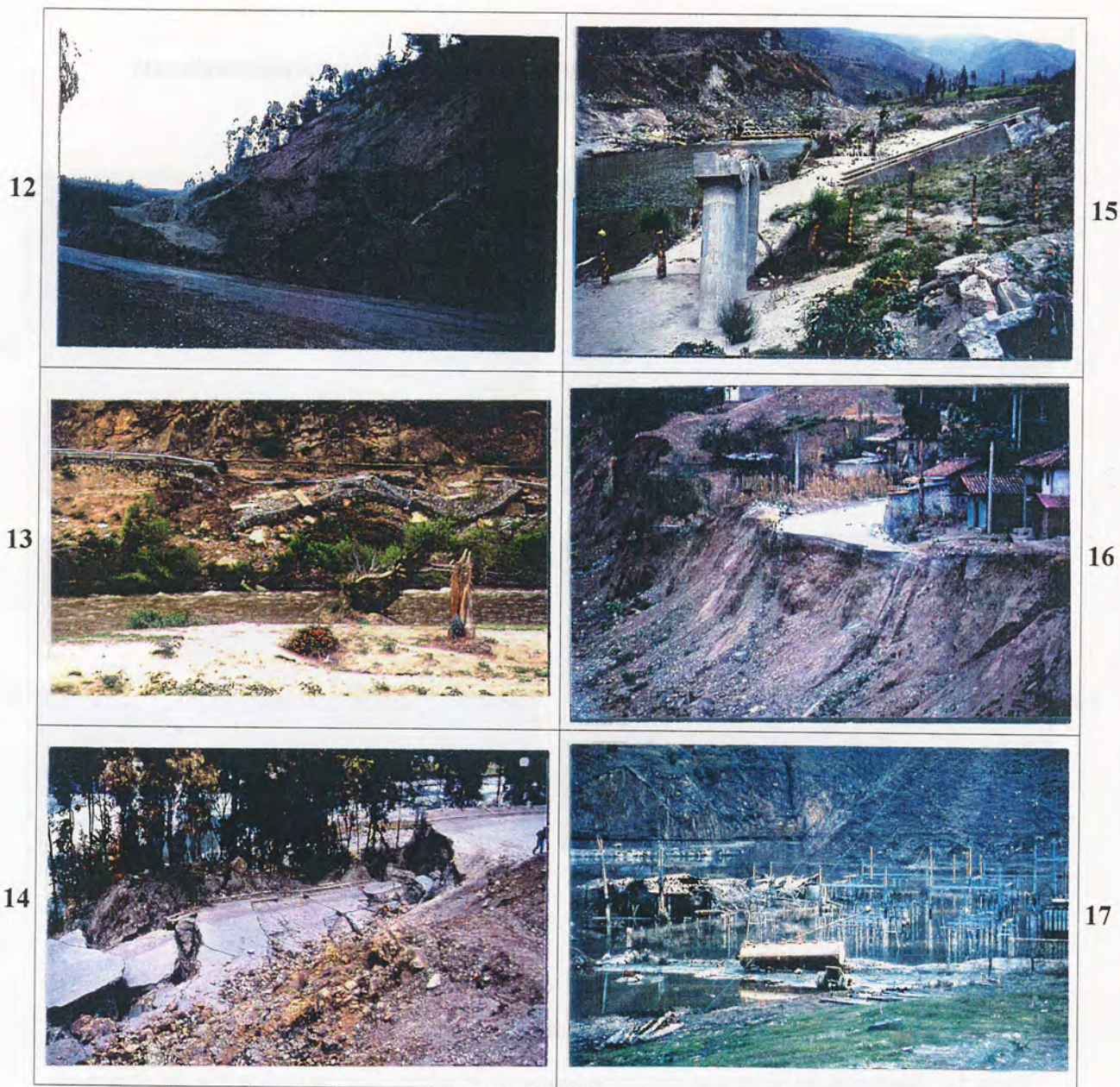


Photo 12 : route (Panaméricaine) dégagée des matériaux d'un des glissements induits qui l'obstruait.

Photo 13 : route dont les gabions de soutènement ont été arrachés par la crue.

Photo 14 : route emportée par un des glissements induits par la crue.

Photo 15 : pont routier dont les piliers ont été couchés par la crue et le tablier transporté sur une centaine de mètres vers l'aval.

Photo 16 : route emportée par la crue.

Photo 17 : installations électriques noyées dans la plaine de El Descanso.

### Illustration des dommages aux surfaces naturelles (environnement)

(clichés F. Leone, octobre 1993)

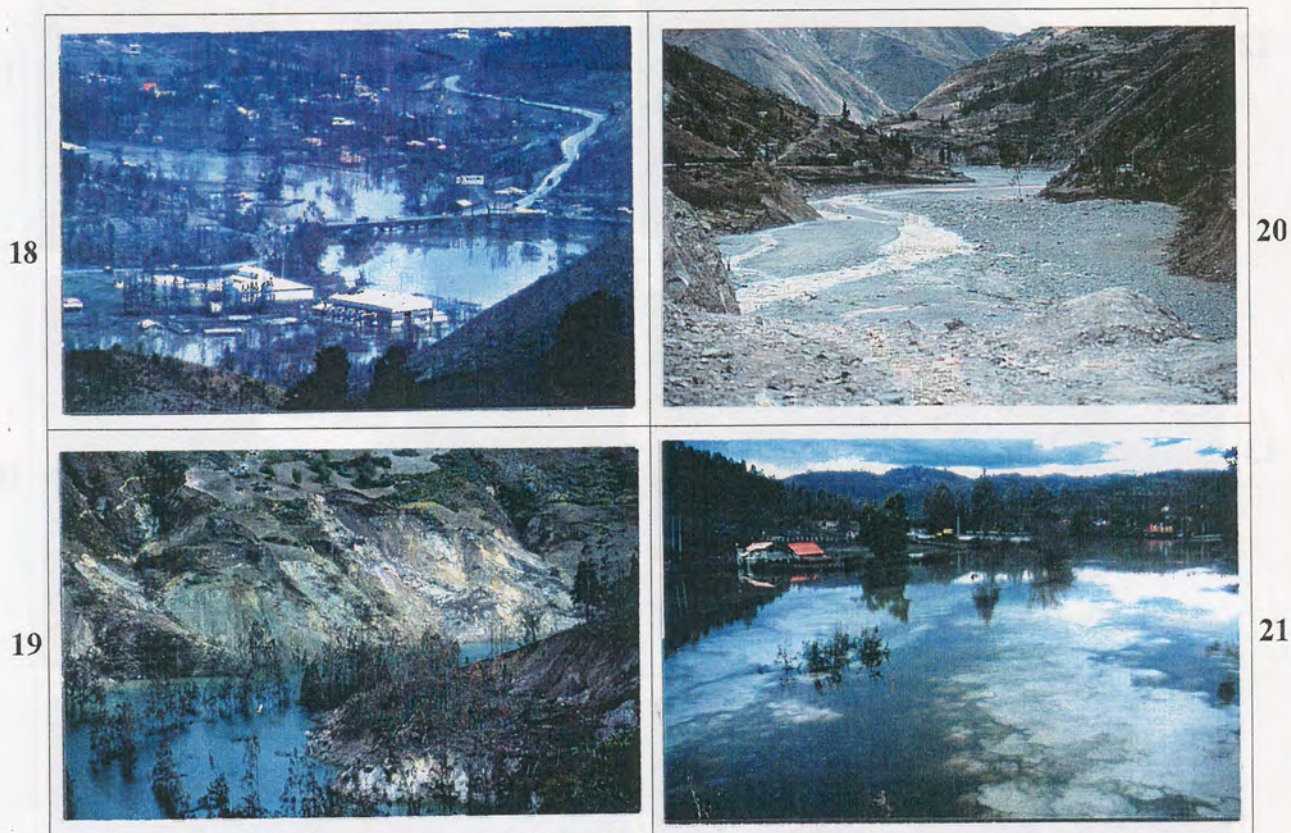


Photo 18 : plaine jadis fertile de El Descanso aujourd'hui recouverte par les eaux du lac résiduel.

Photo 19 : illustration des dommages non irrémédiables sur des arbres situés en surface d'un des glissements induits par le lac et dont la surface d'origine a été conservée.

Photo 20 : illustration de la stérilisation des terres alluviales de la vallée du rio Paute par les dépôts apportés par la crue.

Photo 21 : effet de pollution par hydrocarbures dans le lac résiduel au niveau de la centrale thermoélectrique de El Descanso.



Chronologie	Evolution du phénomène	Gestion de la crise
<b>Lundi 29 Mars 1993</b> 21 h 00:	-Déclenchement en deux temps du glissement de terrain au lieu dit "La Josefina" -Barrage de la rivière Paute -Submersion par les eaux d'une trentaine d'habitations.	-Un premier bilan fait état de 4 morts, 50 blessés et un certain nombre de disparus
<b>Mardi 30 Mars</b>	-La retenue d'eau atteint 7 millions de m3	-Premières actions des forces militaires consistant à évacuer les personnes se trouvant dans la zone sinistrée -Les autorités étudient la possibilité d'évacuation de la population située dans le secteur du groupe thermique de "l'Empresa Electrica Regional Centrosur"
<b>Vendredi 2 Avril</b>		-Déploiement d'une demi-douzaine de bulldozers pour tenter d'ouvrir un canal permettant de libérer les eaux retenues -Plan d'évacuation de la vallée du Paute -Début de l'évacuation
<b>Samedi 3 Avril</b> <b>Dimanche 4 Avril</b> <b>Lundi 5 Avril</b>	-Le lac artificiel commence à inquiéter les populations, submerger les maisons, détruire la faune et la flore	
<b>Mardi 6 Avril</b>	-L'inondation affecte 300 hectares de terres cultivées, 6 fabriques, 4 entreprises agricoles, une centaine de maisons, la centrale thermoélectrique de Descanso, 20 chemins vicinaux, 6 ponts, 40 kilomètres de routes et 43 kilomètres de voie ferrée -L'inondation se poursuit	-On parle de 70 personnes, 30 habitations, deux haciendas, deux maisons et une école ensevelies par le glissement
<b>Dimanche 11 Avril</b>		-On commence à parler de l'imminence de la rupture du barrage du río Jadan
<b>Lundi 12 Avril</b> <b>Mardi 13 Avril</b>	-La retenue contient 95 millions de m3 d'eau	-Annonce de l'alerte bleue -Début de l'évacuation massive de 14 000 personnes dans la vallée du Paute -Installation de plus de 2000 tentes, latrines, postes de secours
<b>Mercredi 14 Avril</b>		-On annonce que la centrale hydroélectrique de Paute pourrait perdre 10 années de vie utile en conséquence de la sédimentation que pourrait entraîner une débâcle des eaux retenues
<b>Jeudi 15 Avril</b>		-On attend d'un moment à l'autre la vidange des 105 millions de m3 d'eau retenue
<b>Samedi 17 Avril</b>	-Réunion des rivières Paute et Jadan	-Les techniciens calculent que la débâcle devrait survenir dans les 5 à 10 jours prochains
<b>Lundi 19 Avril</b>	-De nombreuses obstructions viennent rétrécir le canal d'évacuation des eaux	
<b>Mardi 20 Avril</b>	-Le lac artificiel atteint 132 millions de m3 d'eau. Les secteurs de Challuabamba et de Zhullin, jusqu'alors considérés comme hors de danger, sont inondés.	- On informe que les mesures sur les côtes d'inondation sont fausses.
<b>Mercredi 21 Avril</b>	-Commence la lente vidange des 180 millions de m3 d'eau retenue	-L'alerte rouge est proclamée
<b>Jeudi 22 Avril</b>		-Les gens apprennent que la centrale hydroélectrique de Paute, une des cibles principales de l'éventuelle débâcle, n'est pas assurée
<b>Jeudi 29 Avril</b>	-Succession de multiples obstructions et réouvertures du canal d'écroulement des eaux -Le niveau de l'eau continue de monter	-A ce jour, les pertes s'élèvent, seulement pour le secteur agricole, à 300 000 millions de sucres -Des membres de l'armée lancent deux grenades "law". L'objectif est d'augmenter le débit du canal pour accélérer la vidange du lac. Cette opération se déroule dans le plus grand secret.
<b>Vendredi 30 Avril</b> 17 h 45:		-L'alerte rouge est levée
<b>milieu de la nuit:</b>	-Jusqu'au milieu de la nuit, le débit qui sort de la retenue continue d'augmenter progressivement	

<b>Samedi 1 Mai</b>	<b>0h00:</b>	-Les eaux s'évacuent à raison de 60 à 80 m <sup>3</sup> /s -Ce débit reste stable jusqu'à 6h00	
	<b>6h00 à 6h30:</b>	-D'après les informations radios le débit augmente pour atteindre les 8 000 m <sup>3</sup> /s	
	<b>6h 40:</b>	-Les eaux "dévorent" la camionnette de l'équipe de "Telecentro" et une retroexcavatrice.	
	<b>7h00:</b>		- Les gens s'inquiètent et craignent que la crue ne provoque des dommages catastrophiques
	<b>7h 45:</b>	-Le débit de sortie des eaux du lac atteint 12 000 m <sup>3</sup> /s au niveau de "la Josefina".	
	<b>Jusqu'à 9h00:</b>	-La force des eaux érode le relief. Les vagues atteignent une hauteur de 15 mètres. Routes, ponts, maisons, arbres, plantations sont rasés.	-Les destructions sont qualifiées de désastreuses
	<b>10h00:</b>	-L'ancien canal de la Josefina est rompu. Sa largeur atteint les 40 mètres.	
	<b>10h05:</b>		-L'évacuation de Mendez est ordonnée
	<b>10h10:</b>		
		-Le niveau des eaux du lac commence à baisser notablement .	-Manifestations de joie et fêtes populaires à Challuabamba, Chuquipata, Javier Loyola, Cuenca, Azogues. -Tristesse et désolation à Gualaceo, Paute et dans les zones situées en aval du barrage.
	<b>10h25:</b>		
		-Le canal atteint une largeur de 50 mètres	
	<b>11h00:</b>	- Des glissements se produisent en de nombreux points. L'un d'eux dure une minute et l'on craint qu'il ne provoque un nouveau barrage.	
	<b>11h15:</b>		
		-Le débit qui arrive au niveau de la centrale hydroélectrique de Paute est de 6 000 m <sup>3</sup> /s. La centrale de Paute se retrouve isolée car les ponts d'accès sont détruits	
	<b>11h35:</b>		
		-Le niveau des eaux a baissé de 10 m à la Josefina.	
	<b>11h40:</b>		
		-Momentanément, la montée du niveau d'eau du réservoir du rio Jadan se maintient.	
	<b>11h50:</b>		
		-Le débit de la crue se stabilise autour de 500 m <sup>3</sup> /s	
	<b>12h30:</b>		
		-Le niveau de l'eau a baissé de 17 mètres au niveau de la Josefina	
	<b>12h35:</b>		
		-On confirme que la moitié de la ville de Paute est inondée mais que les installations de Huertos Uzhupud sont sauvées	
	<b>12h40:</b>		
		-La pluie continue de tomber sur la zone	
	<b>12h45:</b>		
		-Le débit de crue à Amaluza est de 8 450 m <sup>3</sup> /s.	
	<b>13h15:</b>		
		-On calcule que près de la moitié de la retenue de la Josefina a déjà été vidangée	
	<b>13h35:</b>		
		-La population de Zhullin fête la descente des eaux avec de l'"Aguardiente"	
	<b>14h35:</b>		
		-Le débit n'est plus que de 4 000 m <sup>3</sup> /s à Amaluza	
	<b>16h00:</b>		
		-Les sinistrés évaluent leurs pertes. A beaucoup ne subsiste que ce qu'ils ont pu emporter dans leur fuite.	

## **ANNEXE VI**

### ***Evénements du Diois : inventaire des dommages consécutifs aux intempéries des 6 et 7 janvier 1994***

***ANNEXE VI.1 - carte de localisation des dommages***

***ANNEXE VI.2 - description des dommages au réseau routier départemental  
(d'après données DDE)***

***ANNEXE VI.3 - description des dommages aux voies communales et chemins ruraux  
(d'après données DDE)***





Pays du Diois, Drôme, France.

# ANNEXE VI.1

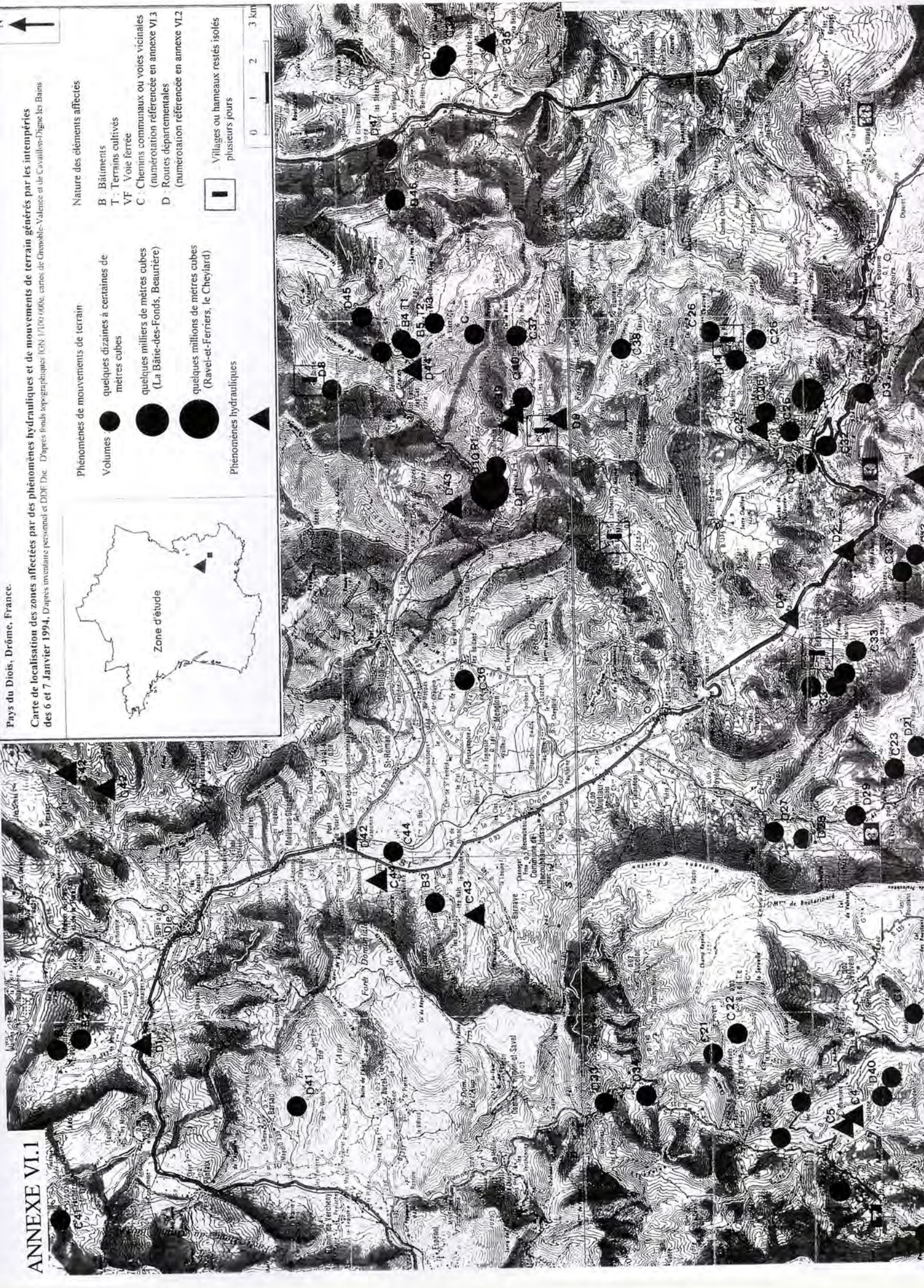
Carte de localisation des zones affectées par des phénomènes hydrauliques et de mouvements de terrain générés par les intempéries des 6 et 7 Janvier 1994. D'après inventaire personnel et DDF Die. D'après fonds topographiques IGN 1/100 000, cartes de Cavailhon-Digne les Bains

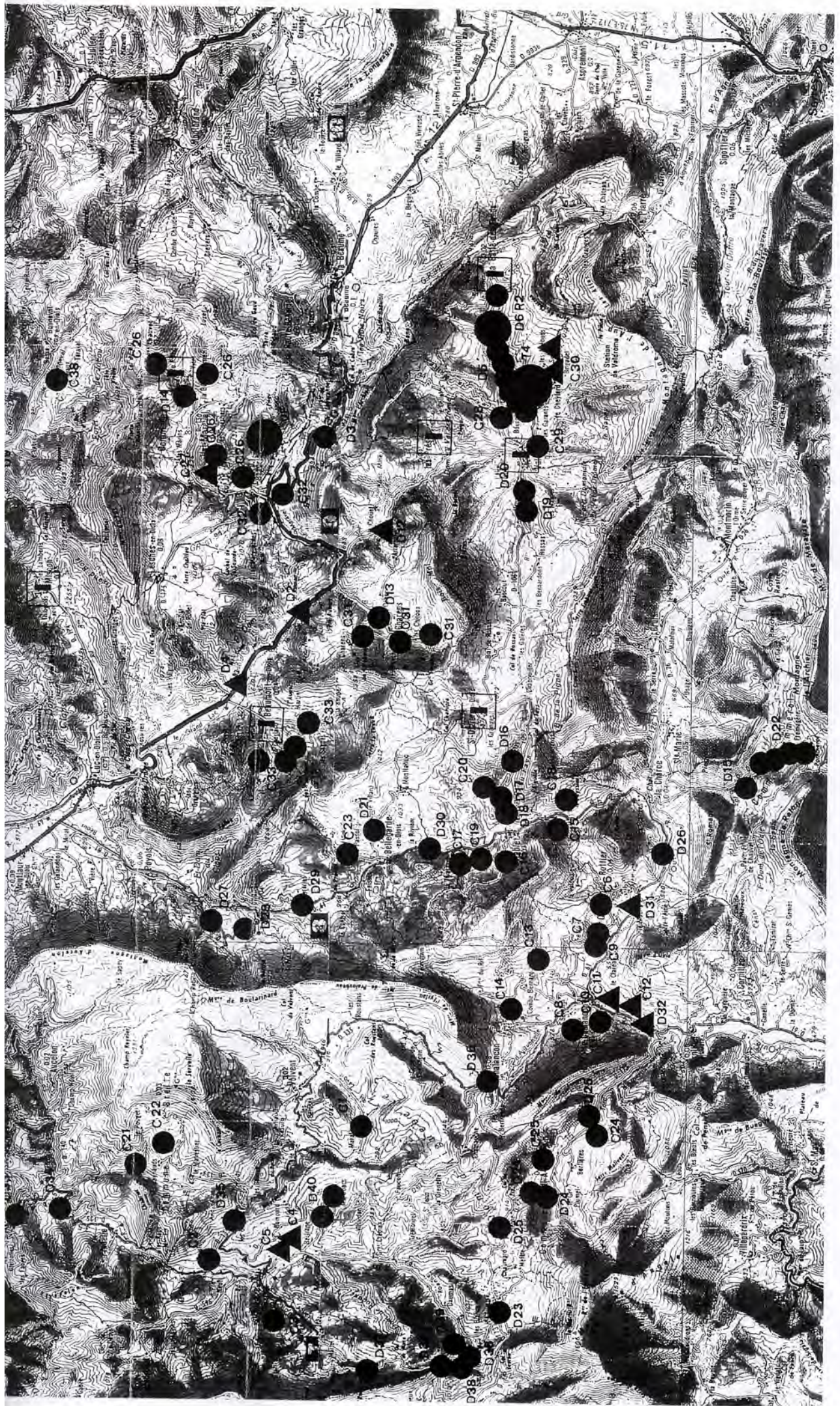
- Phénomènes de mouvements de terrain
- Volumes
    - quelques dizaines à certaines de mètres cubes
    - quelques milliers de mètres cubes (La Bâie-des-Fonds, Beaurière)
    - quelques millions de mètres cubes (Ravel-et-Ferriers, le Cheylard)
  - Phénomènes hydrauliques
    - ▲

- Nature des éléments affectés
- B : Bâtimens
  - T : Terrains cultivés
  - VF : Voie ferrée
  - C : Chemins communaux ou voies vicinales (numérotation référencée en annexe VI.3)
  - D : Routes départementales (numérotation référencée en annexe VI.2)



Villages ou hameaux restés isolés plusieurs jours





Numéro d'identification	N° de la route	Repérage DDE	Localisation toponymique	Type de phénomène	Type de dommages structurels	Intensité des dommages	Coût des réhabilitations provisoires (T.T.C)	Coût des réparations définitives à réaliser (T.T.C)	Coût des mesures de protection et/ou de prévention (T.T.C)	Traffic-Journalier en nombre de véhicules par jour et % de poids lourds	Autres remarques
D1	R.D.93	P.R.50+150	Section entre Pontaix et Dic	Erosion torrentielle (crue de la rivière Drôme)	Erosion de la bande de remblai entre la route et la rivière. La route se trouve menacée.	40 m érodés		213 480 Frs (mise en oeuvre de deux épis en enrochements d'un poids unitaire supérieur à 1,5 T). A réaliser.	213 480 Frs (mise en oeuvre de deux épis en enrochements d'un poids unitaire supérieur à 1,5 T). A réaliser.	3 063 (1989), 18% (1984)	La zone érodée est formée d'anciens remblais correspondant à l'ancienne décharge d'ordures ménagères de la ville de Dic
D2	R.D.93	P.R.81 à 83	Les Boulligons (plaine du Claps)	Inondation (crue de la rivière Drôme - embâcle générée par un mauvais entretien du lit)	Inondation de la chaussée	environ 150 ml de voie inondée		275 270,60 Frs (reprofilage et reprise du revêtement sur toutes les sections concernées)	102 470,40 Frs (nettoyage du chenal et recouvrement du lit)	2 215 (1992)	Routé classée "route structurante", elle relie la vallée du Rhône au Diois et effectue la liaison routière avec les Hautes-Alpes puis l'Italie par le Montgenèvre
D3	R.D.93	P.R.93+100	Combe Auran, Route du col de Cabre	Glissement de terrain	Rupture de la plateforme et obstruction de la chaussée	50 ml (rupture) et plusieurs centaines de m <sup>3</sup> (obstruction)	74 564,17 Frs (déblaiement et reconstruction provisoire)	112 361,64 Frs (reconstruction définitive de la chaussée)		4 000 20% (1992)	
D4	R.D.93	P.R.75 à 96	Section entre "Le petit lac" à Luc et le Col de Cabre (plaine du Claps)	Inondation (crue de la rivière Drôme)	Inondation de la chaussée et déformations de la plateforme (escaliers, "montagnes russes")					2 215 5 (1992)	La circulation rendue très délicate en de nombreux points
D5	R.D.106	P.R.17 à 21+600 et P.R.22+100 à 23+100	Sections entre Valdrome et la Bâtie des Fonds	Glissements de terrains-coulées de débris	Obstructions de la chaussée et effondrements de plateforme	10 000 m <sup>3</sup> (une des observations)	45 079,50 Frs (travaux de déblaiements)	426 367,00 Frs (travaux de reconstruction de chaussée)		171 (1992)	
D6	R.D.106	P.R.21+600 à 22+100	Section entre Valdrome et la Bâtie des Fonds	Glissement de terrain-coulée de débris	Obstruction de la chaussée	15 000 m <sup>3</sup> (obstruction)	117 811,66 Frs (construction d'une déviation provisoire et sommaire en terrain privé)	342 595,00 Frs (déblaiement de la chaussée et purge du glissement) ou 468 901,00 Frs (construction définitive d'une déviation de 600 m, dont 20 000 Frs d'acquisitions foncières)	Purge des matériaux en amont prévenant encore un risque de glissement	171 (1992)	La solution de construction définitive d'une déviation n'est pas totalement satisfaisante compte tenu du risque permanent de glissement
D7	R.D.753	P.R.1+200	Section entre Lus La Croix Haute et le Mas Bourget	Affaissement dans argiles	Affaissement de la plateforme			85 866,40 Frs (décapage des matériaux argileux, pose d'un géotextile en fond de fouille, mise en place d'un remblai en matériaux sains, installation d'un dispositif de drainage au pied du talus amont)		156 (1990)	
D8	R.D.624	P.R.2+500	Section entre le hameau des Reyseis et Borne	Glissement de terrain	Rupture de la plateforme	40 ml et 10 m <sup>3</sup>	127 378,80 Frs (reconstruction de la chaussée)	13235,8 Frs (mise en place d'un revêtement définitif)			
D9	R.D.148	P.R.3+750	Section entre Bouleval	Erosion torrentielle (crue du ruisseau de Boule)	Destruction de l'accotement			45 779,6 Frs (enrochements et remblais)			

D10	R.D.148	P.R.0+400 à 1+000	Section croisement D.148/D.539 et Boule	entre	Glissement versant	de	Obstruction de la chaussée et rupture de la plateforme	200 ml	283 952 Frs (mise en état provisoire d'une déviation par le col de Miscon: réalisation de massif de soubroche) et/ou purges, curage des fossés, petits ouvrages d'assainissement, remise en forme et empiétement de la chaussée)	39 000 000 Frs (création d'un tunnel de 500 m sous le col de Miscon: réalisation de massif de soubroche) et/ou 2 000 000 Frs (mise en état définitive de la déviation par le col de Miscon)	148 (88)	La solution du tunnel dépend de décisions politiques et financières appartenant au président du conseil général. Si elle est adoptée elle ne pourra se concrétiser avant 2 ans, voire plus.
D11	R.D.348	P.R.1+800 à 3+000	Route reliant la D.148 aux hameaux de Ravel et Ferniers		Glissement versant	de	Déformations, fissurations et affaissements de la plateforme	50 cmdh (affaissements)			37 (91)	La remise en état de cette route est à étudier dans le même cadre que celle de la R.D.148 et ne pourra être estimée qu'après. La déformation de la route se poursuit actuellement.
D12	R.D.306	P.R.5+000	Section entre la D.93 et Valdrome		Erosion torrentielle de la rivière (Drôme)		Rupture partielle de la plateforme	100 ml	432 237,7 Frs (reconstruction de la chaussée et rétablissement de la circulation sur 2 voies)	32 022 Frs (curage du lit de la rivière Drôme pour éviter l'effondrement total de la chaussée)	114	Route classée d'intérêt cantonal. Accès principal de la haute vallée de la Drôme. Empruntée par les skieurs de la station de Valdrome. Circulation des cars et des poids lourds rendue très précaire.
D13	R.D.145	P.R.2+000 à 4+500	Avant Charrens et entre Charrens et Haut Charrens		Affaissements et Haut effondrements		Déformations de la chaussée		165 743,5 Frs (reprofilage par apport de matériaux et reconstruction de la couche de roulement)		59	Route classée d'intérêt cantonal. Section déjà affectée par un glissement important ayant emporté la route il y a une vingtaine d'années.
D14	R.D.150	P.R.6+400	Section entre Fourcinet et le hameau du Pilhon		Glissement de terrain		Rupture partielle de la plateforme		173 274,6 Frs (rétablissement provisoire de la circulation)	51 235,2 Frs (rétablissement définitif de la chaussée)	90	Route classée d'intérêt cantonal. Zone affectée comprise dans un glissement de terrain important (amont et aval) très problématique pour la reconstruction de la route. Un nouveau tracé de la route évitant cette zone dangereuse est envisagé.
D15	R.D.438	P.R.1+175	Route d'accès au vieux village de Pommerol		Glissement terrain		Rupture de la plateforme	1,20 mdh	21 996,7 Frs (reconstruction de la plateforme et de la chaussée)	29 650 Frs (encrochements et revêtement)		Route classée d'intérêt cantonal. Unique accès au vieux village de Pommerol.
D16	R.D.106	P.R.1+570	Section entre Estabiet et Saint Dizier en Diois		Affaissement		Rupture de la plateforme		75 619,4 Frs (reconstruction de la plateforme, reprise du profil en long)		171 (1992)	Route classée d'intérêt cantonal. Assure l'accès à la station de ski de Valdrome en provenance du Sud de la Drôme et du Vaucluse
D17	R.D.106	P.R.1+710	Section entre Estabiet et Saint Dizier en Diois		Affaissement		Affaissement de la plateforme		21 140,5 Frs (reprise du profil en long)		171 (1992)	Idem
D18	R.D.106	P.R.2+850	Section entre Estabiet et Saint Dizier en Diois		Affaissement		Affaissement de la plateforme		13 698,3 Frs (reprise du profil en long)		171 (1992)	Idem

D19	R.D.106	P.R.15+040 à 15+160	Section entre Saint Dizier en Valdrome	Glissements de talus	Obstructions de la chaussée	80 m (obstruction)			58 410,5 Frs (déblaiements et stabilisations des talus en amont)	171 (1992)	Idem
D20	R.D.106	P.R.15+900	Section entre Saint Dizier en Valdrome	Glissements de talus	Obstruction de la chaussée			90 337,6 Frs (déblaiement)		171 (1992)	Idem
D21	R.D.243	P.R.1+050	Section entre Bellegarde en Diois et Montlahuc	Eboulement talus amont	Obstruction de la chaussée			11 860 Frs (déblaiement)	11 267 Frs (punge des talus à réaliser)	45 (1991)	Route classée d'intérêt cantonal.
D22	R.D.338	P.R.3+850 à 5+150 (en particulier aux P.R.3+850, 4+500, 4+850, 5+040 et 5+150)	Section entre Pommerol et la Charce	Eboulements	Obstructions et affaissements de la chaussée			42 488,5 Frs (déblaiements, entrochements et reconstruction d'un aqueduc en buses béton)	83 988,8 Frs (reconstructions de chaussées et de entrochements)	25 (1989)	Route classée d'intérêt cantonal. Assure la liaison entre le département de la Drôme (vallée de l'Oule) et le département des Hautes-Alpes (canton de Rosans).
D23	R.D.173	P.R.13+300	Section entre Gumiane et le croisement avec la D.570	Eboulement	Obstruction et détérioration de la chaussée			60 094,6 Frs (déblaiement)	23 127 Frs (réfection de la couche de surface de la chaussée)	161 (1991)	Route classée d'intérêt cantonal.
D24	R.D.173	P.R.7+540 à 7+910	Section entre Gumiane et le croisement avec la D.570	Affaissements	Fissurations, affaissements de la chaussée				51 152,2 Frs (reprise du profil en long, reconstruction de la chaussée)	161 (1991)	Idem
D25	R.D.173	P.R.2+500 à 12+000	Section entre Gumiane et le croisement avec la D.61	Affaissements	Fissurations, affaissements de la chaussée			33 208 Frs (reprise par colmatage d'affaissements et de cassures en divers endroits)		161 (1991)	Idem
D26	R.D.61	P.R.6+560 à 26+300	Section entre Poyols et la Motte Chalanco	Eboulements et affaissements	Obstructions et affaissements de la chaussée			20 351,8 Frs (déblaiements)	42 221,6 Frs (protection de la route par mise en place d'entrochements au niveau d'une brèche attaquée par la rivière "l'Oule". Au P.R.26+300. Travaux réalisés)	314 (1991)	Route classée d'intérêt départemental. Principale liaison entre le Diois et le Nyonsais.
D27	R.D.61	P.R.6+560	Section entre Poyols et Jonchères	Affaissement	Affaissement de la chaussée				56 014,8 Frs (reprise du profil en long)		Idem
D28	R.D.61	P.R.6+660	Section entre Poyols et Jonchères		Détérioration d'un bord de chaussée	12 m2			711,6 Frs (reconstruction d'un bord de chaussée)	314 (1991)	Idem
D29	R.D.61	P.R.8+250	Section entre Jonchères et Bellegarde-en-Diois	Affaissement	Affaissement de la chaussée				46 942 Frs (reconstitution d'un talus et soutènement)	314 (1991)	Idem
D30	R.D.61	P.R.19+440	Section entre Estabiet et La Charce	Affaissement	Déformations de la chaussée	300 m2			72 500,2 Frs (reprise du profil en long et assainissement)	314 (1991)	Idem
D31	R.D.61	P.R.26+300	Section entre La Charce et La Motte Chalanco	Erosion torrentielle (crue de la rivière "l'Oule")	Rupture partielle de la plateforme (bordure)	300 m2			25 143,2 Frs (reprise du profil en long)	314 (1991)	Idem
D32	R.D.61	P.R.30+740	Section entre La Motte Chalanco et Comillon-sur-l'Oule.	Erosion torrentielle (crue de la rivière "l'Oule")					212 887 Frs (reconstruction de la plateforme en bordure de rivière)	314 (1991)	Idem
D33	R.D.135	P.R.12+840 à 43+000	Section entre Saint-Benoit-en-Diois et Chalanco	Eboulements et affaissements	Obstructions, affaissements et fissurations de la chaussée				71 753 Frs (reconstitution de talus aval de la route en bordure de rivière)	1 161 (1989)	Idem
									41 510 Frs (reprises de profils longitudinaux par colmatages en grave-bitume)	177 à 110	Route classée d'intérêt cantonal.

D34	R.D.135	P.R.15+000	Section entre Saint-Benoit-en-Diois et Pradelle	Affaissement	Déformations de la chaussée	de la 500 m <sup>2</sup>		38 070,6 Frs (reprise du profil en long)	177 (1991)	Idem
D35	R.D.135	P.R.26+490	Section entre Saint-Nazaire-le-Désert et Volvent	Eboulement				16 485,4 Frs (reconstitution du talus et soutènement)	110 (1989)	Idem
D36	R.D.135	P.R.42+520	Section entre Volvent et Chalainçon	Eboulement	Obstruction et dégradation de la chaussée		13 070 Frs (déblaiement)	17 790 Frs (reconstruction de la chaussée)	110 (1989)	Idem
D37	R.D.202	P.R.0+220, 1+150 et 3+670	Section entre Saint-Nazaire-le-Désert et le col Jean Grange	Glissements de terrain	de Affaissements fissurations de la chaussée			64 755,6 Frs (reprises de profils longitudinaux reconstructions de chaussée)	29 (1991)	Route classée d'intérêt cantonal
D38	R.D.335	P.R.7+630	Section entre Saint-Nazaire-le-Désert et le col Lescou	Glissement de terrain	de Affaissement de la chaussée	80 m <sup>2</sup>	4 744 Frs (reprise du profil longitudinal)		153 (1991)	Route classée d'intérêt cantonal. Assure la jonction par la vallée de la Roanne entre la vallée du Roubion (canton de Bourdeaux) et la vallée de la Drôme.
D39	R.D.335	P.R.9+300	Section entre Saint-Nazaire-le-Désert et le col Lescou	Eboulement				56 335 Frs (terrassement en zone éboulée et entochements)	153 (1991)	Idem
D40	R.D.271	P.R.4+980 à 6+050	Section entre Saint-Nazaire-le-Désert et Guniiane	Glissements de terrain	Obstructions de la chaussée		11 267 Frs (déblaiements et réouverture des fossés)		16 (1988)	Route classée d'intérêt cantonal
D41	R.D.750	P.R.1+200	Entre Barzac et le hameau de Viopis	Affaissement	Affaissement de la chaussée	250 m <sup>2</sup> , 20 cm/dh		38 960 Frs (reprofilage en grave-bitume, remplacement de la traversée en tuyaux avec construction de deux têtes de buses pour tenir les terres).		
D42	R.D.539	P.R.0+200 à 0+220	Section entre Pont-de-Quart et Saint-Roman	Erosion torrentielle (crue de la rivière Drôme)	Dégradation de la chaussée, érosion du talus aval et détérioration des épis de protection contre les crues			4 151 Frs (réfection de la chaussée en grave-bitume)	1 761 (1991)	Au cours de l'année 1993, le talus de la chaussée avait déjà du être remis en état
D43	R.D.539	P.R.13+150	Section entre Châtillon-en-Diois et le croisement avec la D.624	Erosion torrentielle (crue de la rivière Drôme)	Erosion de l'accotement de la route	150 ml emportés		59 300 Frs (pose d'un entochement en pied de talus aval et remblaiement)	401 (1992), 6,7% (1985)	
D44	R.D.539	P.R.20+150	Section entre Glandage et le croisement avec la D.624	Idem	Dégradation de la chaussée (ravinement)			30 006 Frs (reconstitution de la chaussée et remplacement d'un aqueduc par des tuyaux)	401 (1992), 6,7% (1985)	
D45	R.D.539	P.R.23+360	Section entre Glandage et le croisement avec la N.75 (col de Grimone)	Glissement de terrain sur talus amont	Obstruction de la chaussée		Déblaiements	27 278 Frs (mise en place d'un entochement et d'un système de drainage en pied de talus amont)	401 (1992), 6,7% (1985)	
D46	R.D.539	P.R.31+150	Section entre Glandage et le croisement avec la N.75 (col de Grimone)	Affaissement	Affaissement de la plateforme			4 784,3 Frs (reprofilage de la chaussée et revêtement)	401 (1992), 6,7% (1985)	
D47	R.D.539	P.R.33+400	Section entre Glandage et le croisement avec la N.75 (col de Grimone)	Affaissement	Fissurations de la plateforme			17 600,2 Frs (déplacement de la chaussée vers le talus amont)	401 (1992), 6,7% (1985)	

Numéro d'identification	Nom de la commune	Numéro de classification INSPE	Nom du canton	Type et Numéro du chemin	Localisation toponymique	Type de phénomène	Type de dommages structurels	Intensité des dommages	Coût des mesures de réhabilitation provisoires (T.T.C)	Coût des mesures de réhabilitation définitives (T.T.C)	Coût des mesures de prévention et/ou de protection (T.T.C.)
C1	Volvent	378	La-Motte-Chalanco	V.C.1	"La Ferme Marafil"	Eboulements, Effondrements	Obstruction de la chaussée et des fossés, rupture de la plateforme	175 m2 de la plateforme (rupture)	de 16 889 Frs (déblaiement)	63 985 Frs (Déblaiements, purge des talus, réouverture des fossés, entrochements, reconstruction plateforme)	
C2	Saint-Nazaire-le-Désert	321	La-Motte-Chalanco	V.C.6	"Le Paro"	Eboulements	Obstruction et dégradation de la chaussée		38 011 Frs (déblaiement, apport de graviers)		
C3	Saint-Nazaire-le-Désert	321	La-Motte-Chalanco	V.C.8	"Les Sourdilions"	Eboulements	Obstruction de la chaussée		8 065 Frs (déblaiements)		
C4	Saint-Nazaire-le-Désert	321	La-Motte-Chalanco	C.R.6	"Les Combes"	Erosion torrentielle					21 170 Frs (redressement du lit du ruisseau atteignant au C.R.6, entrochements, apport et mise en place de graviers en remblais)
C5	Saint-Nazaire-le-Désert	321	La-Motte-Chalanco	C.R.26	"La Moye"	Erosion torrentielle					50 524 Frs (redressement du lit de la rivière atteignant au C.R.26, reconstruction d'un mur de soutènement, entrochement)
C6	Rotier	283	La-Motte-Chalanco	V.C.3	"Les Aumas"	Eboulements	Obstruction et dégradation de la chaussée		118 274 Frs (déblaiements, assainissement, entrochement, apport de graviers, reconstruction d'une traversée en buses de béton)		
C7	Rotier	283	La-Motte-Chalanco	C.R.6	"La Motte"	Eboulements	Obstruction et dégradation de la chaussée		36 262 Frs (déblaiements, apport de graviers, reconstruction d'une traversée en buses de béton)		
C8	La-Motte-Chalanco	215	La-Motte-Chalanco	V.C.6	"La Combe-Lofranche"	Eboulements	Obstruction et dégradation de la chaussée		30 213 Frs (remise en état de la plateforme, déblaiements, entrochement, reconstruction d'une traversée en buses de béton, assainissement)		
C9	La-Motte-Chalanco	215	La-Motte-Chalanco	V.C.12	"Le Clos de Sausier"	Eboulements	Obstruction de la chaussée		2 562 Frs (déblaiements, assainissement)		
C10	La-Motte-Chalanco	215	La-Motte-Chalanco	C.R.1	"Le Villard"		Dégradation de la chaussée		4 210 Frs (remise en état de la chaussée, apport de gravier)		
C11	La-Motte-Chalanco	215	La-Motte-Chalanco	C.R.3	"Les Vayeux"						8 302 Frs (mise en place d'entrochement)
C12	La-Motte-Chalanco	215	La-Motte-Chalanco	C.R.4	"Saint-Pierre"		Dégradation de la chaussée		8 421 Frs (remise en état de la plateforme, apport de gravier)		
C13	La-Motte-Chalanco	215	La-Motte-Chalanco	C.R.5	"La Montagne"	Eboulements	Obstruction et dégradation de la chaussée		9 097 Frs (remise en état de la plateforme, apport de gravier)		
C14	La-Motte-Chalanco	215	La-Motte-Chalanco	C.R.8	"La Bause"	Eboulements	Obstruction de la chaussée		2 562 Frs (déblaiements)		
C15	Estabiet	123	La-Motte-Chalanco	V.C.1	"Le Serre"	Eboulements	Obstruction et dégradation de la chaussée		8 644 Frs (déblaiements, remise à niveau de la chaussée)		
C16	Estabiet	123	La-Motte-Chalanco	C.R.2	"La Lauze"	Eboulements	Obstruction et dégradation de la chaussée		26 436 Frs (déblaiements, remise en état de la plateforme)		
C17	Estabiet	123	La-Motte-Chalanco	C.R.3	"Le Fraysac"	Eboulements	Obstruction et dégradation de la chaussée		9 844 Frs (déblaiements, remise en état de la plateforme)		

C18	Etablet	123	La-Motte-Chalancan	C.R.4	"La Maure"		Dégradation de la chaussée				1 684 Frs (apport de graviers)		
C19	Etablet	123	La-Motte-Chalancan	C.R.7	"Le Bon Huilé"		Dégradation de la chaussée				5 693 Frs (apport de graviers)		
C20	Etablet	123	La-Motte-Chalancan	C.R.8	"L'Espinasse"	Eboulements	Obstruction et dégradation de la chaussée				6 440 Frs (déblaiements, apport de graviers)		
C21	Brette	62	La-Motte-Chalancan	V.C.3	"Les Barbiers"		Dégradation de la chaussée			1 684 Frs (remise en état de la chaussée, apport de graviers)			
C22	Brette	62	La-Motte-Chalancan	C.R.6	"Le Chiron"	Eboulements	Obstruction et dégradation de la chaussée			43 364 Frs (déblaiements, remise en état de la plateforme)			
C23	Bellegarde-en-Diois Amayon	47	La-Motte-Chalancan	V.C.2	"Le Passol"	Eboulements	Obstruction de la chaussée			10 436 Frs (déblaiements)			
C24		12	La-Motte-Chalancan	C.R.6	"La Bâlie"	Eboulements	Obstruction de la chaussée			2 846 Frs (déblaiements)	26 027 Frs (déblaiements, réouverture des fossés, nettoyage du ruisseau sur un passage à gué, reconstruction d'une traversée de béton, mise en oeuvre de gravier)		
C25	Amayon	12	La-Motte-Chalancan	C.R.8	"Le Béra"				4 210 Frs (mise en oeuvre de gravier)			Nouveau tracé de cette voie communale, sera réalisée sur une distance d'environ 100 ml	
C26	Valmaravel	136	Luc-en-Diois	V.C.1, 3, 6		Glissement terrain	Obstruction de la chaussée, rupture de la plateforme			164 261 Frs (déblaiements, mise en oeuvre de gravier)			
C27	Valmaravel	136	Luc-en-Diois	V.C.8	"Le Fournet" (P.R. 0+100)	Erosion torrentielle	Affouillement des cuîtées du pont			91 915 Frs (remise en état et déblaiement du lit de la rivière, reconstruction du radier du pont)			103 419 Frs (protection des berges par enrochements et remblais)
C28	Valdrôme	361	Luc-en-Diois	V.C.5	"Demielle"	Eboulements	Obstruction et dégradation de la chaussée			124 459 Frs (déblaiements, travaux de terrassement, reconstruction d'un remblai stable)	529 214 Frs (reprise des talus, mise en oeuvre d'une couche de fondation, enrochements, mise en oeuvre de concassé, pose de buses, reconstruction de la chaussée)		
C29	Valdrôme	361	Luc-en-Diois	V.C.1		Eboulements	Obstruction et rupture de la plateforme			76 687 Frs (déblaiements, enrochements, reconstruction de la chaussée)			
C30	Valdrôme	361	Luc-en-Diois	V.C.7		Erosion torrentielle	Affouillement des cuîtées du pont			238 232 Frs (renforcement de la cuîtée rive gauche, terrassement pour accès, enrochements)			
C31	Charens	76	Luc-en-Diois	V.C.2	"Le Chilton"	Glissement terrain	Obstruction et rupture de la plateforme			86 578 Frs (déblaiements, mise en oeuvre de gravier, pose de tuyaux, nivellement)			
C32	Beaurières	40	Luc-en-Diois	C.R.4, 9, 14		Glissements terrain	Obstruction et dégradation de la chaussée			369 479 Frs (déblaiements, curage des fossés, mise en oeuvre de gravier, enrochements, reprise du radier, pose de buses de béton)			
C33	Beaumont-en-Diois	36	Luc-en-Diois	V.C.1, 3, 5		Glissements terrain	Obstruction et dégradation de la chaussée			372 496 Frs (déblaiements, mise en oeuvre de gravier, enrochements, pose de buses de béton)			
C34	Lus-la-Croix-Haute	168	Châillon-en-Diois	V.C.16	"Mas Rebuffat"	Affaissement	Affaissement de la plateforme			34 536 Frs (décapage de la chaussée, pose de géotextile, mise en oeuvre de concassé, pose de drains, apport de matériaux drainants, création de fossé, revêtement sur chaussée)			



C35	Lus-la-Croix-Haute	168	Châtillon-en-Diois	V.C.17	"Les Corréardes"	Erosion torrentielle	Dégradation de la chaussée		31 595 Frs (scanification de la chaussée, mise en oeuvre de concassés, revêtement sur en oeuvre de remblais)		
C36	Menglon	178	Châtillon-en-Diois	V.C.10		Affaissements	Rupture de la plateforme		198 631 Frs (enrochements, mise en oeuvre de remblais)		
C37	Boule	55	Châtillon-en-Diois	V.C.7	"Chemin des Rabeyrioux"	Affaissement	Rupture et fissuration de la plateforme	50 ml (rupture) 150 ml (fissurations)	29 413 Frs (déblaiements, pose de géotextile, mise en place de drains, mise en oeuvre de remblais) et 30 158 Frs pour les chemins suivants: V.C.9, 12, 13 et 15	107 285 Frs (Création d'une voie entre la R.D.628 et la V.C.8, dont 2 846 Frs d'acquisitions foncières).	
C38	Boule	55		V.C.9	"Hameaux des Miaux"	Glissement de terrain et Ravinements	Obstruction (glissement) et (ravinement) de la chaussée				
C39	Boule	55		V.C.12, 13		Ravinements	Dégradation de la chaussée				
C40	Boule	55		V.C.15		Glissement terrain	Obstruction de la chaussée				
C41	Vachères-en-Quint	359	Die	VC.1	"Touillé"	Affaissements	Rupture de la plateforme		13 291 Frs (scanification de la chaussée, pose de drains, pose de bidim, remblais de galets, reprofilage de la chaussée)		
C42	Romeyer	282	Die	C.R.14, 24		Ravinements intenses	Dégradation de la chaussée		21 628 Frs (mise en oeuvre de matériaux graveleux, ouverture de fossés)		
C43	Montmaur-en-Diois	205	Die	C.R.17	"Les Gentons"	Erosion torrentielle	Dégradation de la chaussée		16 224 Frs (enrochements en pied de talus)		
C44	Aix-en-Diois	1	Die	C.R.5, 16		Inondation, glissement terrain	Dégradation intense de la chaussée et rupture partielle de la plateforme	10 ml (dégradations) 2m (largeur emportée par glissement)	33 180 Frs (enrochements, mise en oeuvre de béton)		

## **ANNEXE VII**

### ***Evénements du Diois : illustrations photographiques***

***ANNEXE VII.1 - glissements célèbres du Claps et de Bonneval-en-Diois***

***ANNEXE VII.2 - vues de quelques glissements consécutifs aux intempéries des 6 et 7 janvier  
1994***

***ANNEXE VII.3 - vues multiples de la coulée de débris principale de la Bâtie-des-Fonds***

**DIOIS : Glissements célèbres du Claps (1442) et de Bonneval-en-Diois (depuis 1950)**  
(clichés F. Leone)

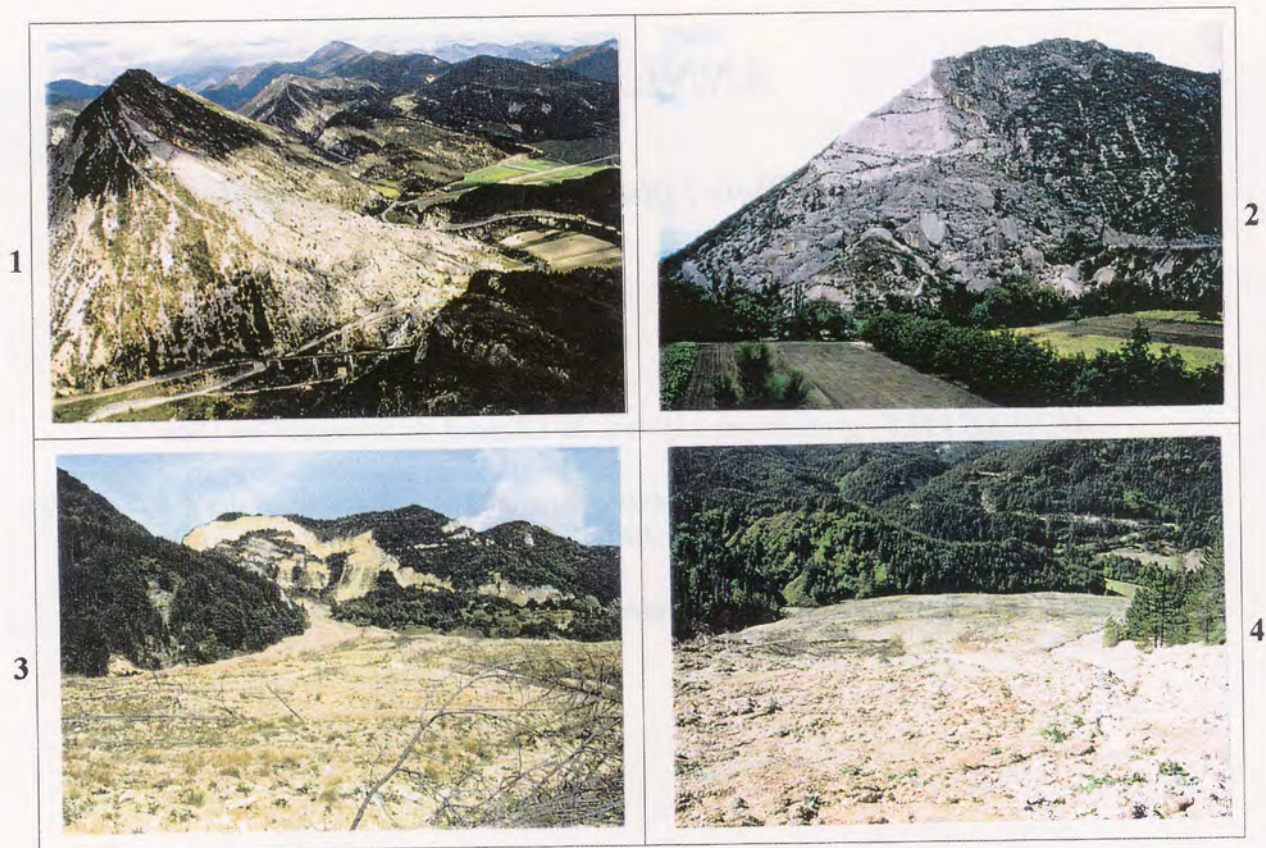


Photo 1 : vue générale du glissement rocheux du Claps et de la plaine amont formée par l'ancien lac (mai 1995).

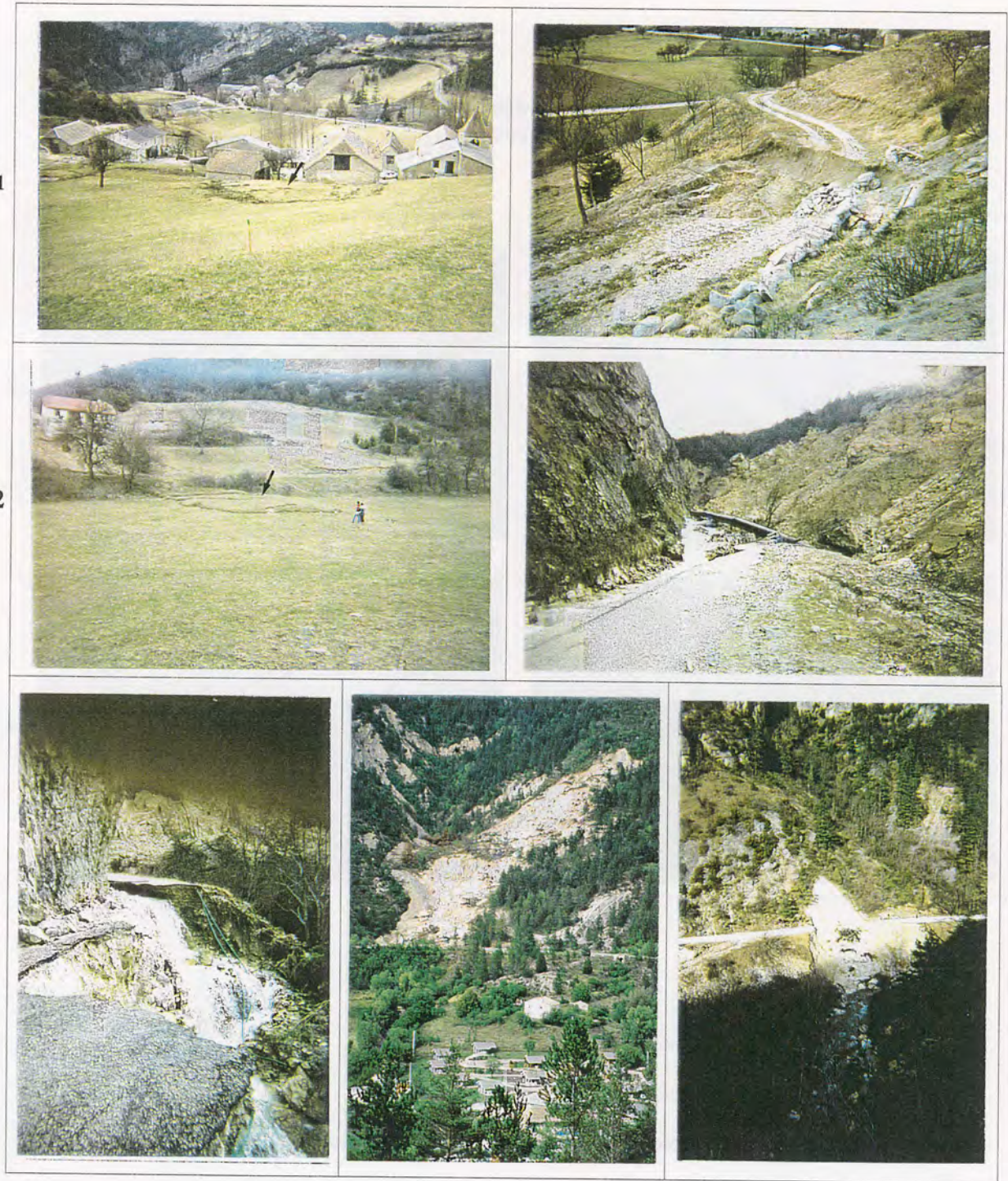
Photo 2 : vue de face du glissement du Claps (septembre 1994).

Photo 3 : vue depuis l'aval du glissement complexe de Bonneval (zone d'affaissement rocheux et coulée de boue) (octobre 1991).

Photo 3 : vue depuis l'amont de la coulée de boue de Bonneval (octobre 1991).

**DIOIS : Vues de quelques glissements consécutifs aux intempéries de Janvier 1994**

(clichés F. Leone)



5

6

7

Photo 1 : glissement superficiel au dessus du village de Glandage (mars 1994).

Photo 2 : glissement pelliculaire (avec bourrelets caractéristiques) sur la commune de Glandage (mars 1994).

Photo 3 : glissement circulaire affectant un chemin privé sur la commune de Glandage (mars 1994).

Photo 4 : vue du retrécissement de la vallée du ruisseau de Boulc en pied du glissement de Ravel-et-Ferrier (mars 1994).

Photo 5 : vue de la route d'accès à Boulc (R.D.148) détruite par le ruisseau du fait du retrécissement de la vallée (mars 1994).

Photo 6 : vue du glissement de Beaurières menaçant la voie ferrée Paris-Briançon (septembre 1994).

Photo 7 : exemple de rupture de plateforme routière consécutivement à un glissement - commune de Boulc (mars 1994).

**DIOIS : Vues multiples de la coulée de débris principale de La Bâtie-des-Fonds  
(route R.D. 106) - janvier 1994** (clichés F. Leone, septembre 1994)

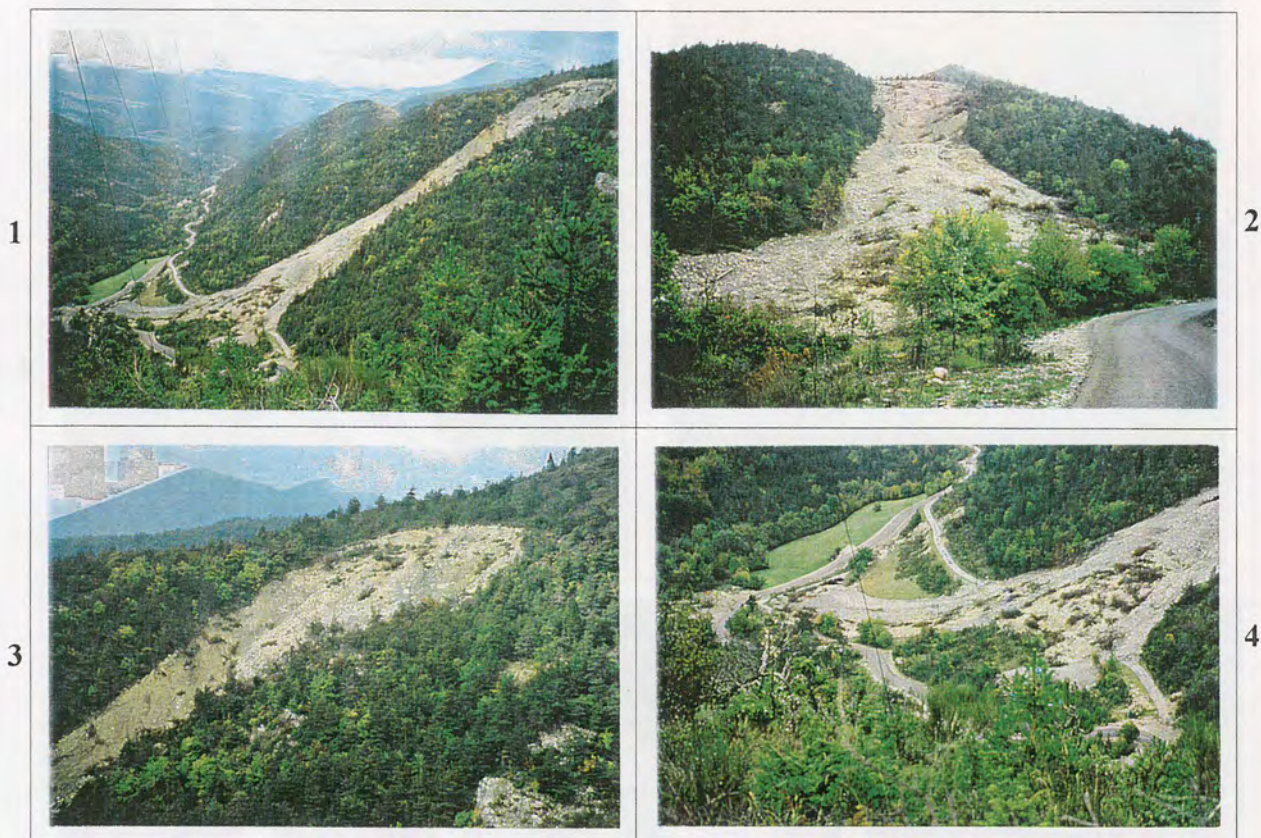


Photo 1 : vue latérale.

Photo 2 : vue de face.

Photo 3 : vue rapprochée de la zone de départ.

Photo 4 : vue rapprochée des accumulations de pied.

## ANNEXE VIII

**Modèle de fiche communale de déclaration de dommages destinée à la préfecture pour bénéficier de l'arrêté de catastrophe naturelle**

N° de la commune	N° de la commune	N° de la commune

CATASTROPHES NATURELLES  
 -----  
 Loi n° 82-600 du 13 juillet 1982  
 modifiée  
 -----

FICHE DE SYNTHESE

Mairie de : DIE

Arrondissement de : DIE  
 Canton de : DIE

1. Date et heure :

- de début de l'évènement : 06 JANVIER 1993.....
- de fin de l'évènement : 08 JANVIER 1993.....

2. Classification de l'évènement :

- inondation par crue de rivière (préciser cours d'eau concerné).....
- eaux de ruissellement .....
- coulée de boue .....
- éboulement, glissement ou affaissement de terrain..
- subsidence (effondrement de terrain suite baisse nappe phréatique) .....
- avalanche .....
- secousses telluriques, séisme .....
- raz-de-marée .....
- autres évènements (en préciser la nature) .....

3. Principaux dommages constatés :

- inondations de caves, d'habitations, ou de locaux professionnels .....
- toitures arrachées ou endommagées .....
- chutes d'arbres sur constructions ou véhicules ....
- habitations détruites ou endommagées .....
- terrains emportés .....
- autres dommages (en préciser la nature) .....
- ouvrages d'art (ponts) à vérifier .....

4. Inondations et coulées de boue :

Catégories de sinistres ou biens endommagés	Indicateurs physiques	Estimations financières
- particuliers		
- artisans, commerçants ou industriels		
- bâtiments publics		
- bâtiments agricoles et cheptel		

5. Sinistres survenus sur le territoire de la commune durant les 3 années précédant le sinistre : (en préciser la nature et les dates) intempéries du 22/09/1992, Intempéries du 09/06/1993. dans les deux cas, le sinistre a fait l'objet d'une classification "catastrophe naturelle".  
 Fait à, DIE (Drôme) le 18 JANVIER 1993



OBSERVATIONS : Films vidéo amateurs et photos, visibles au Centre de Secours Principal de DIE.









## RESEAU DEPARTEMENTAL

N°	Ph	C1	C2	C3	CT	D1	D2	D3	D4
1	6	-	-	213 480	213 480	0	0	0	0
2	4	-	-	102 470	102 470	1	0	0	0
3	1	74 564	112 362	-	186 926	0	0	1	1
4	5	-	275 271	-	275 271	1	0	0	0
5	1	45 079	426 367	-	471 446	0	0	1	1
6	1	117 812	542 595	-	660 407	0	0	1	0
7	2	-	85 866	-	85 866	0	1	0	0
8	1	127 379	13 236	-	140 615	0	0	0	1
9	6	-	-	45 780	45 780	0	0	0	0
10	1	283 952	2 000 000	50 000 000	52 283 952	0	0	1	1
11	1	-	-	-	-	1	1	0	0
12	6	-	432 238	32 022	464 260	0	0	0	1
13	2	-	165 743	-	165 743	0	1	0	0
14	1	173 275	51 235	-	224 510	0	0	0	1
15	1	21 997	29 650	-	51 647	0	0	0	1
16	2	-	75 619	-	75 619	0	0	0	1
17	2	-	21 140	-	21 140	0	1	0	0
18	2	-	13 698	-	13 698	0	1	0	0
19	1	-	58 410	-	58 410	0	0	1	0
20	1	90 338	-	-	90 338	0	0	1	0
21	3	11 860	-	11 267	23 127	0	0	1	0
22	3	42 488	83 989	-	126 477	0	1	1	0
23	3	60 095	23 127	33 445	116 667	1	0	1	0
24	2	-	51 152	-	51 152	1	1	0	0
25	2	-	33 208	-	33 208	1	1	0	0
26	1	20 352	-	42 222	62 574	0	1	1	0
27	2	-	56 015	-	56 015	0	1	0	0
28	2	-	712	46 942	47 654	1	0	0	0
29	2	-	72 500	-	72 500	0	1	0	0
30	2	-	25 143	-	25 143	1	0	0	0
31	6	-	212 887	-	212 887	0	0	0	1
32	6	-	-	71 753	71 753	0	0	0	0
33	1	-	41 510	-	41 510	1	1	1	0
34	2	-	38 071	-	38 071	1	0	0	0
35	3	-	16 485	-	16 485	0	0	0	0
36	3	13 070	17 790	16 130	46 990	1	0	1	0
37	1	-	64 756	-	64 756	1	1	0	0
38	1	4 744	-	-	4 744	0	1	0	0
39	3	-	-	56 335	56 335	0	0	0	0
40	1	11 267	-	-	11 267	0	0	1	0
41	2	-	38 960	11 860	50 820	0	1	0	0
42	6	-	4 151	61 672	65 823	1	0	0	0
43	6	-	59 300	-	59 300	0	0	0	1
44	5	-	30 006	-	30 006	1	0	0	0
45	1	-	-	27 278	27 278	0	0	1	0
46	2	-	4 784	-	4 784	0	1	0	0
47	2	-	-	17 600	17 600	1	0	0	0

## Ph : PHENOMENES

MT : mouvements de terrain

1 : Glissement

2 : Affaissement

3 : Eboulement

H : hydrauliques

4 : Inondation

5 : Ravinement ou ruissellement intense

6 : Erosion torrentielle

## C : COUTS (en francs 1993)

C1 : coûts des réparations de première urgence

C2 : coûts des réparations définitives

C3 : coûts des mesures de prévention et de protection

CT : coûts totaux

## D : MODES D'ENDOMMAGEMENT

D0 : Endommagement des abords

D1 : Dégradation de la chaussée

D2 : Affaissement de la plateforme

D3 : Obstruction de la chaussée

D4 : Rupture de la plateforme

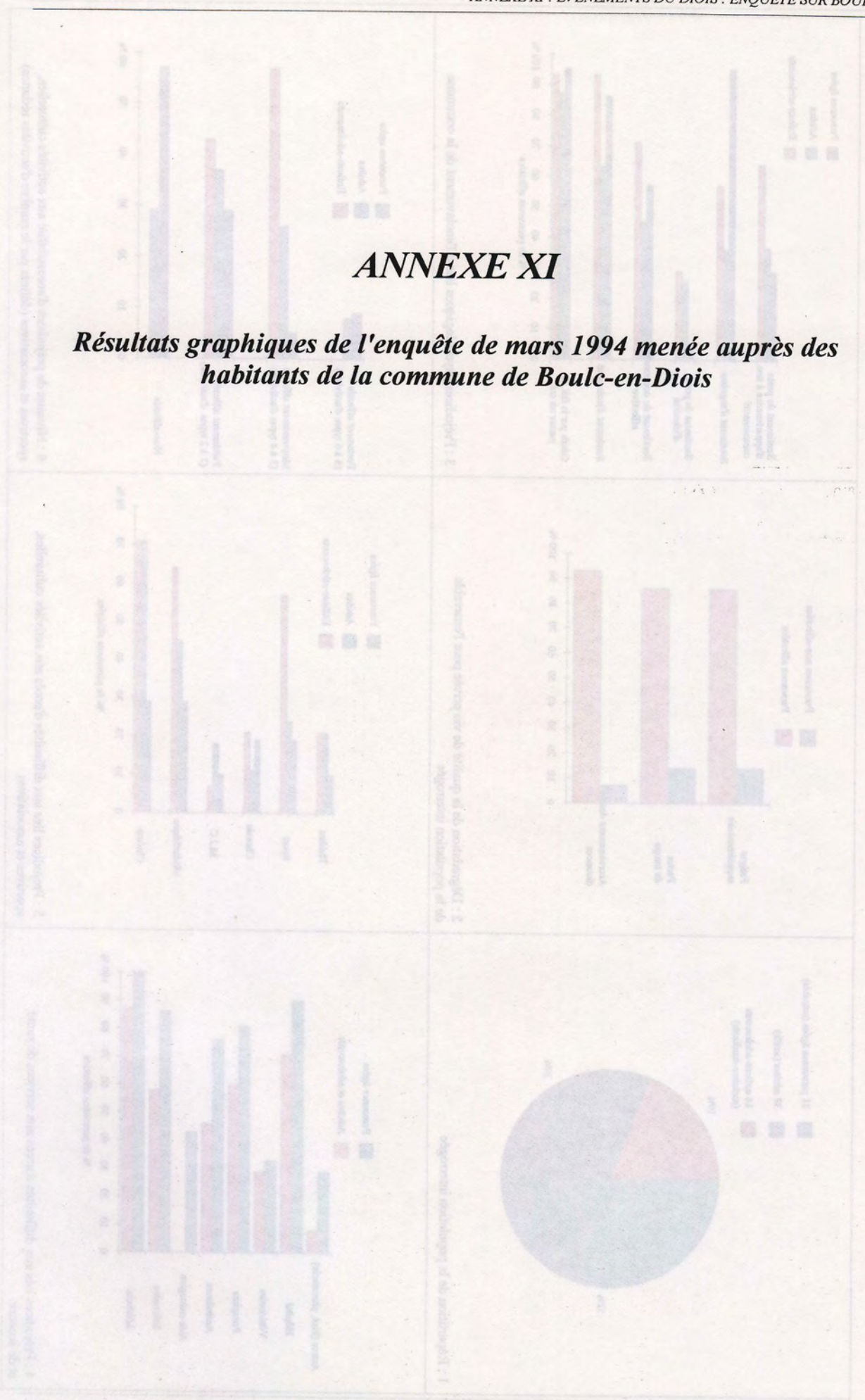
N° section	N° évènement	N° route	Ph	C1	C2	C3	CT	D0	D1	D2	D3	D4
1	1	RD 93	H	-	-	213 480	213 480	1	0	0	0	0
2	41	DR 750	MT	-	38 960	11 860	50 820	0	0	1	0	0
3	8	RD 624	MT	127 379	13 236	-	140 616	0	0	0	0	1
4	44	RD 539	H	-	30 006	-	30 006	0	1	0	0	0
5	45,46,47	RD 539	MT	-	4 784	44 878	49 662	0	1	1	1	0
6	43	RD 539	H	-	59 300	-	59 300	0	0	0	0	1
7	10	RD 148	MT	283 952	2 000 000	50 000 000	50 283 952	0	0	0	1	1
8	11	RD 348	MT	-	-	-	-	0	1	1	0	0
9	9	RD 148	H	-	-	45 780	45 780	1	0	0	0	0
10	7	RD 753	MT	-	85 866	-	85 866	0	0	1	0	0
11	33,34	RD 135	MT	-	79 581	-	79 581	0	2	1	1	0
12	35	RD 135	MT	-	16 485	-	16 485	1	0	0	0	0
13	40	RD 271	MT	11 267	-	-	11 267	0	0	0	1	0
14	37	RD 202	MT	-	64 756	-	64 756	0	1	1	0	0
15	24,25	RD 173	MT	-	51 152	-	51 152	0	2	2	0	0
16	23	RD 173	MT	60 095	23 127	33 445	116 667	0	1	0	1	0
17	38,39	RD 335	MT	4 744	-	56 335	61 079	1	0	1	0	0
18	36	RD 135	MT	13 070	17 790	16 130	46 990	0	1	0	1	0
19	25	RD 173	MT	-	33 208	-	33 208	0	1	1	0	0
20	42	RD 539	H	-	4 151	61 672	65 823	0	1	0	0	0
21	32	RD 61	H	-	-	71 753	71 753	1	0	0	0	0
22	26	RD 61	MT	20 352	-	42 222	62 574	0	0	1	1	0
22 bis	31	RD 61	H	-	212 887	-	212 887	0	0	0	0	1
23	30	DR 61	MT	-	25 143	-	25 143	0	1	0	0	0
24	27,28,29	RD 61	MT	-	129 227	46 942	176 169	0	1	2	0	0
25	2,4	RD 93	H	-	275 271	102 470	377 741	0	2	0	0	0
26	13	RD 145	MT	-	165 743	-	165 743	0	0	1	0	0
27	21	RD 243	MT	11 860	-	11 267	23 127	0	0	0	1	0
28	19,2	RD 106	MT	90 338	58 410	-	148 748	0	0	0	2	0
29	5,6	RD 106	MT	162 891	968 962	-	1 131 853	0	0	0	4	3
30	22	RD 338	MT	42 488	83 989	-	126 477	0	0	1	1	0
31	15	RD 438	MT	21 997	29 650	-	51 647	0	0	0	0	1
32	16,17,18	RD 106	MT	-	110 457	-	110 457	0	0	2	0	1
33	3,4	RD 93	MT	74 564	112 362	-	186 926	0	1	0	1	1
34	12	RD 306	H	-	432 238	32 022	464 260	0	0	0	0	1
35	14	RD 150	MT	173 275	51 235	-	224 510	1	0	0	0	1

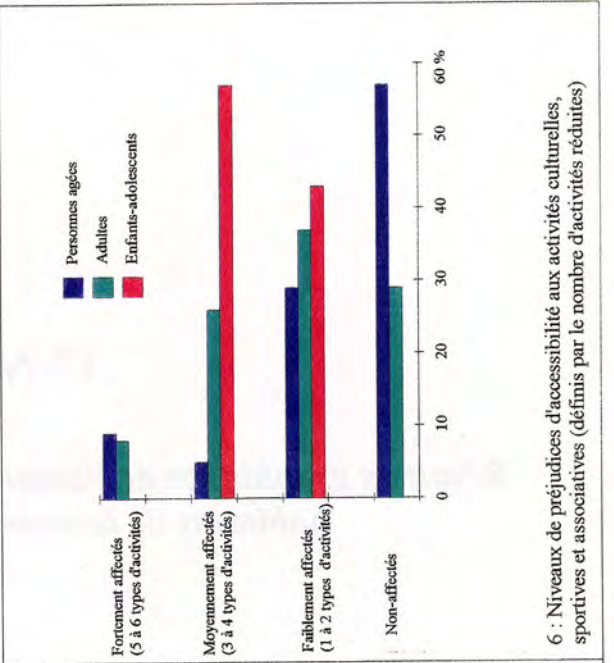
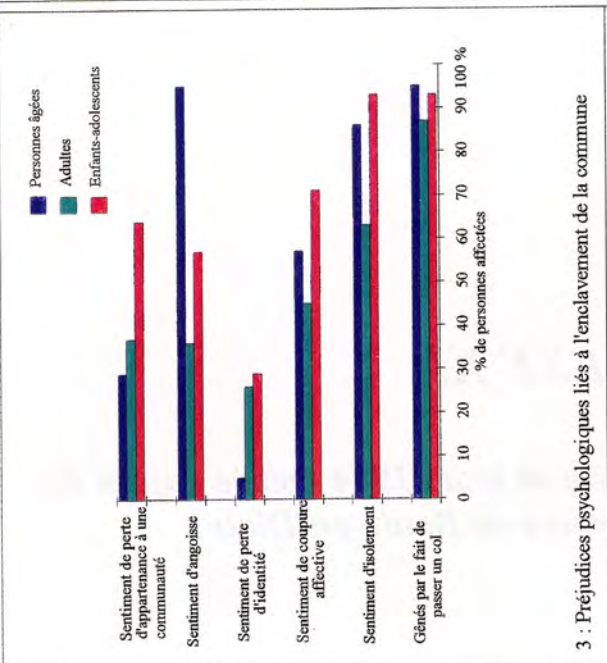
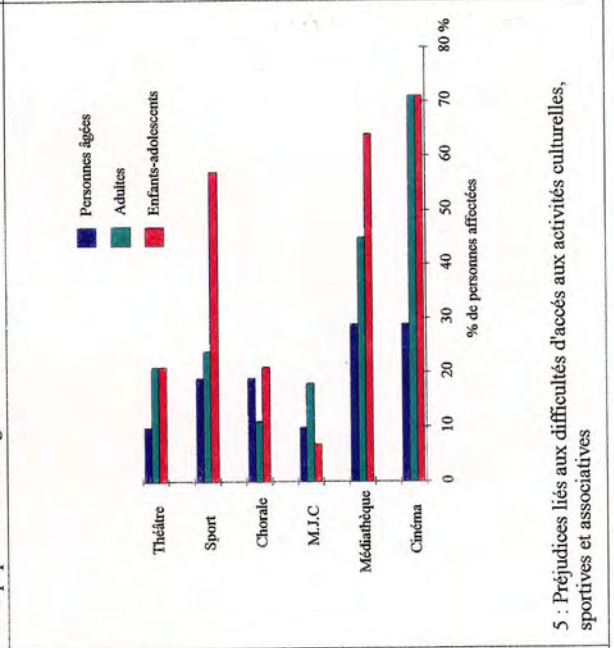
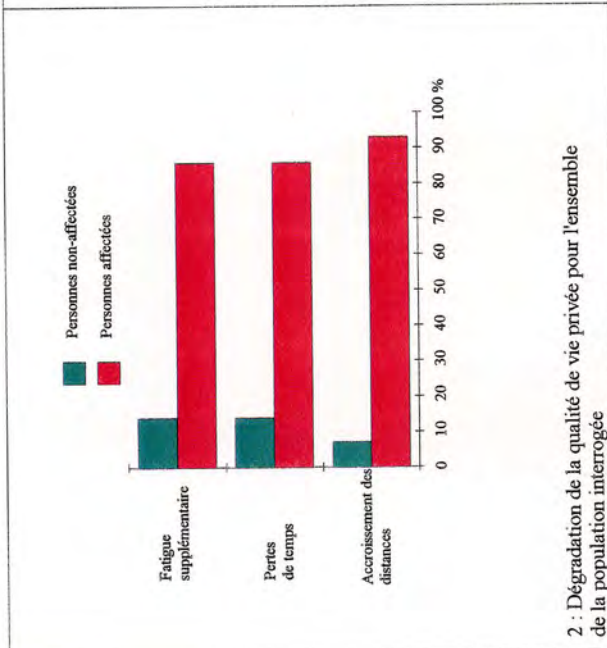
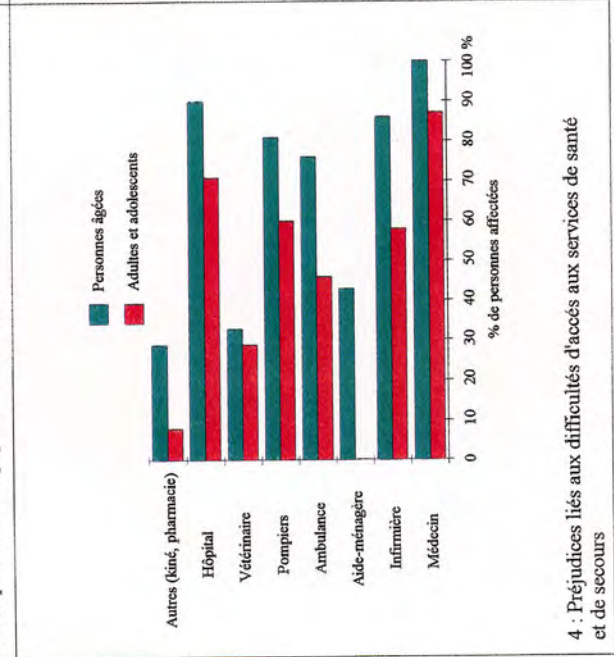
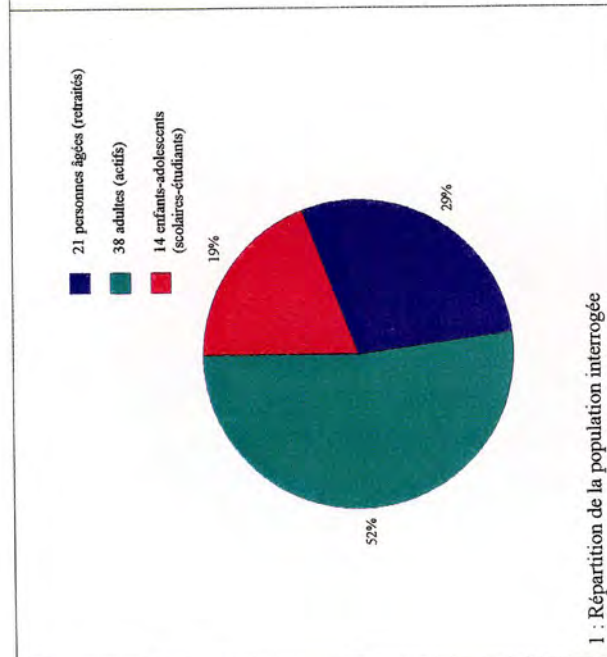
## RESEAU COMMUNAL

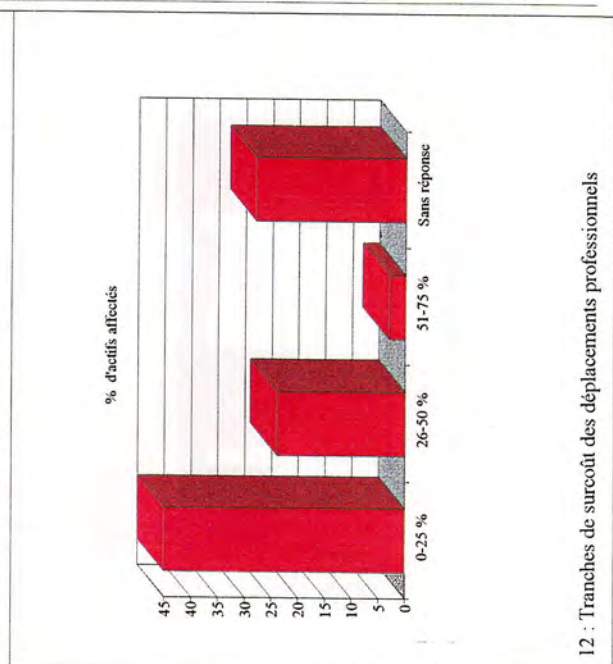
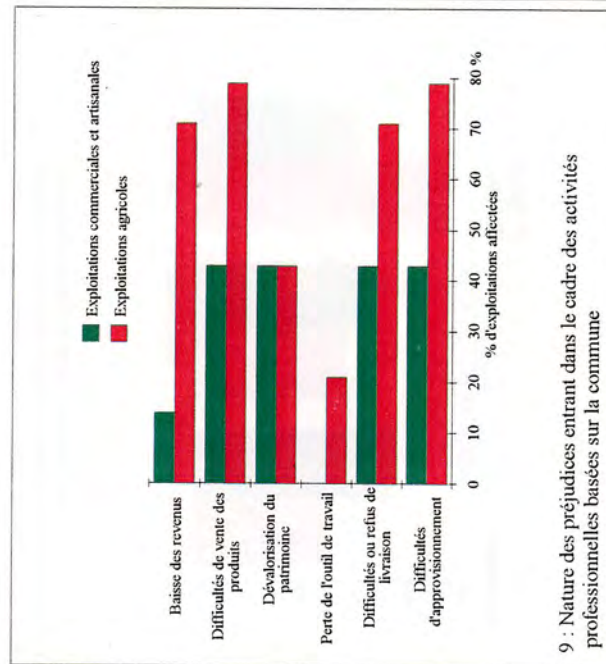
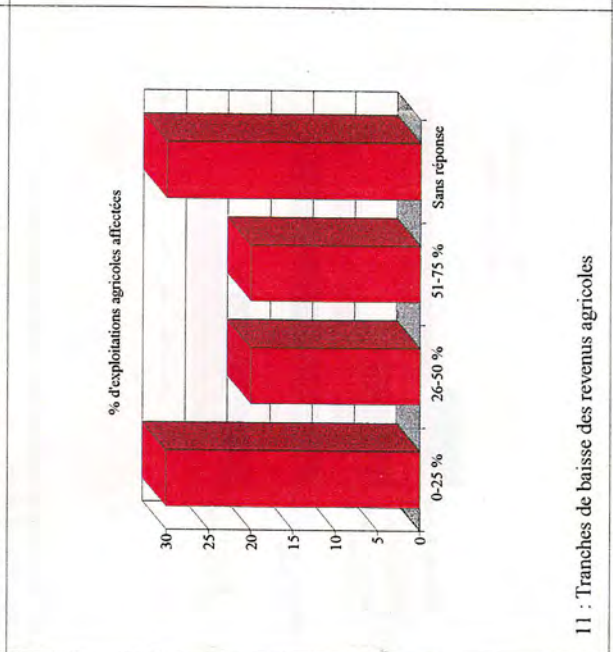
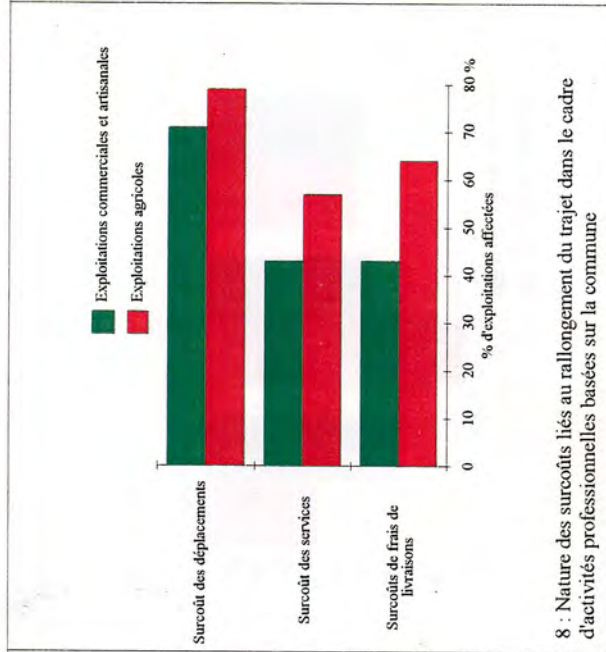
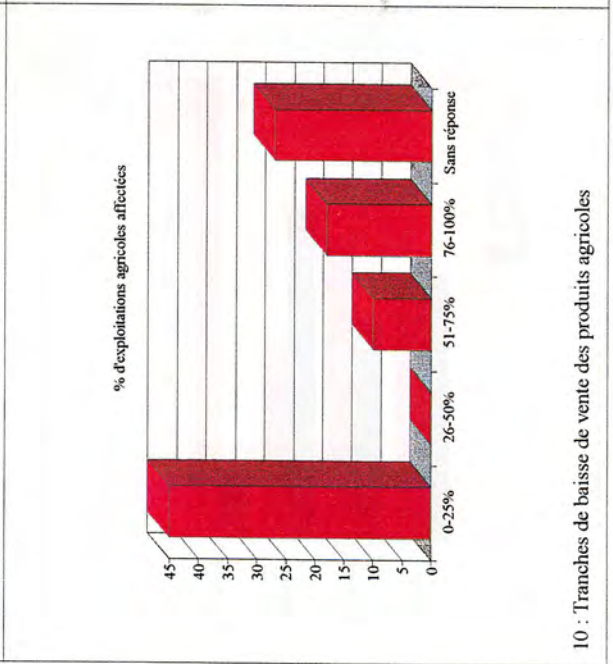
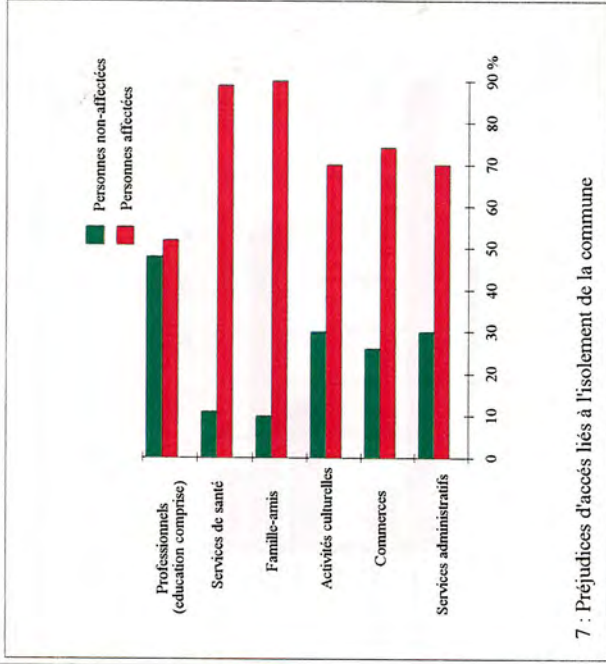
N°INSEE	Ph	C1	C2	C3	CT	D1	D2	D3	D4
1	1	33 180	-	-	33 180	1	0	0	1
12	3	2 846	26 027	-	28 873	0	0	1	0
12	5	4 210	-	-	4 210	1	0	0	0
36	1	372 496	-	-	372 496	1	0	1	0
40	1	369 479	-	-	369 479	1	0	1	0
47	3	10 436	-	-	10 436	0	0	1	0
55	2	29 413	-	107 285	136 698	0	1	0	0
55	1	30 158	-	-	30 158	1	0	1	0
55	1	-	-	-	-	0	0	1	0
62	3	43 364	-	-	43 364	1	0	1	0
62	5	1 684	-	-	1 684	1	0	0	0
76	1	86 578	-	-	86 578	0	0	1	1
123	3	8 644	-	-	8 644	1	0	1	0
123	3	26 436	-	-	26 436	1	0	1	0
123	3	-	9 844	-	9 844	1	0	1	0
123	3	-	6 440	-	6 440	1	0	1	0
123	5	-	1 684	-	1 684	1	0	0	0
123	5	-	5 693	-	5 693	1	0	0	0
136	1	164 261	-	-	164 261	0	0	1	1
136	6	91 915	-	103 419	195 334	0	0	0	0
168	2	34 536	-	-	34 536	0	1	0	0
168	6	31 595	-	-	31 595	1	0	0	0
178	2	198 631	-	-	198 631	0	0	0	1
205	6	16 224	-	-	16 224	1	0	0	0
215	3	30 213	-	-	30 213	1	0	1	0
215	3	2 562	-	-	2 562	0	0	1	0
215	3	9 097	-	-	9 097	1	0	1	0
215	3	2 562	-	-	2 562	0	0	1	0
215	5	4 210	-	-	4 210	1	0	0	0
215	6	-	-	8 302	8 302	0	0	0	0
215	5	8 421	-	-	8 421	1	0	0	0
282	5	21 628	-	-	21 628	1	0	0	0
283	3	118 274	-	-	118 274	1	0	1	0
283	3	36 262	-	-	36 262	1	0	1	0
321	3	38 011	-	-	38 011	1	0	1	0
321	3	8 065	-	-	8 065	0	0	1	0
321	6	-	-	21 170	21 170	0	0	0	0
321	6	-	-	50 524	50 524	0	0	0	0
359	2	13 291	-	-	13 291	0	1	0	0
361	3	124 459	529 214	-	653 673	1	0	1	0
361	1	76 687	-	-	76 687	0	0	1	1
361	6	238 232	-	-	238 232	0	0	0	0
378	1	16 889	63 985	-	80 874	0	0	1	1

## ANNEXE XI

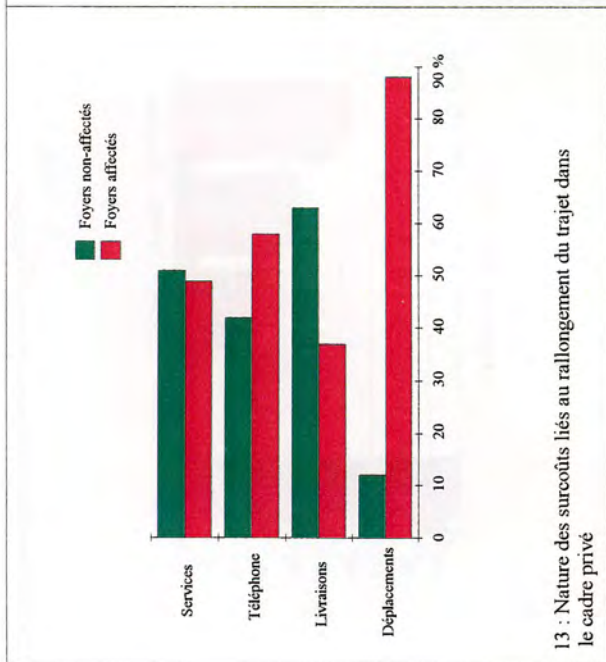
### Résultats graphiques de l'enquête de mars 1994 menée auprès des habitants de la commune de Boulc-en-Diois



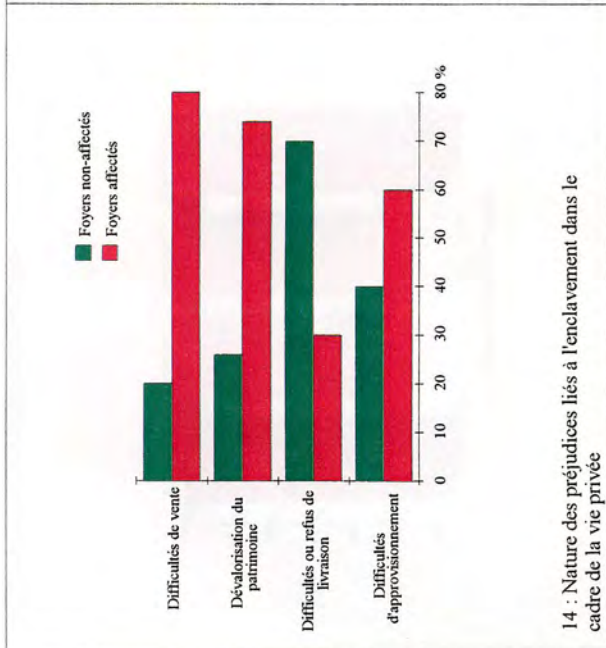




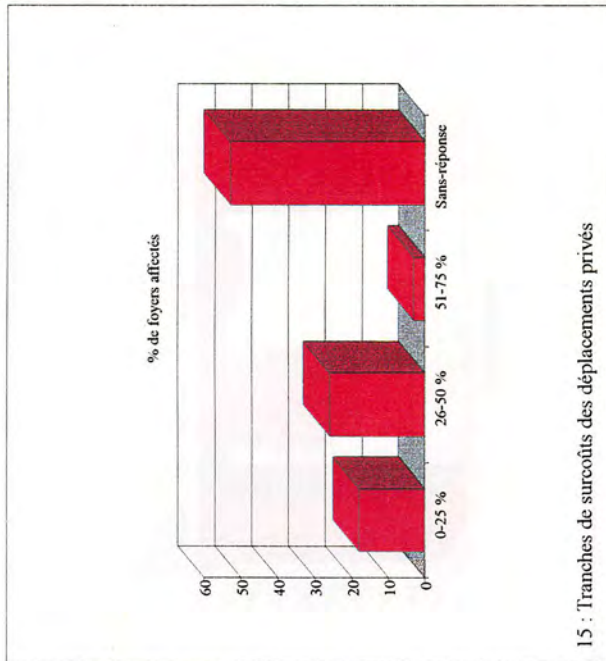




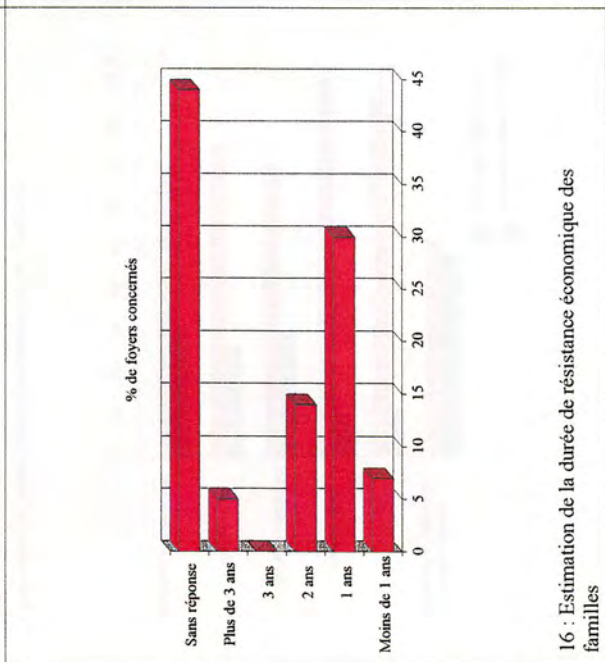
13 : Nature des surcoûts liés au rallongement du trajet dans le cadre privé



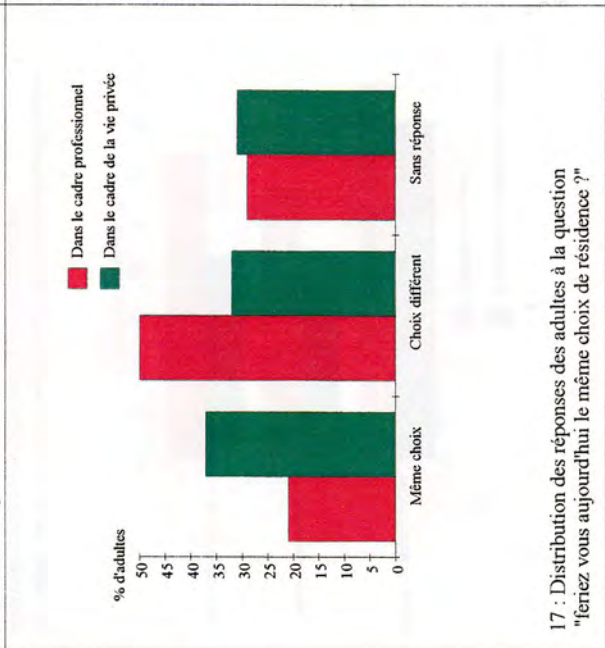
14 : Nature des préjudices liés à l'enclavement dans le cadre de la vie privée



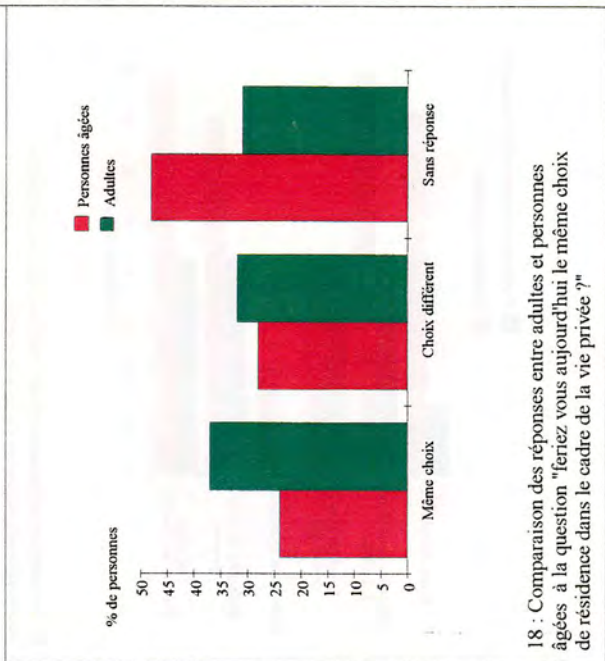
15 : Tranches de surcoûts des déplacements privés



16 : Estimation de la durée de résistance économique des familles



17 : Distribution des réponses des adultes à la question "feriez vous aujourd'hui le même choix de résidence ?"



18 : Comparaison des réponses entre adultes et personnes âgées à la question "feriez vous aujourd'hui le même choix de résidence dans le cadre de la vie privée ?"

## ANNEXE XII

*Modèle du questionnaire de l'enquête de mai 199 menée auprès des artisans et commerçants de la commune de Châtillon-en-Diois*

The image shows a large, faint rectangular area containing a questionnaire form. The text within the form is extremely light and mostly illegible. It appears to be a series of questions with checkboxes for responses, arranged in a structured layout. The form is centered on the page and occupies most of the vertical space below the title.

**Impacts économiques du glissement de terrain de Boulc sur la commune de Châtillon-en-Diois**

1°) Quel type de commerce ou d'activité exercez-vous ?  
.....

2°) Etes-vous :

- Propriétaire   
Locataire

3°) Nombre d'employés :  
.....

4°) Votre activité reposait-elle sur la clientèle Boulcoise ?

- oui   
non   
sans réponse

Si oui, pouvez-vous exprimer le pourcentage de Boulcois dans votre clientèle (avant le glissement de terrain) : .....%

5°) Les événements de Boulc ont-ils affecté votre activité ?

- oui   
non   
sans réponse

6°) Si oui, la baisse de clientèle a-t-elle été :

- subite   
progressive

7°) La baisse se maintient-elle ?

- oui   
non   
sans réponse

8°) Etes-vous amenés à vous déplacer auprès de votre clientèle ?

- oui   
non   
sans réponse

9°) Si oui, connaissez-vous des difficultés pour accéder à votre clientèle ?

- oui   
non   
sans réponse

10°) Si vous subissez des difficultés pour accéder à votre clientèle, faites vous encore l'effort de vous déplacer auprès d'elle ?

- oui  Pour combien de temps encore ?.....  
non   
sans réponse

11°) Avez-vous subi une baisse de votre chiffre d'affaire ?

- oui   
non   
sans réponse

- Si oui, pouvez-vous l'exprimer en pourcentage ?

- En moyenne depuis quatre mois : .....%  
du 01.01.94 au 31.01.94 : .....%  
du 01.02.94 au 28.02.94 : .....%  
du 01.03.94 au 31.03.94 : .....%  
du 01.04.94 au 30.04.94 : .....%

12°) Pouvez-vous nous donner votre chiffre d'affaire annuel ?

- oui  ..... Frs  
non

13°) Le ralentissement de votre activité se traduit-il par des répercussions sur vos employés ?

- oui  précisez : .....  
non   
sans réponse

14°) A terme, pensez-vous que toutes ces difficultés peuvent remettre en cause le devenir de votre activité ?

- oui   
non   
sans réponse

A quelle échéance ? .....

## ANNEXE XIII

### *Chronologie de la catastrophe de la Salle-en-Beaumont*

**Vendredi 7 janvier 1994 :**

**Après-midi :**

Les pluies torrentielles et les inondations qui persistent depuis trois jours conduisent à la création d'un plan de solidarité pour assécher les caves et abriter les troupeaux sur la commune de la Salle-en-Beaumont.

**Soirée :**

Des jeunes sont réunis au foyer du village. Au coeur de la nuit, au moment de leur départ ils entendent des bruits et voient les murs des maisons se fissurer. Ils alertent alors les habitants endormis.

**Samedi 8 janvier :**

1h15 : Le glissement se produit au lieu dit les Parajons sur le flanc sud-ouest de la montagne du Beaumont, emportant 7 habitations, tuant 4 personnes, coupant la R.N.85 et obstruant le ruisseau de la Salle.

1h45 : Evacuation en catastrophe.

2h00 : La mairie est transformée en quartier général des secours.

2h30 : La DDE et 43 sapeurs pompiers arrivent sur le site.

2h50 : Arrivée de 60 militaires de la gendarmerie nationale qui vont assurer la surveillance des lieux et éloigner les curieux, car en plus du glissement, une forte odeur de gaz se dégage des maisons sinistrées. Plusieurs barrages sont mis en place pour filtrer les familles des sinistrés.

4h00 : L'eau est montée de un mètre en arrière du barrage.

6h00 : Arrivée du préfet et demande d'intervention des services du RTM.

6h40 : Le ruisseau sort de son lit et une nouvelle coulée de boue se produit.

7h30 : Le maire décide d'endiguer le cours d'eau montant en amont du barrage.

8h20 : Le préfet lance les interventions de secours.

8h30 : Début des interventions de déblaiement.

11h00 : Début des recherches des portés disparus.

**Après midi :**

Arrivée de deux bergers allemands de l'équipe cynophile départementale d'intervention et de recherche des sapeurs pompiers spécialisés de Grenoble et Echirolles.

**Dimanche 9 janvier :**

Déblaiement pour les recherches des 4 disparus.  
Le niveau du lac baisse de 1,5 mètre.

**Lundi 10 janvier :**

Les fouilles se poursuivent et les corps de deux des quatre disparus sont retrouvés sous les décombres.

**Mardi 11 janvier :**

Mise en place d'un dispositif de surveillance pour maîtriser l'écoulement de l'eau et surveiller le glissement.  
En prévision d'une éventuelle rupture du barrage, des petites brèches sont ouvertes pour libérer une partie de l'eau en plus du pompage.

**Mercredi 12 janvier :**

Découvertes des corps des deux dernières victimes.

**Jeudi 13 janvier :**

Un dispositif de surveillance est maintenu en place et des pelleteuses stabilisent le pied du glissement.  
Les habitants reprennent leurs activités quotidiennes et préparent les obsèques des disparus.

**Vendredi 28 janvier :**

La déviation provisoire de la R.N. 85 est ouverte. Il s'agit de la première étape du retour à une vie normale.

**Après la catastrophe :**

Création d'une association des sinistrés de la Salle-en-Beaumont.  
Relogement de cinq familles qui ont dû quitter le secteur sinistré (construction de nouveaux logements).

La Salle-en-Beaumont : vues des effets du glissement de la combe des Parajons  
du 8 janvier 1994

## ANNEXE XIV

### *Catastrophe de la Salle-en-Beaumont : illustrations photographiques*

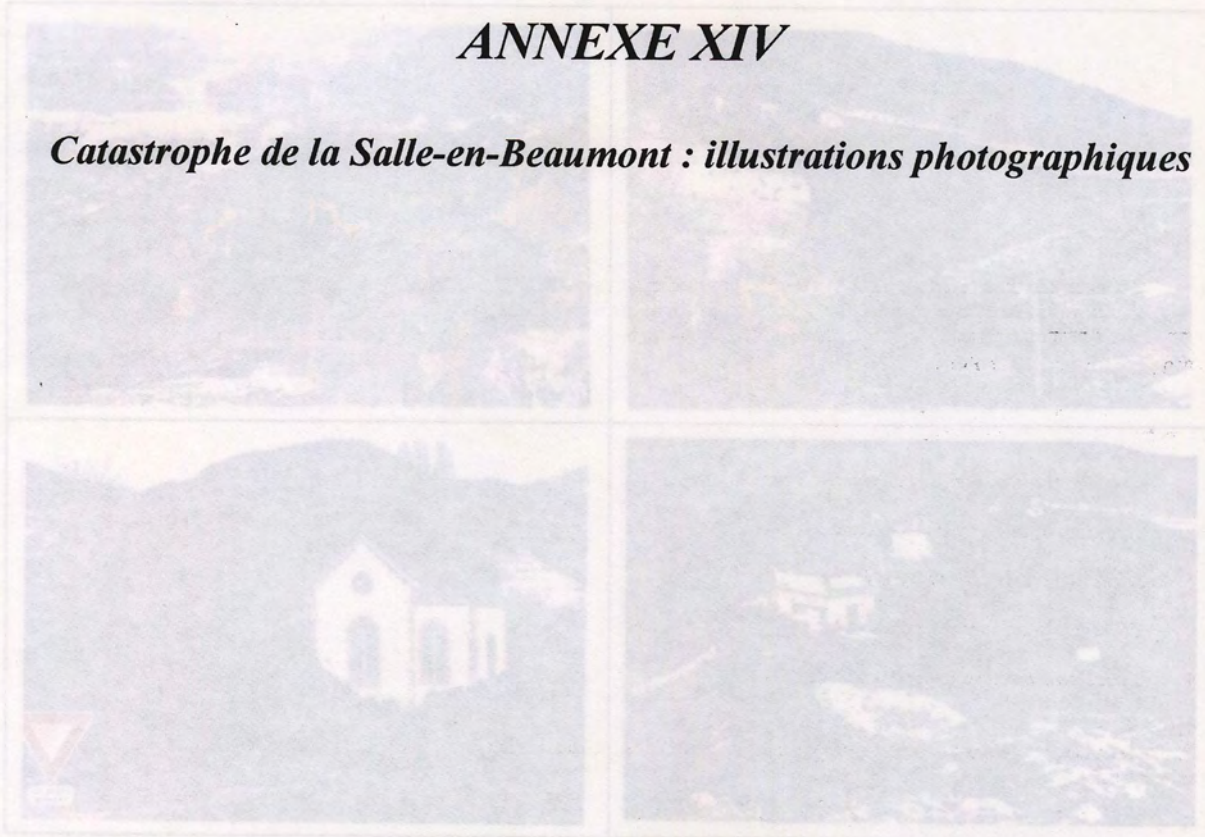


Photo 1 : vue générale du glissement (cliché H. Véspeaux, 11/01/94).

Photo 2 : vue des fouilles pour retrouver les dernières victimes ensevelies sous 20 m de terre (cliché H. Véspeaux, 11/01/94).

Photo 3 : vue d'une des habitations endommagées situées au front de la coulée (cliché P. Lison, 11/01/94).

Photo 4 : vue de l'église partiellement détruite par la poussée exercée au front de la coulée (cliché H. Véspeaux, 11/01/94).

### La Salle-en-Beaumont : vues des effets du glissement de la combe des Parajons du 8 janvier 1994



Photo 1 : vue générale du glissement (cliché E. Velasquez, 11/01/94).

Photo 2 : vue des fouilles pour retrouver les dernières victimes ensevelies sous 20 m de terre (cliché E. Velasquez, 11/01/94).

Photo 3 : vue d'une des habitations endommagées situées au front de la coulée (cliché F. Leone, 11/01/94).

Photo 4 : vue de l'église partiellement détruite par la poussée exercée au front de la coulée (cliché E. Velasquez, 11/01/94).





**RESEAUX**

(d'après Merlin, 1994 et Siméon, 1988)

**ROUTES :**

Investissements routiers en rase campagne en Francs 1993 (d'après Merlin, 1994) :

- autoroute à 2\*2 voies : **28 MF/km** ;
- route express à 2\*2 voies : **20 MF/km** ;
- route nationale à 3 voies : **9 MF/km** ;
- route départementale à 2 voies : **3,3 MF/km** ;
- route communale : **1,7 MF/km**.

Investissements routiers en bordure littorale (d'après Siméon, 1988) :

- **8 MF/km** pour une route départementale de 7 m de large en terrain plat incluant 15 à 20 % d'ouvrages d'art.

**CHEMINS DE FER** (d'après Merlin, 1994) :

- voie ferrée double électrifiée : **28 MF/km** ;
- voie ferrée unique : **15 MF/km** ;
- la ligne de TGV sud-est : **26 MF/km** (1993) ;
- la ligne TGV Atlantique : **42 MF/km** ;
- la ligne TGV Nord et Méditerranée : **50 MF/km** (prévisions).

**METRO** (d'après Merlin, 1994) :

Ordres de grandeur en région parisienne :

- tronçon souterrain de R.E.R (grand gabarit) avec une station de correspondance avec le métro (et éventuellement les lignes SNCF) tous les 2 km : au moins **1 GF/km** (dont plus de la moitié pour les stations) ;
- ligne nouvelle de RER en grande banlieue avec une station tous les 2 km : **100 MF/km** ;
- tronçon souterrain de métro (petit gabarit) avec une station de correspondance par km : plus de **500 MF/km** (dont les deux tiers pour les stations) ;
- tronçon souterrain de métro (petit gabarit) avec une station simple (sans correspondance) tous les km : **300 MF/km**.

**TRAMWAY** (d'après Merlin, 1994) :

- tronçon en surface en moyenne banlieue : **100 MF/km** ;
- tronçon souterrains en ville (Lyon, Marseille, Lille et Toulouse) : **400 MF/km**.

**MATERIELS ROULANTS** (d'après Merlin, 1994) :

- rame de TGV de dix voitures (type Atlantique) : **100 MF** ;
- rame SNCF de banlieue de huit voitures à deux niveaux : **50 MF** ;

- rame de RER de huit voitures (type MI 79) : **75 MF** ;
- rame de métro parisien de cinq voitures : **25 MF** ;
- rame de métro de Lyon de trois voitures : **20 MF** ;
- rame de tramway de deux voitures : plus de **20 MF**.

**VOIES NAVIGABLES** (d'après Merlin, 1994) :

- liaison en projet Rhin-Rhône : **50 MF/km**.

**CONDUITES** (d'après Merlin, 1994) :

- coût presque proportionnel à leur diamètre : **2 MF/km** pour un diamètre de 50 cm.

**BATI**

(d'après C.E.R.A., 1994)

- logements individuels : prix moyen du lot (terrain plus logement) sur les 4 dernières années en Isère : **473 000 francs**
- logements collectifs: prix moyen au m<sup>2</sup> (4 dernières années en Isère) : **13 900 F/m<sup>2</sup>**.

**SURFACES NATURELLES**

(d'après Ministère de l'agriculture et de la pêche, 1993)

**FONCIER :**

Valeur moyenne des terres (en Francs courants /ha) pour le département de la Drôme, année 1993 :

- terres labourables : **26 900 F/ha** ;
- prairies naturelles : **10 800 F/ha** ;
- vergers : **46 300 F/ha** ;
- vignes à vins AOC : **106 500 F/ha**.

**PERSONNES**

Estimations du coût moyen d'un décès en France suivant différents auteurs :

- **4,5 MF** (d'après Commissariat général au plan, 1994) ;
- **3,6 MF** (d'après Le Net, 1994) ;
- **2 MF** (d'après Merlin, 1994) ;
- **1,6 MF** (d'après Ledoux, 1989).

## ANNEXE XVI

**Principaux mouvements de terrains historiques répertoriés sur les 9 communes étudiées de la région du Trièves (Isère, France)***(d'après Inventaire National des Versants Instables du BRGM)*

Commune	Localité	Date	Type	Description
Allevard	Allevard	1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
Ardèche	Ardèche	1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
Crest	Crest	1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
Lafayette	Lafayette	1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
Lafayette	Lafayette	1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
Lafayette	Lafayette	1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
Lafayette	Lafayette	1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation
		1980	TT	Tranchées de stabilisation

COMMUNE	LIEU DIT	TYPE	DATE	COORDONNEES		
				X	Y	Z
Miribel-Lanchâtre		T3		0,000	0,000	0,000
		T4		0,000	0,000	0,000
Avignonet	FERME DE MOLINIÈRE	T4	31/05/1986	864,200	2000,400	0,000
	HAMEAU DU MAS.PARCELLE 507(MAI	T4	21/06/1983	864,200	2000,400	0,000
	LOTISSEMENT DU MAS	T4	30/11/1980	864,200	2000,400	0,000
	CD 110C.PK.2.300.ENTRE BARRAGE	T4	21/12/1975	864,200	2000,400	0,000
		T3		864,200	2000,400	0,000
Saint-Guillaume	EN BORDURE DE LA GRESSE	T4	01/01/1914	0,000	0,000	0,000
	EMBRANCHEMENT ROUTE DU MAS	T4	01/01/1950	0,000	0,000	0,000
	DU CHEF-LIEU JUSQU'A LA GRESSE	T4	30/11/1983	856,400	2000,100	0,000
	CD 8A.PK.0.600.ENTRE GRESSE ET	T4	28/02/1977	856,400	2000,100	0,000
	CD 8A.PK.1.900.ENTRE GRESSE ET	T2	28/02/1977	856,400	2000,100	0,000
	CD 8A.PK.1.800.ENTRE ST-GUILLA	T5	31/08/1974	856,400	2000,100	0,000
	CD 8A.PK.3.050.ENTRE GRESSE ET	T4	20/03/1978	856,400	2000,100	0,000
	CD-8.DE LANCHATRE A ST-GUILLAU	T7	30/11/1964	856,400	2000,100	0,000
	CD 8.DE LANCHATRE A ST-GUILLAU	T4	30/11/1965	856,400	2000,100	0,000
St-Paul-lès-Monestier		T5		0,000	0,000	0,000
Sinard	COMBE DE L'HARMALIERE	T4	07/03/1981	0,000	0,000	0,000
	VERSANTS EN PENTE	T4	16991130	861,800	1999,200	0,000
Monestier-de-Clermont	VOIE FERREE P.L.M	T3	27/11/1928	0,000	0,000	0,000
	QUARTIER DU VERT	T4	08/04/1952	0,000	0,000	0,000
	RN.75.PK.105.200 A PK.119.300	T4	30/11/1977	860,300	1996,300	0,000
Treffort		T4	01/01/1913	0,000	0,000	0,000
Roissard	RIF-FOL	T3	01/01/1920	0,000	0,000	0,000
	FALAISE DU BACONNET	T3	19/05/1986	0,000	0,000	0,000
	RUISSEAU DE RIF-FOL	T3	12/12/1910	0,000	0,000	0,000
	FALAISE SEQUANIEN-TITHONIQUE	T3	01/01/1921	0,000	0,000	0,000
	GORGE DU BACONNET (EMBRANCHE	T3	13/06/1951	0,000	0,000	0,000
	TORRENT DU RIF-FOL	T4	01/01/1916	0,000	0,000	0,000
	ROCHER DU BACONNET	T3	01/07/1987	0,000	0,000	0,000
		T2		0,000	0,000	0,000
		T5		0,000	0,000	0,000
	RN.75.PK.124.150.ENTRE LE COL	T4	30/11/1972	860,800	1992,400	0,000
	RN.75.PK.124.150.ENTRE LE COL	T4	30/11/1966	860,800	1992,400	0,000
	RN 75.PK.126.100	T4	21/12/1977	860,800	1992,400	0,000
	RN 75.COL DU FAU.PK 124.5	T4	30/11/1955	860,800	1992,400	0,000
	RN 75.PK.123.240	T4	21/12/1977	860,800	1992,400	0,000
	St-Michel-lès-Portes	MONT AIGUILLE	T3	01/06/1955	0,000	0,000
RIVE DROITE DES PELLAS		T4	14/02/1928	0,000	0,000	0,000
		T4	01/03/1947	0,000	0,000	0,000
		T3	02/03/1952	0,000	0,000	0,000
		T4	07/12/1952	0,000	0,000	0,000
		T3	20/03/1980	0,000	0,000	1300,000
SITE DE FONT NOIRE		T4	06/07/1987	0,000	0,000	0,000
		T3		0,000	0,000	0,000
		T5		0,000	0,000	0,000
CD 8A.PK.19.300		T4	30/11/1977	857,300	1990,600	0,000

Types de phénomènes : T2 : Coulée, T3 : Eboulement/écroulement, T4 : Glissement, T5 : Divers.

## ANNEXE XVII

### *Simulation de pertes sur le Trièves*

*ANNEXE XVII.1 - Découpage du territoire en zones de sollicitations d'intensité donnée*

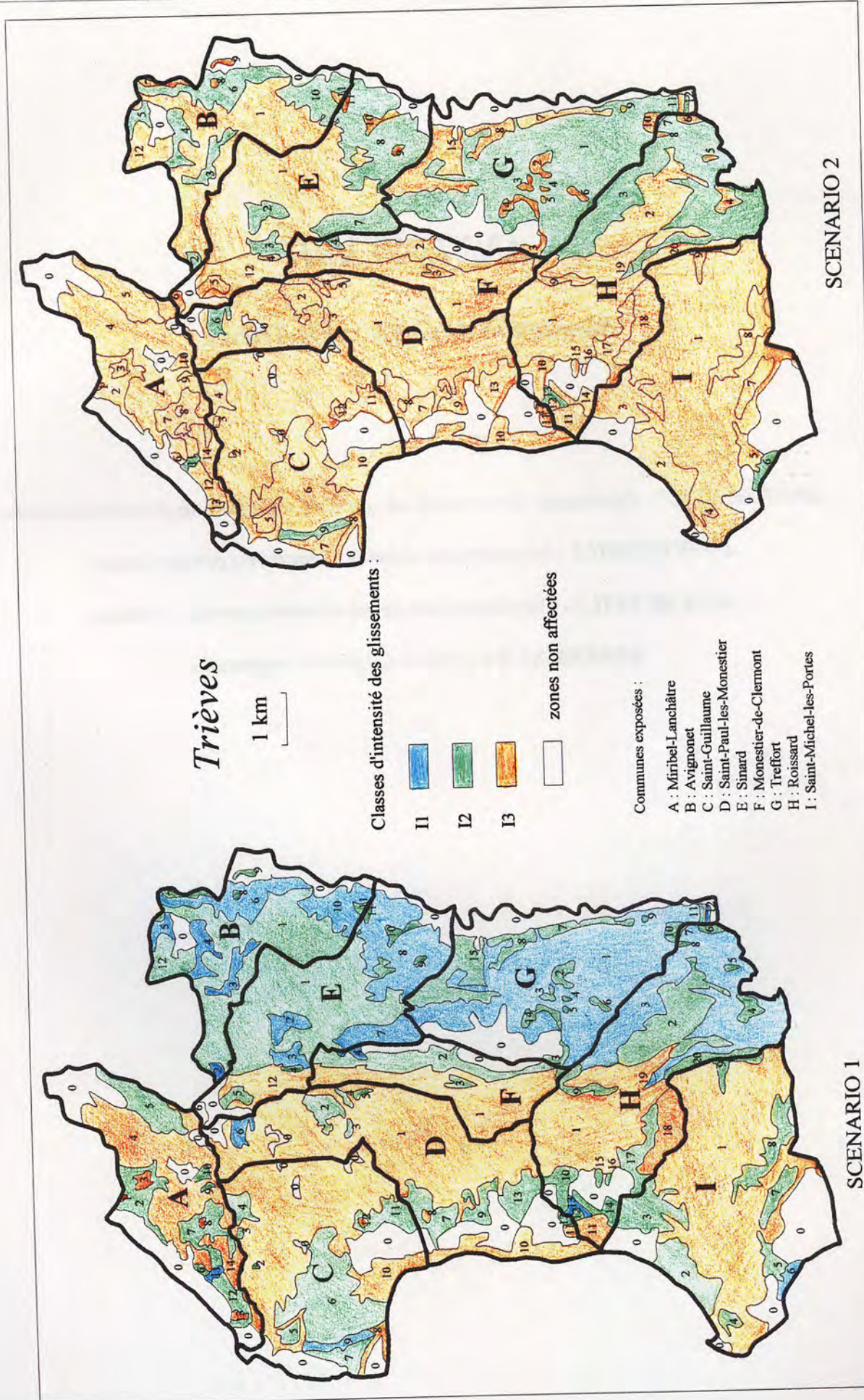
*ANNEXE XVII.2 - Inventaire des éléments structurels pris en compte*

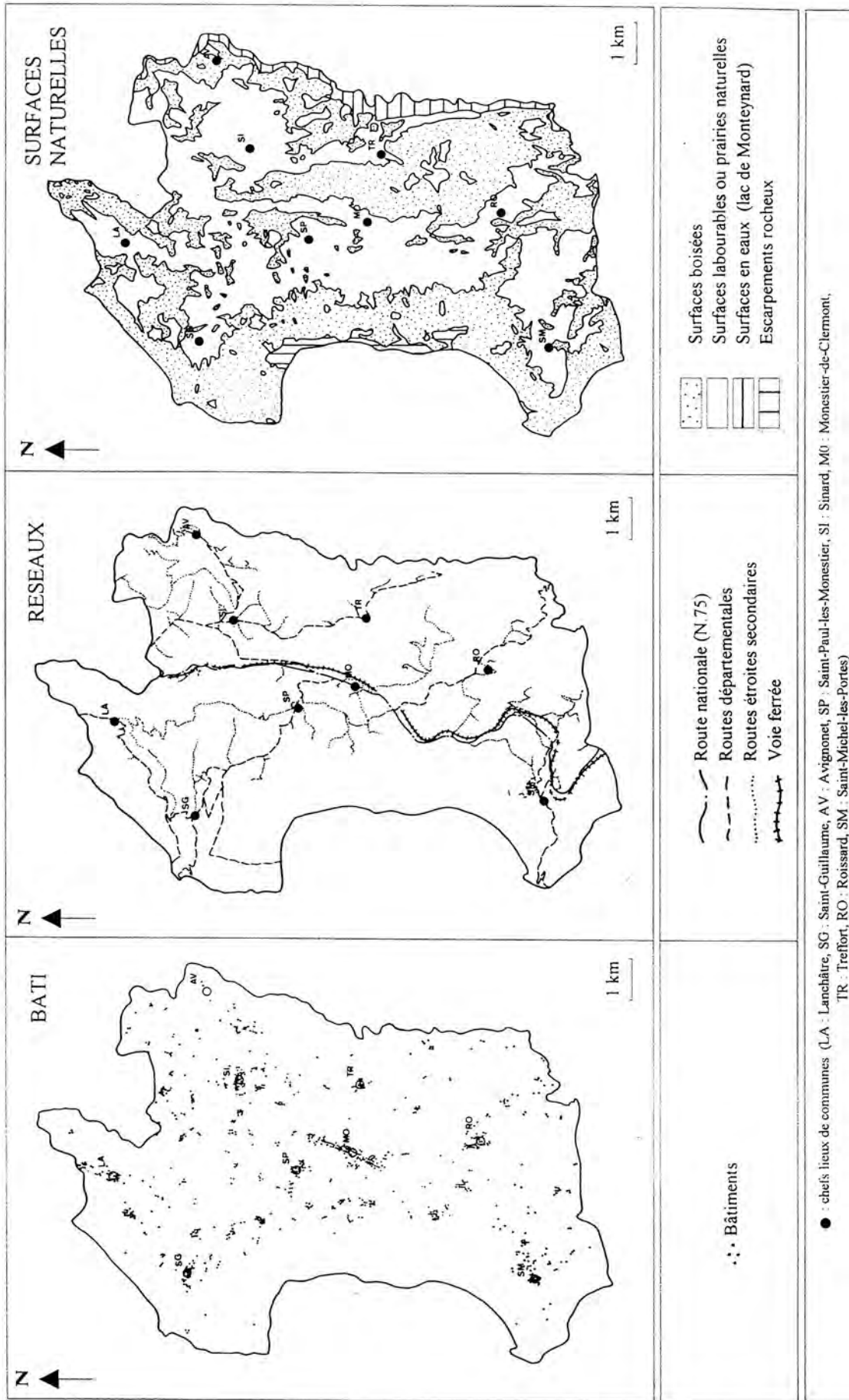
*ANNEXE XVII.3 - Distribution des pertes économiques par commune*

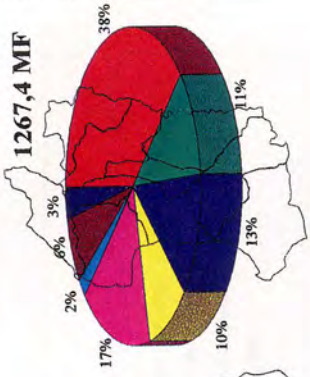
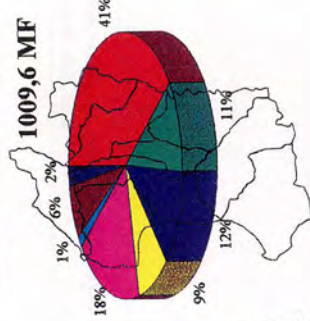
*ANNEXE XVII.4 - Détail des pertes communales*

- I - ...
- II - ...
- III - ...
- IV - ...
- V - ...
- VI - ...
- VII - ...
- VIII - ...
- IX - ...
- X - ...
- XI - ...
- XII - ...
- XIII - ...
- XIV - ...
- XV - ...
- XVI - ...
- XVII - ...
- XVIII - ...
- XIX - ...
- XX - ...
- XXI - ...
- XXII - ...
- XXIII - ...
- XXIV - ...
- XXV - ...
- XXVI - ...
- XXVII - ...
- XXVIII - ...
- XXIX - ...
- XXX - ...



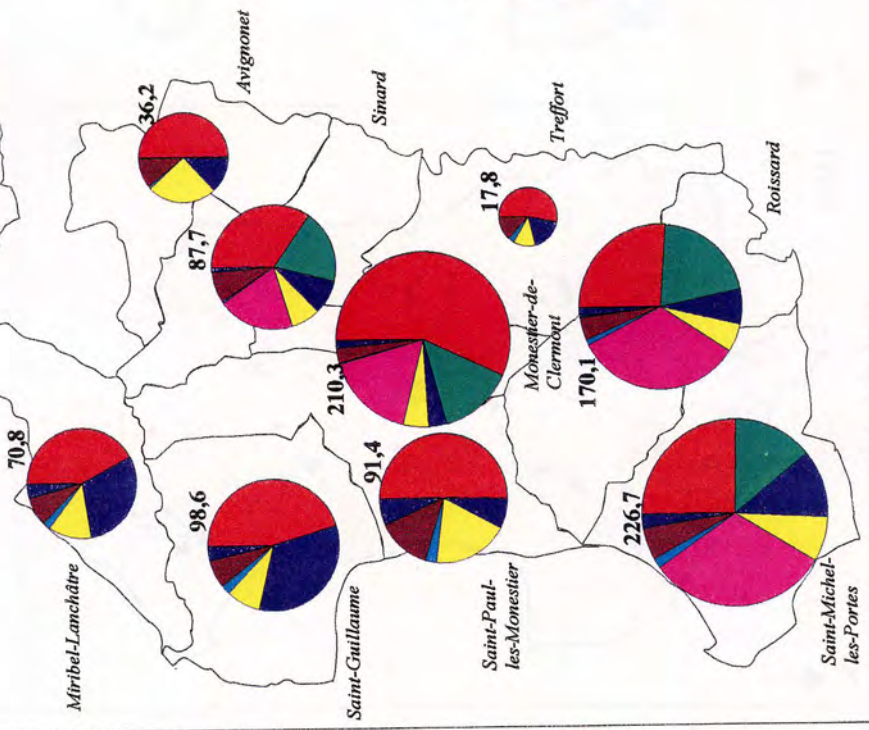




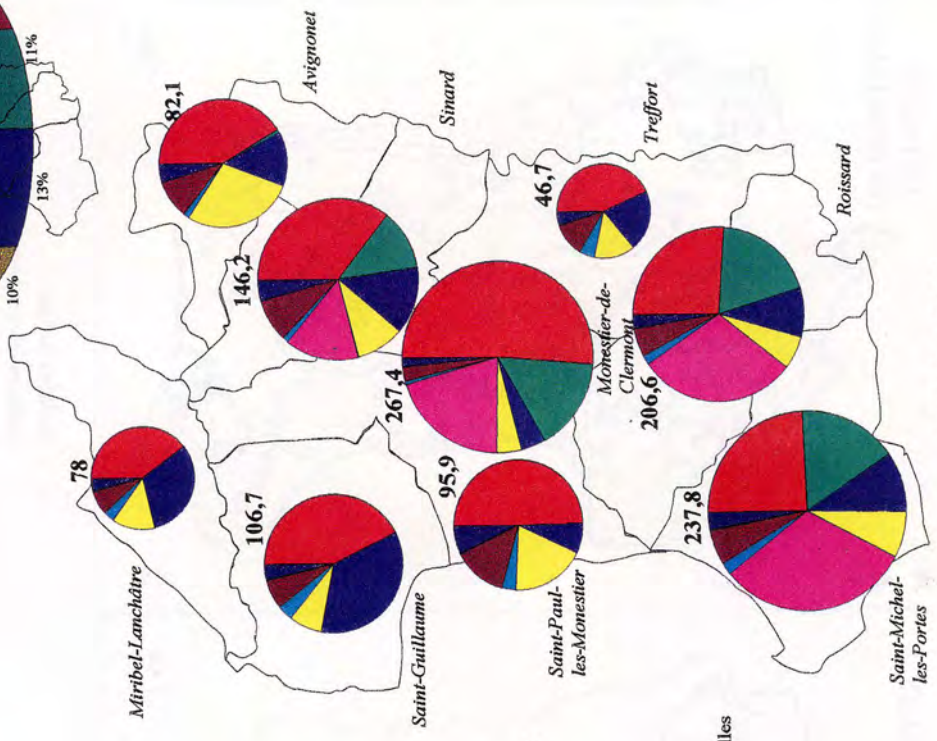


# Trièves

1 km



SCENARIO 1



SCENARIO 2

Détail des pertes économiques en MF

- Bâtiments
- Route nationale
- Routes départementales
- Routes étroites secondaires
- Voie ferrée
- Terrains boisés
- Terrains labourables ou prairies naturelles
- Pertes de revenus forestiers
- Pertes de revenus agricoles





## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGUILERA E. & ROMO M.** (1993). - Deslizamiento "La Josefina" : planificación y decisiones para el manejo de la crisis - Actes du colloque sur la Josefina, Ecole Polytechnique Nationale, Quito, Equateur, 11 p.
- ALDEN W.D.** (1928). - Landslide and flood at Gros Ventre, Wyoming - *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Eng.*, N°76, pp. 347-360.
- ALEXANDER D.E.** (1984). - Building damage by landslides : the case of Ancona, Italy, 1982 - *Ekistics*, 51(308), pp.452-462.
- ALEXANDER D.E.** (1986). - Landslide Damage to Buildings - *Environment Geology and Water Science*, Vol. 3, N°8, pp.147-151.
- ALEXANDER D.E.** (1988). - Developing a Landslide Damage Scale: the lessons of the Great Ancona Landslide of 1982 - *Ground Failure*, N°4, 4 p.
- ALEXANDER D.E.** (1991). - Applied geomorphology and the impact of natural hazards on the built environment - *Natural Hazards*, Vol.4, N°1, pp.57-80.
- ALEXANDER D.E.** (1992). - On the Causes of Landslides : Human Activities, Perception, and Natural Processes - *Environ. Geol. Water Science*, Vol.20, pp.165-179.
- ANTOINE P., CAMPOROTA P., GIRAUD A. & ROCHET L.** (1987). - La menace d'écroulement aux Ruines de Séchilienne (Isère) - *Bull. Liaison Labo. des Ponts et Chaussées*, N° 150-151, spécial Risques Naturels, pp.55-64.
- ANTOINE P.** (1991). - Les problèmes posés par l'instabilité des versants de grande ampleur. Aspects géologiques - *Bull. Assoc. Intern. Géol. Ing.*, N°45, pp.9-24..
- ANTOINE P. & GIRAUD A.** (1994). - Typologie des mouvements de versants dans un contexte opérationnel - Actes de l'université européenne d'été sur les risques naturels : session 1994 mouvements de terrain, Auron, Pôle Grenoblois Risques Naturels, Université J. Fourier, Grenoble, France, 9 p.
- ASANZA M., PLAZA-NIETO G., YEPES H., SCHUSTER R.L. & RIBADENEIRA S.** (1991). - Landslide blockage of the Pisque River, northern Ecuador - *Landslides*, Ed. Bell, Rotterdam, pp.1229-1234.
- ASTE J.P. & BARFETY J.C.** (1978). - L'écroulement des falaises d'Aigueblanche en Savoie - Rapport BRGM, Lyon.
- ASTE J.P.** (1986). - Etudes préliminaires des aspects économiques des risques de mouvements de terrain - Rapport B.R.G.M. 86 SGN 185 RHA pour la Délégation aux Risques Majeurs, 46 p.
- ASTE J.P.** (1991). - Faisabilité d'un système d'alerte aux populations en cas de risques générés par des mouvements de terrain - Rapport BRGM, R 30704 ENV 4S, 106 p.
- ASTE J.P.** (1992). - Stratégies de prévention, aide à la décision et préparation à la situation de crise - *Bull. Assoc. Intern. Géol. Ing.*, N°45, pp.59-72.
- ASTE J.P., LEONE F., KRUSE H. & TERRIER M.** (1993). - Perfectionnement de la

méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité et du risque sur les P.E.R. Mouvements de terrain - Rapport BRGM R 36866 SGN/GEO/RNG pour D.R.M, 50 p.

- ASTE J.P.** (1994a). - La catastrophe de la Josefina : potentialités d'intervention des équipes scientifiques et techniques du pôle grenoblois d'études et de recherches sur les risques naturels - Compte rendu de mission en Equateur du 31 juillet au 10 août 1994, JPA Consultants, Caluire, 23 p.
- ASTE J.P.** (1994b). - Les outils d'aide à la prévention et à la gestion du risque en milieu urbain - *Revue de Géographie Alpine*, N°4, Tome LXXXII, pp.125-130.
- ASTE J.P. & LEROI E.** (1994). - Etude des modalités de préparation à la situation de crise en cas de risques générés par des mouvements de terrain : le projet CIVIC (connaissances et information sur les versants instables en situation de crise) - Ministère de l'intérieur, direction de la sécurité civile, Rapport BRGM R 37144, 98 p.
- B.C.E.O.M.** (1973). - Etude des effets économiques des attaques de la mer contre le littoral : côte occidentale du Cotentin - Bureau Central d'Etudes pour les Equipements d'Outre Mer, ministère de l'équipement, du logement et du tourisme, direction des ports maritimes et voies navigables, service central hydrologique, 47 p.
- BARD P.Y., MENEROUD J.P., J.L. DURVILLE & P. MOUROUX** (1987). - Microzonage sismique : application aux plans d'exposition aux risques (PER) - *Bull. Liaison Labo. des Ponts et Chaussées*, N° 150-151, spécial Risques Naturels, pp. 130-139.
- BASTET J.C., DOURY J.L. & DURVILLE J.L.** (1985). - Simulation de l'action d'un séisme à l'échelle d'une ville et de la région avoisinante - *Génie Parasismique*, Chap X-7, Presses de l'E.N.P.C.
- BENEVENT E. & MAURY E.** (1927). - Les grandes pluies de l'automne 1926 et la catastrophe de Roquebillière - *Revue de Géographie Alpine*, XV, pp.151-157.
- BERLIOZ J.** (1987). - L'effondrement du Mont Granier en Savoie (fin 1248). Production, transmission et réception des récits historiques et légendaires (XIIIe-XVIIe siècles) - *Le monde Alpin et Rhodanien*, n°1-2, pp.7-68.
- BERMUDEZ M.** (1994). - Les désastres naturels dans les médias costaricains - *Résumés du colloque international "Croissance urbaine et risques naturels principalement dans les pays en développement*, 2-3 décembre 1994, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, pp.43-44.
- BERNKNOFF R.L., CAMPBELL R.H., BROOKSHIRE D.S. & SHAPIRO C.D.** (1988). - A Probabilistic Approach to Landslide Hazard Mapping in Cincinnati, Ohio, with Applications for Economic Evaluation - *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, Vol.XXV, N°1, pp.39-56.
- BESSON L.** (1984). - Mouvements de terrain en milieux forestier et agricole dans le Trièves (Isère-France), contexte géologique et socio-économique - Colloque de Caen, *mémoire du B.R.G.M*, N°83, pp.601-606.
- BJØNNESS I.M.** (1986). - Mountain hazards perception and risk-avoiding strategies among the sherpas of Khumber Himal, Nepal - *Mountain Research and Development*, Vol.6, N°4, pp.277-292.
- BOCQUET F. & CHARRE J.P.** (1984). - Carte Intégrée du Danger en Montagne. Méthode d'évaluation et d'introduction des données naturelles et socio-économiques - Coll. Mouvements de Terrain, Caen, *Mémoire du B.R.G.M*, N°83, pp.130-140.
- BODELLE J & WEBER C.** (1981). - La prévention des risques géologiques en France. Questions pour l'avenir - *Bull. Liaison des P. et C.*, N° spécial X, pp.7-9.
- BORUNOV A.K., KOSHKARIOV A.V. & KANDELAKI V.V.** (1991). - Geocological consequences of the 1988 Spitak earthquake (Armenia) - *Mountain Research and Development*, Vol. 11, N°1, pp.19-35.
- BOUCHARD C. & DEGUELLE D.** (1994). - Essai de méthodologie sur les valeurs paysagères - *Les Dossiers de la Revue de Géographie Alpine*, N°14, Développement territorial et valeur environnementale en haute montagne : l'exemple du Mt Blanc, pp.137-138.
- BOUGERE J.** (1994). - Contraintes et risques d'érosion dans les agglomérations de l'Ile de Mayotte (archipel des Comores, Océan Indien) - *Résumés du colloque international "Croissance urbaine et risques naturels principalement dans les pays en développement*, 2-3 décembre 1994,

- Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, pp.8-9.
- BOURGEOIS J.C.** (1994). - Glissement de terrain. La Salle-en-Beaumont (Isère). Samedi 8 janvier 1994 - *Le Sapeur Pompier*, N°850, mars, pp.128-130.
- BOUTROS-GHALI B.** (1994). - L'ONU mobilise le monde entier pour atténuer l'impact des catastrophes naturelles - *Stop Disasters*, N°17, pp.3-4.
- BURTON I., KATES R. W. & WHITE G.F.** (1968). - The human ecology of extreme geophysical events - University of Toronto, Department Geography, Working Paper N°1, 33p.
- C.C.E.** (1993). - La prévention des risques générés par l'instabilité des versants - Commission des Communautés Européennes, programme EPOCH, projet RIVET réalisé par le BRGM, l'université J. Fourier, le CETE, l'ADRGT, 4 parties.
- C.E.R.A.** (1994). - Observatoire de l'habitat et du logement : enquête sur la commercialisation des logements neufs - Cellule Economique Rhône-Alpes, Rapport N°217.
- C.R.E.A.** (1993). - Evaluacion preliminar de los Danos causados por el represamiento y desfogue del rio Cuenca - Instituto De Investigaciones Sociales (IDIS), Universidad de Cuenca, Ecuador, 43 p.
- CABANNE C. et al** (1984). - Lexique de géographie humaine et économique - Ed. Dalloz, Paris, 431p.
- CADIER E., ZEVALLOS O. & VACCA A.** (1994). - Le glissement de terrain et les inondations catastrophiques de la Josefina - Actes de l'université européenne d'été sur les risques naturels : session 1994 mouvements de terrain, Auron, Pôle Grenoblois Risques Naturels, Université J. Fourier, Grenoble, France, 4 p.
- CADIOT B.** (1979). - Le séisme nissart de 1564 - Les tremblements de terre en France, *Mémoire du BRGM*, N°96, pp.172-178.
- CANCEILL M.** (1983). - Risques naturels et théorie mathématique du risque - *Hydrogéologie, Géologie de l'ingénieur*, N°2, pp.137-146.
- CARSON M.A. & KIRKBY M.J** (1972). - Hillslop form and process - Ed. Cambridge University Press, Cambridge.
- CARTIER G. & DELMAS P.** (1984). - Les mécanismes des mouvements de terrain : nécessité de la mesure des déplacements - Colloque de Caen, *mémoire du B.R.G.M.*, N°83, pp.338-344.
- CAUDE G.** (1987). - Calcul des dommages et de l'endommagement liés à l'analyse de la vulnérabilité aux risques naturels - Rapport D.R.M N°831-D, Paris, 13 p.
- CAUDE G.** (1988). - Aspects économiques et sociaux liés aux risques naturels - ENPC, Journées d'étude sur le thème de l'évaluation des risques naturels, 25 p.
- CHAMPETIER DE RIBES G.** (1987). - La cartographie des mouvements de terrain, des ZERMOS aux PER - *Bull. liaison des P. et C.*, N°150-151, spécial risques naturels, pp.9-19.
- CHARDON A.C.** (1994). - Etude intégrée de la vulnérabilité de la ville de Manizales (Colombie) aux risques naturels - *Revue de Géographie Alpine*, N°4, Tome LXXXII, pp.97-112.
- CHARDON A.C. & THOURET J.C.** (1994). - Cartographie de la vulnérabilité globale d'une population citadine face aux risques naturels : le cas de Manizales - *Mappemonde*, N°4, pp.37-40.
- CHARDON A.C.** (en préparation). - La vulnérabilité d'une population citadine exposée aux risques naturels : le cas de la ville de Manizales en Colombie - Thèse de doctorat, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- CHATELAIN J.L. et al.** (1994). - Les scénarios sismiques comme outils d'aide à la décision pour la réduction des risques : projet pilote à Quito, Equateur - *Revue de Géographie Alpine*, N°4, Tome LXXXII, Croissance urbaine et risques naturels dans les montagnes des pays en développement, pp.131-150.
- COCHRANE** (1974). - Predicting the economic impact of earthquakes - Working paper N°25, University of Colorado, Boulder, U.S.A.
- COHEN V.** (1992). - Evaluation d'un risque naturel dans un contexte décisionnel - Etudes du CEMAGREF, Séminaire sur les aspects socio-économiques de la gestion des risques naturels, *Montagne*, N°2, pp.97-102.
- COLAS G.** (1987). - La crue torrentielle du Verdarel (Hautes-Alpes), 9 juillet 1981 -

*Bull. Liaison Labo. des Ponts et Chaussées*,  
N° 150-151, spécial Risques Naturels,  
pp.78-83.

- COLBEAU-JUSTIN L.** (1994). - Les variables psycho-sociologiques dans les comportements face à l'aléa naturel - *Résumés du colloque international "Croissance urbaine et risques naturels principalement dans les pays en développement*, 2-3 décembre 1994, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, pp.50-51.
- COLLIN-DELAUVAUD A.** (1994). - Croissance urbaine et vulnérabilité "forcée" des villes d'Amérique Latine - *Résumés du colloque international "Croissance urbaine et risques naturels principalement dans les pays en développement*, 2-3 décembre 1994, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, pp.53-54
- COMBES F.** (1990). - Le glissement de terrain de la Valette (Alpes-de-Haute-Provence, France). Surveillance, système d'alarme... - *Revue de Géologie Alpine*, mémoire H.S. N°15, Risques naturels dans le sud-est de la France, pp.65-70.
- COMMISSARIAT GENERAL AU PLAN** (1994). - Transports : pour un meilleur choix des investissements - Ed. La documentation française - 132 p.
- COMMITTEE ON GROUND FAILURE HAZARDS** (1985). - Reducing Losses from Landsliding in the United States - National Academy Press, Washington D.C., U.S.A., 41 p.
- CONSUEGRA ZAMMIT D.** (1992). - Concept de gestion des eaux de surface. Aspects méthodologiques et application au bassin versant de la Broye en Suisse - Thèse de Doctorat, Spécialité Génie Rural, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 169 p.
- CORBEN J.A.** (1992). - Failure of a partially submerged rock slope with particular references to the Vajont rock slide - *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. and Geomech. Abst.*, Vol.19, pp.99-102.
- COUREL M.F. & DELAUNAY J.** (1980). - Les éboulements d'extension catastrophique : état actuel des connaissances - Rapport BRGM 80 SGN 776 EG, 55p.
- COUSSOT P.** (1994). - Spécificités de l'hydraulique en torrent de montagne : le cas des laves torrentielles - Actes de l'université européenne d'été sur les risques naturels : session 1994 mouvements de terrain, Auron, Pôle Grenoblois Risques Naturels, Université J. Fourier, Grenoble, France, 9 p.
- CROZIER M.J.** (1986). - Landslides : causes, consequences and environment - Ed. Croom Helm, London, 252 p.
- CUZIN O.** (1994). - Le concept de vulnérabilité appliqué aux éléments susceptibles d'être endommagés par des mouvements de terrain - Mémoire de maîtrise, Institut de Géographie Alpine, Université J. Fourier, Grenoble, 140 p.
- D'ERCOLE R.** (1991). - Vulnérabilité des populations face au risque volcanique. Le cas de la région du volcan Cotopaxi (Equateur) - Thèse de doctorat, spécialité Géographie-Aménagement, Université Joseph Fourier, Grenoble, 459 p.
- D'ERCOLE R. & MONCAYO J.F.** (1991). - "Influents locaux" face à une situation d'urgence: une analyse selon l'hypothèse d'une éruption du volcan Cotopaxi (Equateur) - *Bull. Inst. fr. études andines*, Vol.20, N°1, pp.181-220.
- D'ERCOLE R.** (1993). - Gestion des risques naturels et réalités sociales. Vers une recherche opérationnelle - *Pangea*, CIFEG.
- D'ERCOLE R., MARTIN C., GODEFROY P. & RANÇON J.P.** (1993). - Etude méthodologique de vulnérabilité humaine et de préparation à la gestion de situations de crise : application à deux établissements scolaires martiniquais - Rapport BRGM N° R37118 pour la DRM, 86 p.
- D'ERCOLE R.** (1994a). - La catastrophe et son impact à moyen terme : l'exemple de Popayan (Colombie), dix ans après le séisme du 31 mars 1983 - *Résumés du colloque "croissance urbaine et risques naturels principalement dans les pays en voie de développement*, 2 et 3 décembre 1994, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, pp.55-57.
- D'ERCOLE R.** (1994b). - Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse - *Revue de Géographie Alpine*, N°4, Tome LXXXII, pp.87-96.
- D'ERCOLE R. & RANÇON J.P.** (1994). - La future éruption de la montagne Pelée : risques et représentations - *Mappemonde*, N°4, pp.31-36.

- D.R.M.** (1985a). - Plans d'exposition aux risques : évaluation de la vulnérabilité - Délégation aux Risques Majeurs, Ministère de l'environnement, Paris, 112 p.
- D.R.M.** (1985b). - Catalogue des mesures de prévention applicables aux PER mouvements de terrain, Ed. La Documentation Française, Délégation aux Risques Majeurs, Ministère de l'environnement, Paris, 441 p.
- D.R.M.** (1988). - Evaluation de la Vulnérabilité - Délégation aux Risques Majeurs, Ministère de l'environnement, 109 p.
- D.R.M.** (1989). - Les conséquences dommageables des mouvements de terrain - Délégation aux Risques Majeurs, Ministère de l'environnement, Paris, Note interne, 21 p.
- D.R.M.** (1990). - Les études préliminaires à la cartographie réglementaire des risques naturels majeurs - Délégation aux Risques Majeurs, Ministère de l'environnement, Ed. La documentation française, Paris, 142 p.
- D.R.M.** (1991). - Evaluation de la vulnérabilité des côtes françaises métropolitaines aux phénomènes d'érosion et de submersion, recherches méthodologiques - Rapport Délégation aux Risques Majeurs, 1ère partie, synthèse bibliographique, 91 p.
- D.R.M.** (1992). - Sécheresse et construction : guide de prévention - Délégation aux Risques Majeurs, Ministère de l'environnement, Ed. La Documentation Française, 52 p.
- D.R.M.** - Les mouvements de terrain - Délégation aux Risques Majeurs, Ministère de l'environnement, Brochure d'information, 40 p.
- DACHER J.C.** (1990). - Les catastrophes naturelles (phénomènes hydrologiques et climatiques exclus) en Haute-Savoie : analyse et cartographie - Mémoire de maîtrise de géographie, Institut de Géographie Alpine, Université J. Fourier, Grenoble, 64 p.
- DAVIDOVICI V.** (1985). - Génie parasismique - ouvrage collectif, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1 021 p.
- DE PABLOS T.** (1989). - Projet de thèse de doctorat en géographie pour la candidature à une allocation de recherche - Institut français d'études andines, 15 p.
- DEBELMAS J.** (1990). - Les conditions géologiques du glissement de terrain du plateau d'Assy en 1970 (Haute Savoie) - *Revue de Géologie Alpine*, mémoire H.S. N°15, Risques naturels dans le sud-est de la France, pp.71-76.
- DEFENSA CIVIL** (1993). - Evaluacion de daños - Actes du colloque sur la Josefina, Ecole Polytechnique Nationale, Quito, Equateur, 14 p.
- DELMAS P., CARTIER G. & POUGET P.** (1987). - Méthodes d'analyse des risques liés aux glissements de terrain - *Bull. Liaison Labo. des Ponts et Chaussées*, N° 150-151, spécial Risques Naturels, pp.29-38
- DOLLFUS O. & PENAHERRERA C.** (1962). - La lave torrentielle du 10 janvier 1962, dans la cordillère blanche (Pérou) - *Revue de Géomorphologie Dynamique*, pp.10-17.
- DOUSSINEAU M.** (1995). - Le glissement de terrain de Ravel, commune de Boulc, département de la Drôme - Mémoire de qualification en géologie, INSA Lyon, 33 p.
- DUMOLARD P. & JIN S.** (1993). - Autoroute nouvelle en zone périurbaine et environnement : l'exemple du projet Grenoble-Sisteron dans la basse vallée du Drac - *Dossier de la Revue de Géographie Alpine*, Grenoble, N°9, pp.25-32.
- DURVILLE J.L. & MENEROUD J.P.** (1987). - Vulnérabilité aux séismes des itinéraires routiers - *Bulletin de Liaison des Ponts et Chaussées*, N°150-151, spécial risques naturels, pp. 185-193.
- DURVILLE J.L.** (1992). - Mécanismes et modèles de comportement des grands mouvements de versant - *Bull. Assoc. Intern. Géol. Ing.*, N°45, pp.25-40.
- DUTTO F., GODONE F. & MORTARA G.** (1991). - L'écroulement du Glacier supérieur de Coolidge (Paroi nord du Mont Viso. Alpes occidentales) - *Revue de Géographie Alpine*, 1991, N°2, pp.7-17.
- EINSTEIN H.H.** (1988). - Landslide risk assessment procedure - Special lecture, International symposium on landslides, Lausanne, Vol.2, pp.1075-1090.
- EISBACHER G.H. & CLAGUE J.J.** (1984). - Destructive mass movements in high mountains : hazard and management - *Geol. Survey of Canada*, paper 84-16, 229 p.
- FARISSIER P.** (1995). - Modélisation et simulation de crue : le programme inondation du CEMAGREF - *S.I.G. et Télédétection*, N°13, pp.10-11.

- FAUGERES L.** (1990). - La Géo-cindynique, Géoscience du risque - *Bull. Assoc. Géogr. Fra.*, N°3, 16 p.
- FLAGEOLLET J.C.** (1989). - Les mouvements de terrain et leur prévention - Collection Géographie, Ed. Masson, 224 p.
- FLEMING R.W. & TAYLOR F.A.** (1980). - Estimating the Costs of Landslide Damage in the United States - *Geological Survey Circular* 832, 21 pp.
- FOLLACI J.P.** (1992). - Les mouvements du versant de la Clapière à Saint-Etienne-de-Tinée (Alpes-Maritimes) - *Bull. Assoc. Intern. Géol. Ing.*, N°45, pp.39-54.
- FOWLER LLOYD C.** (1981). - Economic consequences of land surface subsidence - *J. Irrig. Drain. Div.*, USA, Vol. 107, N°IR2, pp.151-159.
- FROMENT L.** (1988). - Le Claps et l'ancien lac de Luc-en-Diois - Luc-en-Diois, Drôme, France, 43p.
- GARDELLE C.** (1980). - La ligne du Diois ou les variations du destin - *Etudes Drômoises*, pp.49-54.
- GODEFROY P.** (1989). - Risque sismique, construction et aménagement en Provence - *Science Technique Technologie*, N°9, pp.17-28.
- GODEFROY et al.** (1992). - Liste des termes relatifs à la gestion des catastrophes et leur définition, à inclure dans un glossaire international multilingue agréé version Française - Rapport BRGM R 36418 GEO/SGN, 68 p.
- GONZALES DE VALLEJO L.** (1988). - La importancia socioeconomica de los riesgos geologicos en España - Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, pp. 21-34.
- GOULTER I.C. & MYSKA N.M.** (1987). - The human component in flood warning and flood response system - *Geojournal, Water and agriculture*, Vol.15, N°3, pp.297-305.
- GOUT J.P.** (1994). - Prévention et gestion des risques majeurs : les risques d'origine naturelle - Coll. Ecoscience et Technologie, Les éditions de l'Environnement, 301 p..
- GRASMICK C.** (1994). - La valeur environnementale : problèmes de prise en compte des dimensions spatiales et environnementales en économie - *Les Dossiers de la Revue de Géographie Alpine*, N°14, Développement territorial et valeur environnementale en haute montagne : l'exemple du Mt Blanc, pp.139-140.
- HEIM A.** (1882). - Ueber Bergsturze - *Natur. Gesell.*, Zürich, 83, 31 p.
- HENDRON A.J. & PATTON F.D.** (1985). - The Vajont Slide, a geotechnical analysis based on new geologic observations of the failure surface - Vol. I et II, final report, Geotechnical Laboratory, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- HERMELIN M. & VELASQUEZ E.** (1993). - El papel de los eventos convulsivos en la evolucion del paisaje en el tropico humedo de montana - *Resumés VI Cong. Colo. de Geologia*, U. EAFIT, Medellin, Colombia.
- HOWE E.** (1909). - Landslides in the San Juan Mountains, Colorado. Their causes and their classification - United States Geological Survey, prof. paper 67, Washington, 58 p.
- HULSBERGERN J.G. & CARREE G.J.** (1987). - A method for estimating damage to buildings in subsiding areas - *European conference on soil mechanics and foundation engineering*, Dublin, Vol.2, pp.699-702.
- HUMBERT M.** (1981). - Les risques naturels (mouvements de terrain, inondations, avalanches, sismicité) dans le département de la Drôme (notice explicative de la carte au 1/100 000) - Rapport BRGM 81 SGN 806 GEG, 70 p.
- HUMBERT M., VOGT J. & DELAUNAY J.** (1983). - Le fichier d'information sur les mouvements de terrain en France et ses applications - *Hydrogéologie et Géologie de l'Ingénieur*, B.R.G.M., N°2, 83 p.
- HUTCHINSON J.N.** (1978). - A geotechnical classification of landslides - Unpublished teaching hand out, Imperial College, London.
- HUTCHINSON J.N.** (1988). - General report. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology - *5th International Smposium on Landslides*, Lausanne, Vol.1, pp. 3-35.
- I.G.M.E.** (1987). - Impacto Economico y Social de los Riesgo Geologicos en España - Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 92 p.

- I.N.S.E.E.** (1988a). - Inventaire communal du département de la Drôme, année 1988 - *Communoscope*.
- I.N.S.E.E.** (1988b). - Inventaire communal du département de l'Isère, année 1988 - *Communoscope*.
- JAIL M. & VIVIAN R.** (1971). - Les glissements de terrain et les éboulements dans les Alpes françaises du Nord en 1970 - *Revue de Géographie Alpine*, N°59, pp.473-502.
- JAMES et al.** (1993). - Informe de Resultados de los Modelos Matemáticos, 21 de abril de 1993, EPN, Quito, Ecuador.
- JAMES M.** (1993). - Analisis de experiencias con presas con fallas para la preparacion de un plan de emergencia - Actes du colloque sur la Josefina, Ecole Polytechnique Nationale, Quito, Equateur, 11 p.
- JARAMILLO J.D. & ORTEGA D.** (1993). - Estudio del riesgo sismico de Medellin - Programa de prevención sismica para Medellin, segunda etapa, parte III. U. EAFIT, Alcaldia de Medellin, PNUD, Medellin, Colombia.
- KERVERN G.Y. & RUBISE P.** (1991). - L'Archipel du danger, introduction aux Cindyniques - Ed. Economica, 444 p.
- KIENHOLZ H.** (1992). - Risk zoning in mountains : the quantification of vulnerability and hazards - Colloque Bogota, pp.499-505.
- KLINKICHT S.** (1993). - La catastrophe de la Josefina : el manejo de la informacion y la comunicacion - Actes du colloque sur la Josefina, Ecole Polytechnique Nationale, Quito, Equateur, 11 p.
- KURIBAYASHI E., UEDA O. & TAZAKI T.** (1982). - An econometric model considering subground conditions for long term effects of earthquake losses - *3rd int. Earthq. Microzonation Conf.*, Seattle, pp. 209-243.
- LAFORGE C. & THOURET J.C.** (1990). - Contribution à la méthode d'évaluation des risques dans les villes des pays en voie de développement (Ibague, Colombie) - *Bull. Assoc. Géogr. Fra.*, N°3, pp.211-224.
- LAGADEC P.** (1981). - La civilisation du risque - Editions du Seuil, Paris.
- LAGADEC P.** (1992). - La gestion des crises. Outils de réflexion à l'usage des décideurs - Ed. Mc Graw-Hill, 325 p.
- LATORRE C., ALMEIDA E, TAPIA W. & RAMON P.** (1993). - Geologia del Deslizamiento la Josefina - Rapport technique, INECEL, Quito, Equateur, 29 p.
- LAVIGNE F. & THOURET J.C.** (1994). - Proposition d'une méthode d'évaluation et de cartographie des risques liés aux lahars sur le volcan Merapi (Java, Indonésie) - *Revue de Géographie Alpine*, N°4, Tome LXXXII, pp.151-166.
- LE NET M.** (1978). - Le prix de la vie humaine - *Notes et études documentaires*, n°4455, Ed. La Documentation française, Paris, 152 p.
- LEDOUX B.** (1989). - Etude de l'impact économique des mouvements de terrain en France - Mémoire de DEA "Techniques et Gestion de L'Environnement", laboratoire central des Ponts et Chaussées, Paris, 42 p.
- LEDOUX B., COLAS G. & DURVILLE J.L.** (1990). - Etude de l'impact économique des mouvements de terrain. Exemple du Var - *Revue de Géologie Alpine*, mémoire H.S. N°15, Risques naturels dans le sud-est de la France, pp.133-145.
- LEONE F.** (1994). - Catastrophe de la Josefina : éléments d'information - Rapport de mission B.R.G.M.-C.I.F.E.G 1993, Département Risques naturels et Géoprospective, B.R.G.M. Marseille, France, 63 p.
- LEONE F., ASTE J.P. & VELASQUEZ E.** (1995). - Contribution des constats d'endommagement au développement d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité appliquée aux phénomènes de mouvements de terrain - *Bull. Assoc. Géogr. Franç.*, N°4, pp.350-371.
- LEONE F. & VELASQUEZ E.** (à paraître). - Analyse en retour de la catastrophe de la Josefina (Equateur, 1993) : vers une meilleure connaissance du concept de vulnérabilité appliqué aux phénomènes de mouvements de terrain - *Bulletin de l'Institut Français d'Etudes Andines*, 10 p.
- LEROY A. & SIGNORET J.P.** (1992). - Le risque technologique - Collection "Que sais-je ?", Ed. P.U.F., 128 p.
- LLORET E.** (1993). - El uso de la comunicacion a raiz de una catástrofe - Actes du colloque sur la Josefina, Ecole Polytechnique Nationale, Quito, Equateur, 8 p.
- L.P.C.** (1978). - Eboulements et chutes de pierre sur les routes : recensement des parades - Groupe d'Etudes des Falaises (GEF) -

- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées,  
Rapport de Recherche LPC N° 81, 252 p.
- LUINO F., BELLARDONE G., GALLIANO G. & GODONE F.** (1992). - La frana del 4 maggio 1991 in località Mongia nel Comune di Scagnello (CN) - *Bolletino della Associazione Mineraria Subalpina*, Anno XXIX, N°4, pp.389-398.
- MALATRAIT A.M. & MESSIN M.** (1988). - Examen détaillé des risques de chutes de masses rocheuses et définition des parades le long du C.D. 902. Bourg-St-Maurice-Val d'Isère-Tignes - Rapport BRGM 88 SGN 384 RHA, DDE de la Savoie.
- MARIE R.** (1994). - Les phénomènes naturels du Diois de Janvier 1994 - Rapport provisoire d'expertise de l'ONF (service RTM), Grenoble, 6 p.
- MASSEPORT J.** (1960). - Le Diois, les Baronnies et leur avant pays rhodanien : étude morphologique - CNRS, Grenoble, 178 p.
- MASURE P.** (1989). - La vulnérabilité des sociétés modernes face aux catastrophes naturelles - *La Recherche*, N°212, spécial Risques Naturels et Technologiques, pp.8-13.
- MEJEAN P.** (1936). - Le glissement de la Bâtie-des-Fonds (Haut Diois) - *Revue de Géographie Alpine*, T. 24, N°4, pp.951-954.
- MENEROUD J.P.** (1976). - Le glissement de Roquebillière - *Bull. liaison. Lab. Ponts et Chaussées*, N° spécial Mars, I, pp.118-124.
- MERLIN P.** (1994). - Les transports en France - *Notes et études documentaires*, n°4986, Ed. La Documentation française, Paris.
- METEO FRANCE** (1994). - Episode pluvieux du 6 au 10 janvier 1994 sur la Drôme. En particulier sur les arrondissements de Die et Nyons - Rapport du centre départemental de la Drôme du 14/01/1994, 8 p.
- MILLIES-LACROIX A.** (1981). - Classification des talus et versants instables. Risques géologiques. Mouvements de terrain - 26<sup>e</sup> congrès géologique international, section 17, *Bull. Liaison labo. Ponts et Chaussées*, Paris, pp. 55-62.
- MINISTERE DE L'AGRICULTURE ET DE LA PECHE** (1993). - Données statistiques agricoles, département de la Drôme - *Agreste*, dépliant agricole et rural 1993, Edition N°14.
- MIRGON C., LEROI E., MOUROUX P. & BOUR M.** (1993). - Propagation en grande masse des mouvements de terrain : inventaire et analyse des modèles existants - Rapport B.R.G.M. R37764 SGN/UPE/RNG, Marseille, 85 p.
- MONTEILLET F.** (1994). - Automne 1993 : le déluge après la sécheresse ! - *Etudes Drômoises*, N°1-2-1994, pp.52-54.
- MORA S. & ASTE J.P.** (1991). - Pour une politique de prévention des risques générés par les mouvements de terrain à Cartago (Costa-Rica) - Communication personnelle, Instituto Costarricense de Electricidad (Costa-Rica), 5p.
- MORA S.** (1992). - Analisis preliminar de la vulnerabilidad economica de la ciudad de Cartago. A causa de los efectos de una avalancha que transite por el rio Reventado. Costa Rica - Colloque Bogota, pp. 571-592
- MORET F.** (1992). - Une vague dans la vallée : la catastrophe de Saint-Gervais - *Alpes Magazine*, N°18, pp.28-35.
- MORISSAU M. & ASTE J.P.** (1988). - Le glissement complexe de Boulc-Mondores (Drôme) : état actuel et évolution possible. Définition des zones exposées - Rapport BRGM 88 SGN 873 RHA.
- MOUROUX P., MARGON P. & PINTÉ J.C.** (1988). - La construction économique sur sols gonflants - BRGM-REXCOOP, Ed. du BRGM, *Manuels et méthodes*, N°14.
- MULLER L.** (1964). - The Rock Slide in the Vajont Valley - *Rock mechanics and Engineering Geology*, Vol. II, pp.3-4.
- MÜNCHENER RÜCK** (1988). - Notice de la carte universelle des risques naturels - Munich, Allemagne, 36p.
- MUNICIPALITE DE MODANE** (1988). - La crue du St Antoine - *Bulletin municipal*, 1<sup>er</sup> Trimestre 1988, pp.9-26.
- NARVAEZ C.** (1993). - Diagnostico ambiental del deslave en el sitio la Josefina - Actes du colloque sur la Josefina, Ecole Polytechnique Nationale, Quito, Equateur, 14 p.
- NATALA L.** (1993). - Reporte técnico de la misión italiana sobre simulación de erosión en la presa sector la Josefina Rio Paute - Abril 7, EPN, Quito, Ecuador.



- NATIONAL RESEARCH COUNCIL** (1991). - The march 5, 1987, Ecuador earthquakes : mass wasting and socio-economic effects - Natural disaster, an investigative series of the committee on natural disasters, vol.5, National Academy Press, Washington, 162 p.
- NATIONS UNIES** (1979). - Prévention et atténuation des catastrophes, le point des connaissances actuelles : aspects économiques - Vol.7, New York, .
- NATIONS UNIES** (1993). - El deslizamiento la Josefina en el valle del rio Paute, Cuenca, Ecuador - Rapport de mission du corps suisse de secours en cas de catastrophe, Genève, 48 p.
- NEALL V.E.** (1976). - Lahars as major geological hazards - *Bull. Ass. Internation. Geol. Ingr.*, N°14, pp.233-240.
- NOVEMBER V.** (1994). - Risques naturels et croissance urbaine : réflexion théorique sur le rôle et la nature du risque dans l'espace urbain - *Revue de Géographie Alpine*, N°4, Tome LXXXII, pp.113-124.
- NOVERRAZ F. & BONNARD C.** (1991). - L'éroulement rocheux de Randa, près de Zermatt - *Landslides*, Ed. Bell, Rotterdam, pp.165-170.
- NOVERRAZ F.** (1993). - Analyse et gestion des risques géologiques : risques liés aux terrains instables. Aspects géologiques des phénomènes d'instabilité de versants - Cours du C.E.R.G., Université de Genève, 224 p.
- PACHOUD A.** (1990). - L'instabilité de certains versants peut-elle être liée à la présence de failles non gravitaires ? L'exemple du Mont Granier (Massif de Chartreuse), de la crête des Echines (Massif du Giffre), des Posettes (Massif du Mont Blanc) - *Revue de Géologie Alpine*, mémoire H.S. N°15, Risques naturels dans le sud-est de la France, pp.189-196.
- PECH P. & SEVESTRE A.** (1994). - Les conséquences financières de l'épisode pluvieux dans le bassin -versant du Buëch, 1993-1994 - *Mappemonde*, N°4-1994, pp.22-22.
- PENNING-ROWSELL E.D. & CHATTERTON J.B.** (1977). - The benefits of flood alleviation, a manual assessment techniques, summary - Middlesex Polytechnic Flood Hazard Research Centre, Enfield, Angleterre.
- PETERSON D.W.** (1988). - Volcanic Hazards and Public Response - *Journal of Geophysical Research*, Vol.93, N°B5, pp.4161-4170.
- PHILIPPONNAT G.** (1978). - Désordres dus à la présence de sols gonflants dans la région parisienne - *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des travaux publics*, n°364, pp.2-15.
- PIGEON P.** (1991). - L'homme face au risque lié aux glissements de terrain dans le massif préalpin du Chablais et son piedmont - Thèse de doctorat, spécialité Géographie, Université Joseph Fourier, Grenoble, 351 p.
- PLAFKER G. & ERICKSEN G.E.** (1978). - Nevados Huascaran avalanches, Peru - *Rockslides and avalanches*, B.Voight Ed. Elsevier, pp.277-314.
- PLAZA G. & EGUEZ A.** (1993). - Consideraciones geologico-geotecnicas sobre el deslizamiento de la Josefina - Actes du colloque sur la Josefina, Ecole Polytechnique Nationale, Quito, Equateur, 10 p.
- PLOTTO P.** (1990). - Glissement-coulées du Planay (vallée du Doron de Pralognan, Savoie) - *Revue de Géologie Alpine*, mémoire H.S. N°15, Risques naturels dans le sud-est de la France pp.197-200.
- POPOV I.V.** (1945). - A scheme for the natural classification of landslides - *Doklady Acad. Sci.*, U.S.S.R., Vol. 54, pp.157-159.
- RASMUSSEN** (1974). - Reactor Safety study. An assessment of accident risk in U.S. commercial power plants - USAEC report WASH 1400.
- REGIONE EMIGLIA-ROMAGNA** (1994). - Note illustrative della carta del dissesto geologico attuale, foglio 218 SE, Carpineti - Italia, 80 p.
- REGIONE PIEMONTE** (1990). - Banca Dati Geologica : A cura del settore prevenzione del rischio geologico, metereologico e sismico - Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Ricerca per Idrogeologica del Bacino Padano, Torino, Italia, 93 p.
- REY C.** (1994). - Glissements de terrains et inondations en Diois, janvier 1994 - *Lutter*, revue de l'union départementale des sapeurs pompiers de la Drôme, N°28, p.47.
- REYNOLDS S.H.** (1932). - Landslips - *Proc. Bris. Nat. Soc.*, N°7, pp.352-357.

- RITCHIE A.M.** (1963). - The evaluation of rockfall and its control - *Highway Record*, Vol. 17, pp. 13-28.
- RIVIERE M.** (1990). - Examen critique des causes géotechniques d'origine anthropique tiré de quelques 300 éboulements traités de 1959 à 1989 dans les Alpes Maritimes (secteur privé) - *Revue de Géologie Alpine*, mémoire H.S. N°15, Risques naturels dans le sud-est de la France, pp.207-210.
- RIZZO V.** (1988). - Una strumentazione concepita per lo studio e la sorveglianza automatica e centralizzata di movimenti franosi in aree insediate - *Geologia Tecnica*, N°3, pp. 5-20.
- ROCHET L.** (1987). - Application des modèles numériques de propagation à l'étude des éboulements rocheux - *Bull. Liaison Labo. des Ponts et Chaussées*, N° 150-151, spécial Risques Naturels, pp.84-95.
- SAGERI** (1990). - Rapport économique des investissements réalisés pour la prévention des risques vis-à-vis des coûts à supporter par la collectivité en cas de catastrophe naturelle ou technologique - Etude pour le Conseil Général de l'Isère, Rapport définitif, 28 p.
- SASSA K.** (1985). - The geotechnical classification of landslides - Proc., IVth International Conference and Field Workshop on Landslides, Tokyo.
- SASSA K.** (1988). - Geotechnical model for the motion of landslides - Special lecture, Proc. 5th. Int. Symp. Landslides, Lausanne, 1988-07-10, pp.37-55.
- SAURET B.** (1987). - Coulées de débris canalisées. Compte rendu bibliographique - *Bull. Liaison Labo. des Ponts et Chaussées*, N° 150-151, spécial Risques Naturels, pp.65-77.
- SEVILLA J.** (1993). - El deslizamiento "la Josefina" : consideraciones geológicas - Actes du colloque sur la Josefina, Ecole Polytechnique Nationale, Quito, Equateur, 10 p.
- SHUSTER R.L. & COSTA J.E.** (1986). - A perspective on Landslides Dams : Processes, Risk, and Mitigation - *Geotechnical Special Publication*, R.L. Shuster Ed., ASCE, N° 3, April 7, pp.1-20.
- SIMEON P.** (1988). - Impact économique de l'érosion littorale - Informations et Documents, Bureau Central d'Etudes pour les Equipements d'Outre Mer, N°52, pp. 35-42.
- SOUSA J. & VOIGHT B.** (1991). - Continuum simulation of flow failures - *Géotechnique*, Vol. 41, N°4, pp.515-538.
- SPENCE R.J.S., COBURN A.W. & POMONIS A.** (1992). - Correlation of ground motion with building damage : the definition of a new damage-based seismic intensity scale - *Earthquake Engineering, Tenth World Conference*, Balkema, Rotterdam, Vol.1, pp.551-556.
- SUAREZ P.** (1992). - Cuantificación del riesgo social y económico del volcán de Colima - Colloque Bogota, pp.555-570.
- SYRIEYS P.** (1984). - Divers types de mécanismes de mouvements de terrain - Coll. Mouvements de Terrain, Caen, *Mémoire du B.R.G.M.*, N°83, pp.75-79.
- TAVAKOLI B. & TAVAKOLI S.** (1993). - Estimating the vulnerability and loss functions of residential buildings - *Natural Disasters*, N°7, pp.155-171.
- THOMAS A.** (1975). - Analyse, estimation et cartographie des risques en géotechnique. Application à la planification urbaine - *Sciences de la Terre*, Tome XX, N°2, pp.201-218.
- THORIN R.** (1994). - Carrières souterraines abandonnées : élaboration d'un P.E.R. - *Aménagement et nature*, N°113 spécial risques naturels : de la prévention à la gestion, pp.22-26.
- THOURET J.C. & D'ERCOLE R.** (1994). - Croissance urbaine et risques naturels dans les montagnes des pays en développement : avant propos - *Revue de Géographie Alpine*, N°4, Tome LXXXII, pp. 7-11.
- TOULEMONT M.** (1994). - Le risque sécheresse : la réparation des dommages et la prévention des risques - *Aménagement et Nature*, Les risques naturels, N°112, pp.12-13.
- TRUNK F.J., DENT J.D. & LANG T.E.** (1986). - Computer modelling of large rock slides - *J. Geotech. Eng.*, ASCE, Vol. 112, N°3, pp.348-360.
- U.N.D.R.O.** (1979). - Prévention et atténuation des catastrophes, le point des connaissances actuelles : Aspects Sociaux et Sociologiques - Office of the United Nations Disaster Relief Co-Ordinator, New York, Vol.12, 56 p.

- USSELMANN P.** (1994). - Risques et catastrophes : le callejon de Huaylas dans la cordillère blanche péruvienne - *Résumés* du colloque international "Croissance urbaine et risques naturels principalement dans les pays en développement", 2-3 décembre 1994, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, pp.35-39.
- VARNES D.J.** (1978). - Slope movement types and processes - Landslides. Analysis and control, in Schuster & Krizek (editors), Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington, D.C., pp. 325-348.
- VARNES D.J.** (1984). - Landslides hazard zonation : A Review of Principles and Practice - *Natural Hazards*, N° 3, UNESCO, 63 p.
- VELASQUEZ E.** (1994). - Mouvements de terrain: du phénomène pressenti aux risques encourus, vers une évaluation consensuelle du risque - Mémoire de D.E.A Gestion des espaces montagnards : sociétés et environnement, Institut de Géographie Alpine, Université J.Fourier, Grenoble, France, 88 p.
- VELASQUEZ E., ASTE J.P. & LEONE F.** (1994). - Riesgos naturales y vulnerabilidad : contribucion al manejo integral - Actes du colloque panaméricain sur les glissements de terrain, 1-5 Août 1994, Guayaquil, Equateur, 13 p.
- VELASQUEZ E., ASTE J.P. & LEONE F.** (1995). - Reflexion sur les besoins de communication entre les divers intervenants dans la prévention des risques générés par les mouvements de terrain. Les apports des scénarii de risques - *Bull. Assoc. Géogr. Franc.*, N°4, pp.372-386.
- VIE-LE-SAGE R.** (1989). - La terre en otage - Ed. Masson, Paris, 247 p.
- VILLAIN J.** (1994). - Glissement de la Combe des Parajons du 8 Janvier 1994, commune de la Salle-en-Beaumont, Isère - Actes de l'université européenne d'été sur les risques naturels : session 1994 mouvements de terrain, Auron, Pôle Grenoblois Risques Naturels, Université J. Fourier, Grenoble, France, 8 p.
- VOIGHT B.** (1978). - Rockslides and Avalanches - Vol. N°1, Natural Phenomena, Ed. Elsevier, Amsterdam.
- VOIGHT B.** (1990). - The 1985 Nevado del Ruiz volcano catastrophe : anatomy and retrospection - *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, N°44, pp. 349-386.
- ZEEVALLOS O.** (1993). - El deslizamiento de la Josefina : evaluación hidráulica - Actes du colloque sur la Josefina, Ecole Polytechnique Nationale, Quito, Equateur, 19 p.
- ZEEVALLOS O., BASTIDAS L. & VALDOSPINOS N.** (1993). - Estudios del proceso de rotura del embalse de la Josefina Rio Paute - Abril 20, EPN, Quito, Ecuador.
- ZEEVALLOS O.** (1994). - Expérience de modélisation physique et mathématique pour la prévision de rupture de barrages - Actes de l'université européenne d'été sur les risques naturels : session 1994 mouvements de terrain, Auron, Pôle Grenoblois Risques Naturels, Université J. Fourier, Grenoble, France, 7 p.
- ZHA XIAO-GAN** (1986). - The prediction of city site earthquake damage in seismic area - International symposium on engineering geology problems in seismic areas, Bari. *Geologia applicata i idrogeologia*, Vol.21, N° part. 4, pp.421-427.

## **LISTE DES FIGURES**

### **Chapitre I**

Figure I.1 - Illustration des différentes composantes entrant dans la définition analytique du risque : application au cas des phénomènes de mouvements de terrain. ....	12
Figure I.2 - Probabilités $P_a$ pour qu'un bloc atteigne un élément exposé. a : suivant la position de l'élément ; b : suivant la pente de la trajectoire (b modifié d'après Ritchie, 1963 <i>in</i> LPC, 1978).....	14
Figure I.3 - Etapes d'expertise du risque naturel. ....	17
Figure I.4 - Evolution démographique, en millions d'habitants, des grandes métropoles mondiales entre 1950 et 1990 (d'après Brun & Williams, 1983 et l'Annuaire démographique des Nations Unies, <i>in</i> Thouret & D'Ercole, 1994). ....	19
Figure I.5 - Courbes théoriques d'endommagement pour des éléments structurels de résistance croissante de 1 à 3. ....	25
Figure I.6 - Les composantes de la vulnérabilité. ....	26
Figure I.7 - L'aire de gravité. ....	29
Figure I.8 - Illustrations théoriques de la notion d'acceptabilité du risque. ....	31
Figure I.9 - Bilan mondial des catastrophes de type mouvements de terrain ayant entraîné plus de 50 victimes.....	43
Figure I.10 - Distribution relative des victimes de mouvements de terrain en France de 1441 à nos jours, par type de phénomène impliqué. ....	46
Figure I.11 - Historique des phénomènes de mouvements de terrain meurtriers français, de 1441 à nos jours. ....	47

### **Chapitre II**

Figure II.1 - Plan de situation géographique de la vallée de Paute et du glissement de la Josefina. ....	56
Photo II.1 - Vue générale, depuis l'ouest, du glissement de terrain de la Josefina après la rupture. ....	57
Figure II.2 - Chronologie de l'enchaînement des phénomènes responsables de la catastrophe de la Josefina. ....	58
Figure II.3 - Courbe du remplissage de la retenue (d'après Nations Unies, 1993). ....	59
Figure II.4 - Courbe de vidange de la retenue (d'après Aguilera & Romo, 1993). ....	59
Figure II.5 - Section transversale du canal d'évacuation (d'après Aguilera & Romo, 1993 <i>in</i> Zevallos, 1994). ....	63
Figure II.6 - Contexte géologique du glissement de terrain de la Josefina (modifié d'après Plaza et al., 1993 et Latorre et al., 1993). ....	64
Figure II.7 - Reconstitution numérique du site de la Josefina, avant (a) et après (b) le glissement (d'après Velásquez, 1994 <i>in</i> Leone & Velásquez, à paraître). ....	66
Figure II.8 - Localisation des deux phases de glissement (d'après Velásquez, 1994 <i>in</i> Leone & Velásquez, à paraître). ....	68
Figure II.9 - Protocole de constat d'endommagement mené sur la catastrophe de la Josefina. ....	69
Figure II.10 - Processus d'endommagement associés aux différents phénomènes naturels impliqués dans la catastrophe de la Josefina. ....	70

Figure II.11 - Cartographie des différents processus d'endommagement retenus pour l'analyse des dommages structurels et corporels liés à la catastrophe de la Josefina (d'après fonds photographiques aériens non redressés de l'I.G.M., Quito, Ecuador). .....	72
Figure II.12 - Catastrophe de la Josefina : préjudices sur les échanges économiques (modifié d'après le quotidien HOY, 1993). .....	76
Figure II.13 - Situation géographique de la zone d'étude du Diois. ....	78
Figure II.14 - Carte des isohyètes du département de la Drôme pour l'épisode pluvieux du 5 au 6 janvier 1994 (d'après données Météo France). ....	80
Figure II.15 - Précipitations cumulées correspondant aux épisodes pluvieux de septembre et octobre 1993 (d'après données Météo-France in Monteillet, 1994). ....	81
Figure II.16 - Communes drômoises déclarées sinistrées par les intempéries de septembre et octobre 1993 et janvier 1994 (d'après fiches communales de déclarations de dommages). ....	86
Figure II.17 - Communes drômoises sinistrées par les intempéries du 5 au 10 janvier 1994 (d'après fiches communales de déclaration de dommages). ....	89
Figure II.18 - Distribution des coûts des dégâts déclarés par les communes drômoises sinistrées suite aux intempéries du 5 au 10 janvier 1994 (d'après fiches communales de déclarations de dommages). ....	90
Figure II.19 - Découpage cantonal et communal de la région du Diois (d'après données I.N.S.E.E., 1988a). ....	92
Figure II.20 - Distribution par communes du Diois des différents phénomènes responsables de dommages aux voies communales et chemins ruraux suite aux intempéries des 6 et 7 janvier 1994. ....	96
Figure II.21 - Localisation des dommages au réseau routier départemental du Diois suite aux intempéries des 6 et 7 janvier 1994. ....	97
Figure II.22 - Carte de distribution des coûts des dommages au réseau routier départemental par section de route endommagée, suite aux intempéries des 6 et 7 janvier 1994. ....	98
Figure II.23 - Distribution par communes du Diois des coûts des dommages au réseau routier communal et rural imputables aux phénomènes de mouvements de terrain. Intempéries des 6 et 7 janvier 1994. ....	99
Figure II.24 - Distribution par communes du Diois des coûts des dommages au réseau routier communal et rural imputables aux phénomènes hydrauliques. Intempéries des 6 et 7 janvier 1994. ....	99
Figure II.25 - Réseau routier du Diois : distribution statistique du nombre de dommages par types de phénomènes d'origine. Intempéries des 6 et 7 janvier 1994. ....	100
Figure II.26 - Réseau routier du Diois : évolution des coûts moyens de réparation par mode d'endommagement pour une longueur moyenne de route affectée de 10 m. ....	101
Figure II.27 - Réseau routier du Diois : importance relative des différents modes d'endommagement, tous phénomènes d'origine confondus. Intempéries des 6 et 7 janvier 1994. ....	102
Figure II.28 - Réseau routier du Diois : distribution statistique des différents modes d'endommagement par types de phénomènes d'origine. Intempéries des 6 et 7 janvier 1994. ....	102
Figure II.29 - Critères de dysfonctionnement du réseau routier départemental du Diois, consécutivement aux intempéries des 6 et 7 janvier 1994. ....	104
Figure II.30 - Relations entre dommages structurels et perturbations fonctionnelles sur un réseau routier. ....	105
Figure II.31 - Carte de situation du cas de Boulc-en-Diois (d'après fond topographique IGN au 1/100 000 <sup>e</sup> , carte de Valence-Grenoble). ....	106
Figure II.32 - Schéma d'évolution des échanges économiques entre la commune de Boulc et les communes avoisinantes. ....	109
Figure II.33 - Résultats graphiques de l'enquête de mai 1994 menée auprès des artisans et commerçants de Châtillon-en-Diois. ....	111
Figure II.34 - Situation de la Salle-en-Beaumont. ....	113
Figure II.35 - Glissement de terrain de la Salle-en-Beaumont : extension des phénomènes et nature des dommages aux bâtiments et routes (d'après observations <i>in situ</i> du 12/01/1994). ....	115

### Chapitre III

Figure III.1 - Domaines relatifs aux différents phénomènes de mouvements de terrain sur la base de quelques paramètres caractéristiques de leur intensité (modifié et complété d'après Mirgon et al., 1993).....	121
Figure III.2 - Grands types de sollicitations associées aux principaux phénomènes de mouvements de terrain.....	123
Figure III.3 - Zones d'effet des sollicitations générées par quelques grands types de phénomènes de mouvements de terrain.....	124
Figure III.4 - Différents types de fissures ou crevasses dans un glissement (d'après Bombard, 1968 in Flageollet, 1989).....	125
Figure III.5 - Illustration des grands types de sollicitations mouvements de terrain et critères de mesure de leur intensité. Exemple d'action sur un bâtiment.....	127
Figure III.6 - Importance du champ des déformations lié à des déplacements.....	129
Figure III.7 - Interaction entre surface de rupture et fondations d'un bâti.....	129
Figure III.8 - Mouvements absolu, différentiel et différentiel unitaire (d'après Mouroux et al, 1988).....	130
Figure III.9 - Géométries du contact entre bâti de surface exposée SE et front de la masse en mouvement de surface SF.....	130
Figure III.10 - Distances D d'éloignement à la source de l'effet de souffle.....	131
Figure III.11 - Typologie des pertes économiques associées aux principaux dommages.....	138
Figure III.12 - Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité et du risque : préparation des données.....	149
Figure III.13 - Méthodologie d'évaluation du risque et de la vulnérabilité : principe de calcul des indices de pertes et de risque.....	152
Figure III.14 - Commune d'Aigueblanche : zones de blocs "rebondissants" et "roulants".....	155
Figure III.15 - Commune d'Aigueblanche : cartographie du potentiel d'endommagement des blocs.....	155
Figure III.16 - Commune d'Aigueblanche : éléments structurels exposés aux chutes de blocs.....	156
Figure III.17 - Commune d'Aigueblanche : niveau d'endommagement virtuel des différents éléments structurels exposés aux chutes de blocs.....	156
Figure III.18 - Situation de la zone d'étude du Trièves.....	157
Figure III.19 - Simulation Trièves : étapes méthodologiques.....	158
Figure III.20 - Simulation Trièves : détail des pertes économiques par commune en millions de francs.....	161
Figure III.21 - Simulation Trièves : surfaces de gravité des pertes par commune.....	162

## **LISTE DES TABLEAUX**

### **Chapitre I**

Tableau I.1 - Caractéristiques de quelques grands écroulements rocheux et glissements rapides d'extension catastrophique historiques.....	40
Tableau I.2 - Bilan des victimes de phénomènes de mouvements de terrain sur le territoire français de 1248 à nos jours.....	45
Tableau I.3 - Exemples de coûts de dégâts matériels consécutifs à des phénomènes de mouvements de terrain.....	48
Tableau I.4 - Tentative d'approche globale du coût annuel des phénomènes de mouvements de terrain en France (d'après Asté, 1986).....	49
Tableau I.5 - Quelques cas étrangers d'obstruction de cours d'eau en fond de vallée par un phénomène du type mouvements de terrain.....	51
Tableau I.6 - Quelques cas français d'obstruction de cours d'eau en fond de vallée par un phénomène du type mouvements de terrain.....	52

### **Chapitre II**

Tableau II.1 - Détail des pertes économiques directes produites par la catastrophe de la Josefina (d'après C.R.E.A., 1993).....	60
Tableau II.2 - Détail des pertes en surfaces agricoles (d'après C.R.E.A., 1993).....	61
Tableau II.3 - Echelles d'endommagement structurel et corporel utilisées pour la construction de la matrice d'endommagement de la catastrophe de la Josefina.....	73
Tableau II.4 - Matrice d'endommagement structurel et corporel associée à la catastrophe de la Josefina.....	75
Tableau II.5 - Précipitations (en mm de hauteur d'eau) cumulées sur 24 heures (du 6/01 à 7 h au 7/01 à 7 h) et sur 36 h (du 5/01 au 7/01) pour quelques stations de la Drôme (d'après données Météo-France, 1994).....	79
Tableau II.6 - Caractéristiques de quelques phénomènes de mouvements de terrain célèbres dans la région du Diois.....	83
Tableau II.7 - Caractéristiques de quelques glissements préoccupants du Diois, activés ou réactivés par les intempéries des 6 et 7 Janvier 1994.....	84
Tableau II.8 - Liste de quelques sources d'informations susceptibles d'être consultées pour une évaluation de l'impact économique des catastrophes naturelles.....	87
Tableau II.9 - Bilan comparé des pertes économiques directes consécutives aux intempéries du 5 au 10 Janvier 1994. Analyse macro-économique.....	91
Tableau II.10 - Inventaire économique partiel et prévisionnel des effets des phénomènes de mouvements de terrain consécutifs aux intempéries des 6 et 7 janvier 1994 sur la région du Diois. Analyse micro-économique.....	94
Tableau II.11 - Importance des modes d'endommagement du réseau routier du Diois.....	101

**Chapitre III**

Tableau III.1 - Echelles d'intensité destructrice des phénomènes de mouvements de terrain.....	128
Tableau III.2 - Equivalences vitesse-volume des différentes valeurs du critère énergie cinétique. ....	131
Tableau III.3 - Classification des phénomènes de mouvements de terrain en termes d'intensité destructrice.....	132
Tableau III.4 - Niveaux d'intensité de quelques mouvements de terrain connus.....	133
Tableau III.5 - Typologie des modes et niveaux d'endommagement des principaux éléments exposés aux mouvements de terrain .....	135
Tableau III.6 - Exemples d'échelles d'endommagement structurel du bâti existantes. ....	136
Tableau III.7 - Approches comparatives de quantification de la valeur vénale de la vie humaine .....	139
Tableau III.8 - Matrice d'endommagement structurel (DS) et corporel (DC) des éléments situés hors bâti. ....	141
Tableau III.9 - Légende de la matrice d'endommagement structurel et corporel des éléments situés hors bâti.....	142
Tableau III.10 - Critères de résistance structurelle du bâti vis à vis des principales sollicitations mouvements de terrain. ....	144
Tableau III.11 - Matrice d'endommagement corporel (IDCb) et structurel (IDSb) des éléments situés sous bâti. ....	144
Tableau III.12 - Exemples de fonctions dominantes associées aux principaux éléments exposés.....	146
Tableau III.13 - Matrice d'endommagement fonctionnel. ....	147
Tableau III.14 - Types de valeurs unitaires initiales à attribuer aux différents éléments exposés.....	150
Tableau III.15 - Simulation Trièves : matrice d'endommagement retenue.....	159
Tableau III.16 - Simulation Trièves : table de valeurs initiales unitaires retenues. ....	160
Tableau III.17 - Simulation Trièves : récapitulatif des pertes suivant les deux scénarios S1 et S2. ....	163



## *LISTE DES ANNEXES*

ANNEXE I - Inventaire d'événements dommageables.....	169
ANNEXE I.1 - liés à des phénomènes du type glissements .....	170
ANNEXE I.2 - liés à des phénomènes du type écoulements.....	179
ANNEXE I.3 - liés à des phénomènes du type chute de blocs-éboulements- écroulements .....	185
ANNEXE I.4 - liés à des phénomènes du type affaissements-tassements- effondrements .....	191
ANNEXE II - Catastrophe de la Josefina : illustration des phénomènes.....	195
ANNEXE II.1 - vues multitemporelles du secteur de la Josefina.....	196
ANNEXE II.2 - vues aériennes de la vallée du rio Paute au niveau de la ville de Paute avant et après la crue de rupture .....	197
ANNEXE II.3 - suivi photographique en temps réel du principal glissement induit par la vidange de la retenue.....	198
ANNEXE II.4 - chronologie de l'enchaînement des phénomènes .....	199
ANNEXE II.5 - synoptique des différentes phases phénoménologiques.....	200
ANNEXE III - Catastrophe de la Josefina : arborescence des dommages.....	203
ANNEXE IV - Catastrophe de la Josefina : illustration des dommages.....	207
ANNEXE IV.1 - carte de situation des photographies des dommages.....	208
ANNEXE IV.2 - dommages aux bâti.....	211
ANNEXE IV.3 - dommages aux infrastructures de communication.....	213
ANNEXE IV.4 - dommages aux surfaces naturelles.....	214
ANNEXE V - Chronologie de la catastrophe de la Josefina.....	215
ANNEXE VI - Evénements du Diois : inventaire des dommages consécutifs aux intempéries des 6 et 7 janvier 1994.....	219
ANNEXE VI.1 - carte de localisation des dommages.....	221
ANNEXE VI.2 - description des dommages au réseau routier départemental.....	223
ANNEXE VI.3 - description des dommages aux voies communales et chemins ruraux.....	227
ANNEXE VII - Evénements du Diois : illustrations photographiques.....	231
ANNEXE VII.1 - glissements célèbres du Claps et de Bonneval-en-Diois .....	232
ANNEXE VII.2 - vues de quelques glissements consécutifs aux intempéries des 6 et 7 janvier 1994 .....	233
ANNEXE VII.3 - vues multiples de la coulée de débris principale de la Bâtie-des- Fonds .....	234

---

ANNEXE VIII - Modèle de fiche communale de déclaration de dommages destinée à la préfecture pour bénéficier de l'arrêté de catastrophe naturelle.....	235
ANNEXE IX - Liste des communes drômoises ayant bénéficié de l'arrêté de catastrophe naturelle suite aux intempéries des 6 et 7 janvier 1994 .....	237
ANNEXE X - Evénements du Diois : détail des dommages et des coûts aux réseaux routiers suite aux intempéries des 6 et 7 janvier 1994.....	239
ANNEXE X.1 - réseau départemental (détail par événement) .....	240
ANNEXE X.2 - réseau départemental (détail par section de route) .....	241
ANNEXE X.3 - réseau communal (détail par commune) .....	242
ANNEXE XI - Résultats graphiques de l'enquête de mars 1994 menée auprès des habitants de la commune de Boulc-en-Diois.....	243
ANNEXE XII - Modèle du questionnaire de l'enquête de mai 199 menée auprès des artisans et commerçants de la commune de Châtilion-en-Diois .....	247
ANNEXE XIII - Chronologie de la catastrophe de la Salle-en-Beaumont.....	249
ANNEXE XIV - Catastrophe de la Salle-en-Beaumont : illustrations photographiques .....	251
ANNEXE XV - Exemples de prix unitaires de quelques éléments exposés .....	253
ANNEXE XVI - Principaux mouvements de terrains historiques répertoriés sur les 9 communes étudiées de la région du Trièves (Isère, France).....	255
ANNEXE XVII - Simulation de pertes sur le Trièves .....	257
ANNEXE XVII.1 - Découpage du territoire en zones de sollicitations d'intensité donnée.....	258
ANNEXE XVII.2 - Inventaire des éléments structurels pris en compte .....	259
ANNEXE XVII.3 - Distribution des pertes économiques par commune.....	260
ANNEXE XVII.4 - Détail des pertes communales .....	261

## **TABLE DES MATIERES**

<i>RESUME-ABSTRACT</i> .....	3
<i>REMERCIEMENTS</i> .....	5
<i>SOMMAIRE</i> .....	6
<i>INTRODUCTION GENERALE</i> .....	7
<i>CHAPITRE 1 - CONCEPTS ET REALITES DU RISQUE GENERE PAR LES MOUVEMENTS DE TERRAIN</i> .....	9
1. Introduction.....	9
2. Etat des concepts propres aux analyses de risque .....	10
2.1. Présentation .....	10
2.2. Le concept de risque .....	10
2.2.1. Au sens commun.....	10
2.2.2. Au sens théorique.....	11
2.2.2.1. Notion de risque spécifique.....	12
2.2.2.2. Notion de risque global encouru.....	15
2.2.2.3. Risque et théorie de la décision .....	15
2.3. Le concept de vulnérabilité.....	18
2.3.1. La vulnérabilité au sens large : l'approche qualitative.....	18
2.3.1.1. Définition .....	18
2.3.1.2. Le facteur démographique et l'urbanisation croissante.....	18
2.3.1.3. Les facteurs socio-économiques .....	19
2.3.1.4. Les facteurs psycho-sociologiques et comportementaux .....	20
2.3.1.5. Les facteurs techniques et fonctionnels.....	21
2.3.1.6. Les facteurs institutionnels et politico-administratifs.....	22
2.3.2. La vulnérabilité au sens technique : l'approche quantitative .....	23
2.3.2.1. Présentation .....	23
2.3.2.2. Définition .....	23
2.3.2.3. Fonction d'utilité.....	24
2.3.2.4. Fonctions d'endommagement .....	24
2.4. Notions de gravité et d'acceptabilité du risque .....	28
2.4.1. Gravité d'un événement.....	28
2.4.2. Acceptabilité du risque.....	29

3. Réalités du risque mouvements de terrain.....	32
3.1. Présentation .....	32
3.2. Des phénomènes variés.....	32
3.2.1. Différentes typologies.....	32
3.2.2. Les mouvements lents et continus .....	33
3.2.2.1. Les phénomènes de gonflement-retrait .....	33
3.2.2.2. Les phénomènes d'affaissement.....	33
3.2.2.3. les phénomènes de tassement .....	33
3.2.2.4. Les phénomènes de reptation.....	33
3.2.2.5. Les phénomènes de solifluxion .....	34
3.2.2.6. Les phénomènes de glissement pelliculaire ou superficiel .....	34
3.2.2.7. Les phénomènes de fluage.....	35
3.2.2.8. Les phénomènes de tassement de versant .....	35
3.2.2.9. Les phénomènes de poinçonnement .....	35
3.2.2.10. Les phénomènes de fauchage des couches.....	35
3.2.2.11. Les phénomènes de glissements rotationnels .....	36
3.2.2.12. Les phénomènes de glissements translationnels.....	36
3.2.2.13. Les phénomènes de glissements plans .....	37
3.2.3. Les mouvements rapides et discontinus.....	37
3.2.3.1. Les phénomènes d'effondrements.....	37
3.2.3.2. Les phénomènes de chutes de pierres, de blocs, d'écroulements et éboulements rocheux.....	38
3.2.3.3. les phénomènes d'éboulements d'extension catastrophique .....	39
3.2.3.4. les phénomènes de coulées de débris.....	41
3.2.3.5. Les phénomènes de coulées boueuses.....	41
3.2.3.6. Les phénomènes de laves torrentielles .....	42
3.3. Des effets dommageables .....	44
3.3.1. Sur le plan humain .....	44
3.3.1.1. Bilan mondial .....	44
3.3.1.2. Bilan national .....	44
3.3.2. Sur le plan économique.....	47
3.4. L'importance des phénomènes induits.....	50
3.4.1. Obstruction de cours d'eau en fond de vallée .....	50
3.4.2. Chute d'une masse rocheuse dans un plan d'eau .....	53
4. Conclusion du premier chapitre.....	53
 <i>CHAPITRE II - ANALYSES DE CAS</i> .....	55
1. Introduction .....	55
2. La catastrophe de la Josefina (Equateur, printemps 1993) : un événement convulsif aux effets induits dévastateurs.....	56
2.1. Présentation .....	56
2.2. Un enchaînement de phénomènes dommageables.....	58
2.3. Des pertes considérables.....	60
2.4. Une gestion de crise difficile .....	62
2.5. Analyse du glissement principal.....	63
2.5.1. Contexte géologique et géomorphologique .....	63
2.5.2. Caractéristiques géométriques et cinématiques.....	65
2.5.3. Hypothèses de déclenchement.....	65
2.5.3.1. Les facteurs permanents .....	65
2.5.3.2. Les facteurs déclenchants .....	65
2.5.3.3. La dynamique du glissement .....	67

2.6. Analyse des dommages.....	68
2.6.1. Présentation.....	68
2.6.2. Les processus d'endommagement.....	69
2.6.2.1. Les processus mécaniques.....	70
2.6.2.2. Les processus hydrauliques.....	71
2.6.3. Modes d'endommagement structurel et corporel.....	73
2.6.4. Perturbations fonctionnelles.....	75
2.6.5. Réponses et coûts associés.....	77
2.7. Conclusion.....	77
3. Les événements du Diois (Drôme, France, Janvier 1994) : des phénomènes dispersés mais aux effets cumulables.....	78
3.1. Présentation.....	78
3.2. Description des phénomènes.....	79
3.2.1. Des intempéries à caractère exceptionnel.....	79
3.2.2. Des phénomènes de mouvements de terrain nombreux et dispersés.....	82
3.3. Essai d'inventaire et d'analyse des conséquences économiques.....	85
3.3.1. Présentation.....	85
3.3.2. Données disponibles.....	87
3.3.3. Analyse macro-économique.....	88
3.3.4. Analyse micro-économique.....	91
3.3.4.1. Dommages et coûts directs.....	92
3.3.4.2. Effets et coûts indirects.....	94
3.4. Analyse de l'endommagement du réseau routier.....	96
3.4.1. Présentation.....	96
3.4.2. Dommages structurels.....	96
3.4.3. Dysfonctionnement du réseau routier départemental.....	103
3.5. Essai de mesure de préjudices indirects : cas de l'enclavement de Boulc.....	105
3.5.1. Présentation du cas.....	105
3.5.2. Analyse des préjudices sur la commune de Boulc.....	107
3.5.2.1. Présentation de l'enquête.....	107
3.5.2.2. Préjudices psychologiques et atteintes morales.....	107
3.5.2.3. Préjudices sociaux.....	108
3.5.2.4. Préjudices économiques.....	108
3.5.2.5. Répercussions extérieures.....	109
3.5.3. Analyse des préjudices sur la commune de Châtillon-en-Diois.....	110
3.6. Conclusion.....	112
4. Le glissement de terrain de la Salle-en-Beaumont (Isère, France) : une catastrophe au retentissement national.....	113
4.1. Présentation.....	113
4.2. Description des phénomènes.....	113
4.3. Description sommaire des principaux modes d'endommagement.....	114
4.4. Conclusion.....	116
5. Conclusion du second chapitre.....	117
<i>CHAPITRE III - L'EVALUATION DE LA VULNERABILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN</i> .....	119
1. Introduction.....	119
2. La quantification de la vulnérabilité.....	120

2.1. Présentation .....	120
2.2. La capacité d'endommagement des mouvements de terrain .....	120
2.2.1. Notion de processus d'endommagement.....	120
2.2.2. Notion d'intensité destructrice .....	126
2.2.2.1. Critères d'intensité .....	126
2.2.2.2. Echelles d'intensité .....	129
2.3. Modes et niveaux d'endommagements des éléments exposés .....	134
2.3.1. Typologie des éléments exposés .....	134
2.3.2. Typologie des modes d'endommagement.....	134
2.3.3. La mesure du niveau d'endommagement.....	137
2.3.3.1. Notions de taux d'endommagement et de valeur de l'élément exposé .....	137
2.3.3.2. Taux d'endommagement structurel .....	137
2.3.3.3. Taux de préjudice corporel .....	139
2.3.3.4. Taux de dysfonctionnement.....	140
2.4. Matrices d'endommagement .....	140
2.4.1. Présentation.....	140
2.4.2. Matrice d'endommagement structurel.....	143
2.4.3. Matrice d'endommagement corporel .....	144
2.4.4. Matrice d'endommagement fonctionnel .....	145
2.4.5. Matrices complémentaires.....	146
3. Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité et du risque .....	148
3.1. Présentation .....	148
3.2. Principe de la méthode.....	148
3.2.1. Préparation des données.....	148
3.2.1.1. Découpage du territoire .....	148
3.2.1.2. Nature des attributs.....	150
3.2.2. Calcul des indices de pertes et de risque.....	151
3.3. Applications fictives .....	153
3.3.1. Présentation.....	153
3.3.2. Perfectionnement de l'évaluation du processus d'impact : exemple de la commune d'Aigueblanche en Savoie (France).....	153
3.3.2.1. Présentation de l'étude .....	153
3.3.2.2. Principe de l'évaluation.....	154
3.3.3. Simulation de pertes liées à des glissements potentiels sur la région du Trièves en Isère (France) .....	157
3.3.3.1. Présentation de l'étude .....	157
3.3.3.2. Scénarios adoptés .....	159
3.3.3.3. Estimation des pertes.....	159
4. Conclusion du troisième chapitre.....	163
<i>CONCLUSION GENERALE</i> .....	165
<i>ANNEXES</i> .....	167
<i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</i> .....	263
<i>LISTE DES FIGURES</i> .....	275
<i>LISTE DES TABLEAUX</i> .....	279
<i>LISTE DES ANNEXES</i> .....	281
<i>TABLE DES MATIERES</i> .....	283